UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

EFFICACITÉ DE L'ÉCLAIRAGE NATUREL ET CONFORT VISUEL DANS UN ETABLISSEMENT SCOLAIRE EXISTANT AU QUEBEC : LE POTENTIEL DES « DISPOSITIFS D'OMBRAGE » (SHADING DEVICES)

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
POUR LA MAITRISE EN DESIGN DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
HODA BABAEEAZNAVEH

JANVIER 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

J'aimerais adresser mes sincères remerciements au professeur Philippe Lupien qui a bien voulu me diriger dans ce projet. Son expertise en design de l'environnement et en architecture du paysage a été très utile dans le cheminement de ma réflexion et m'a offert l'occasion d'étendre mon projet au-delà de mes connaissances initiales. Merci de m'avoir laissé toute la liberté d'explorer.

Je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique de l'école de design de l'UQÀM et tous les professeurs que j'ai eu l'honneur de côtoyer pendant ces années incroyables.

Je tiens particulièrement à remercier Réjean Legault et Thomas-Bernard Kenniff qui m'ont particulièrement appuyée dans les premières étapes de mes recherches, au moment où je me sentais le plus perdue.

J'adresse aussi mes remerciements à Guylaine Cheli qui a pris le temps de lire et commenter mon mémoire avec attention et esprit critique.

Merci à toute ma famille, surtout mes parents et leur infinie gentillesse, qui m'ont fortement soutenue malgré la distance. Merci également à ma sœur, dont les conseils et les encouragements ont été une grande source d'inspiration dans mon parcours académique et de soutien dans ma vie.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iii

LISTE DES FIGURES viii

LISTE DES TABLEAUX xx

RÉSUMÉ xxii

ABSTRACT xxiii

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I CADRE DE RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE 5

1.1 Problématique 5
1.2 Les écoles du Québec 8
1.3 État des écoles existantes 10
1.4 Rénovation des établissements scolaires au Québec 11
1.5 Objectifs et questions de recherche 13
1.6 Conditions climatiques 14
1.7 Description des bâtiments scolaires types du Québec 16
1.8 Lumière naturelle et lumière du jour 19
1.9 Confort visuel 20
1.10 Éblouissement 23
1.11 Simulation des performances de l'éclairage naturel 24

1.11.1 Unités de mesures quantitatives de la lumière du jour 26
1.11.2 Unités de mesures et mesures basées sur la luminance 28

1.12 Approche informatique et simulation 29

1.12.1 Configurations des fenêtres 31
1.12.2 Disponibilité de la lumière du jour 33
1.12.3 Analyse de l'éblouissement 35

CHAPITRE II LUMIERE NATURELLE ET DISPOSITIFS D'OMBRAGE CONVENTIONNELS 36

2.1 Lumière naturelle et bien-être 36
2.1.1 Rythmes circadiens 38
2.1.2 Trouble affectif saisonnier 39
2.1.3 Lumière du jour et stress 40
2.1.4 Effets de la lumière en situation d'apprentissage scolaire 41
2.2 Dispositifs d'ombrage 43
2.2.1 Classification des dispositifs d'ombrage 44
2.3 Étagère lumineuse (light shelf) 52
2.3.1 Panneau d'ombrage 56
2.4 Le rôle de la géométrie dans les dispositifs d'ombrage 59
2.4.1 Motifs géométriques 60
2.4.2 Biomimétisme 64
2.5 Études de cas existants au Québec 70
2.5.1 École Nationale de Cirque de Montréal 70
2.5.2 Centre des technologies textiles, Cégep de St-Hyacinthe 72
2.5.3 Le 740 Bel-Air- Édifice Maurice-Normand, Montréal 73
2.6 Conclusion 75

CHAPITRE III SYSTEMES DE VERDURE VERTICALE 78

3.1 Définitions et historique de systèmes de verdure verticale 78
3.2 Classifications des systèmes de verdure verticaux 83
3.3 Avantages des systèmes de verdure verticale ou SVV 86
3.3.1 Bénéfices environnementaux des systèmes de verdure verticale 86
3.3.2 Bénéfices sociaux des systèmes de verdure verticale 91
3.3.3 Bénéfices économiques des systèmes de verdure verticale 95
3.3.4 Bénéfices énergétiques et performance de la lumière des systèmes de verdure verticale 97
3.4 Paramètres régissant les performances du système de verdure verticale 109
3.5 Sélection de la végétation et orientation des bâtiments 111
3.6 Sélection des plantes et leur effet sur les systèmes de verdure verticaux 114
3.6.1 Plantes vasculaires: les plantes grimpantes 116
3.6.2 Plantes vasculaires : les succulents 122
3.6.3 Plantes non vasculaires : les mousses 123
3.7 Plantes adaptées et populaires au climat du grand Montréal 125

3.7.1 Bénéfices de l'implantation des arbres en milieu urbain et adaptation au climat du grand Montréal 129
3.7.2 Les systèmes de support pour SVV en détail 131

3.8 Conclusion 141

CHAPITRE IV CONCEPTION ET SIMULATION DE DISPOSITIFS D'OMBRAGE ET LEUR POTENTIEL 143

4.1 Étude de cas : l'école primaire Laurier 143
4.2 Analyse climatique 149
4.3 Simulation de la situation existante 153
4.4 Modification des dimensions des ouvertures pour améliorer le confort visuel 158
4.5 Scénario 1: l'étagère lumineuse 162
4.6 Scénario 2: panneau d'ombrage conventionnel 165
4.7 Scénario 3: panneau de verdure verticale réglable 169
4.8 Modèle final de SVV 172
4.9 Conclusion 178

CONCLUSION 181

ANNEXE 185

BIBLIOGRAPHIE 189

LISTE DES FIGURES

Figure1.1 Consommation d'énergie par utilisation finale du service d'enseignement québécois, tiré de Shiraziadle (2017). 6

Figure 1.2 Un ratio de verre trop élevé entraîne l'éblouissement et la surchauffe en été et le refroidissement en hiver: (en haut) école Saint-Joseph et (en bas) école Saint-Bernardin à Montréal. 7

Figure 1.3 Inconfort visuel typique en classe dans une école québécoise : (en haut) grande fenestration et stores rabattables pour contrôler une lumière du jour excessive et l'éblouissement; (en bas) éblouissement et lumière du jour non uniforme, tiré de Coulombe-Morency (2019). 8

Figure 1.4 Répartition des bâtiments selon leur année de construction, tiré de Després et al. (2021). 9

Figure 1.5 Localisation des écoles de la CSSDM par indice de vétusté (IVP). L'IVP est un indicateur permettant d'évaluer la santé globale d'un bâtiment, tiré de Radio-Canada (2014). 11

Figure 1.6 : Verdissement vertical des façades à Montréal. 13

Figure 1.7 : Localisation des écoles primaires du Québec selon la zone climatique (N=2308), tiré de Després et al. (2021). 15

Figure 1.8 : Classe conventionnelle avec son aménagement d'origine, tiré de Desprès et al. (2021). 17

Figure 1.9 : Types de fenêtres et d'ouvrants dans les classes d'un sous-échantillon de 48 écoles construites entre 1947 et 1968, tiré de Desprès et al. (2021). 17

Figure 1.10 Relation entre disponibilité de la lumière du jour, confort visuel, comportement des occupants et consommation d'énergie, tiré de Reinhart (2014). 19

Figure 1.11 Spectre solaire.tiré de Zemmouri, (2018). 22

Figure 1.12 : Propriétés de la lumière : luminance et éclairement, tiré de Omidfar (2015). 27

Figure 1.13Étapes d'analyse et de simulation 30

Figure 1.14 Nouvelle ville de Resolute Bay (à gauche) et les dessins détaillés d'une fenêtre nordique adaptée aux variations saisonnières de la lumière dans ces régions (à droite), senses atlas (2021). [Https://www.sensesatlas.com/territory/resolute-bay-ralph-erskine-and-the-arctic-utopia]. 32

Figure 1.15 L'image de la conception asymétrique de la phase de compétition de la première version de la fenêtre de la chambre du patient 33

Figure 1.16 Classement de l'éblouissement d'après calcul de la DGP dans ClimateStudio —Solemma adapté de (Solemma, LLC ,2022) https://www.solemma.com/climatestudio 35

Figure 2.1 Résidences et laboratoires de l'Institut des sciences et technologies de Masdar City, un exemple de modernisation du mashrabiya, T. Caine (2014). [Photographie]. Archdaily. (Https://www.archdaily.com/517456/inside-masdar-city). 47

Figure 2.2 Expérimentation de dispositifs solaires en Malaisie, tiré de Lau et al. (2016). 49

Figure 2.3 Facteurs et variables qui affectent les performances des dispositifs d'ombrage manuels (Al-Masrani et al., 2018). 50

Figure 2.4 Classification des dispositifs d'ombrage selon l'implication énergétique, d'après Al-Masrani et al. (2018). 50

Figure 2.5 Mministère de l'Éducation à Rio de Janeiro avec son système d'ombrage ajustable manuellement. [Photographie]. Holanda, M. (n.d). Archdaily. (Https://www.archdaily.com/577579/spotlight-oscar-niemeyer/548caa52e58eceb76d000068-ministry-of-educatio?next_project=no). 51

Figure 2.6 Bénéfices des dispositifs d'ombrage selon la saison, tiré de Carletti et al. (2014) 51

Figure 2.7 Coupe transversale d'un espace avec étagère lumineuse étendue (interne et externe) (Antonis et al., 2017). Droite : Représentation schématique du parapet de Sainte-Sophie (Antonis et al., 2017). 52

Figure 2.8 Concept et fonction de l'étagère lumineuse, tiré de Im et al. (2013)..... 53

Figure 2.9 Coupe de l’étagère lumineuse légère à droite, tiré de Antonis et al. (2017). 54

Figure 2.10 Processus de conversion de l’étagère cinétique (à droite), tiré de Im et al. (2013). 56

Figure 2.11 Répartition des dispositifs d’ombrage vernaculaires islamiques et type de climats. 57

Figure 2.12 Répartition des pays avec dispositifs d’ombrage de type vernaculaire selon le type de climat, d’après Koppen-Geiger 57

Figure 2.13 Exemples de panneaux d'ombrage perforés (a) Panneau d'ombrage moderniste: l'Unité d'habitation de Marseille. Ghoussainy, B. (s.d). [Photographie]. Archdaily. (https://www.archdaily.com/952993/the-corbusierhaus-through-the-lens-of-bahaa-ghoussainy). 59

Figure 2.14 Shanāsheel dans l'espace intermédiaire de la maison Taheri en Iran. (Afshin Iranpour). (12avril,2012). [Photographie].Ouriranphotos. (https://ouriranphotos.com/fa/photo/592). 60

Figure 2.15 Un moucharabieh devant la fenêtre et le balcon en Tunisie. Phileon (2007, 1 juin). [Photographie].Wikipedia.(https://en.wikipedia.org/wiki/Mashrabiya#/media/File:Moucharabier-panoramio.jpg 60

Figure 2.16 Dispositif d'ombrage inspiré des motifs persans dans différentes résolutions (Emami et Giles, 2016). 61

Figure 2.17 Simulation de luminance selon les motifs géométriques du dispositif d'ombrage (Emami et Giles, 2016). 62

Figure 2.18 Configurations d'ombrage : aucun ombrage, ombrage complet et combinaisons mixtes d'opacité pour les faces, chacune pour un taux de contraction spécifique (Pesenti et al, 2015). 63

Figure 2.19 Panneau d'ombrage perforé et corrélation entre une disponibilité excessive de la lumière du jour et éblouissement et surchauffe (Chi et al., 2018). 63

Figure 2.20 Optimisation des surfaces et schémas de croissance biologiques inspirant les formes géométriques. La disposition des fleurs et des feuilles du tournesol sert à éviter l'auto-ombrage avec une utilisation maximale de l'espace afin d'assurer une croissance optimale des plantes. Son principe mathématique est illustré dans le (B) et le (C), la spirale dorée (Gosztonyi, 2018). 64

Figure 2.21 Façade « double peau » inspirée des feuilles de charme (Vernoux, 2020). 66

Figure 2.22 (a) Dispositif d'ombrage BILAME. (b) BILAME (Source de l'image : ArtBuild). (c) Le deuxième prototype Pho'liage. (d) mouvement de Pho'liage (e) nastique des « pétales » triangulaires individuelles (*Pho'liage* ®, 2019). (Https://www.artbuild.com/lab/pholiage) 67

Figure 2.23 Prototype perforé (gauche : photo de la position pliée, droite : CAO de la position ouverte) (*Pho'liage* ®, 2019). 68

Figure 2.24 :(a) Déformation élastique de l'oiseau de Paradis pendant le processus de pollinisation (b) Façade cinétique du pavillon thématique de l'Expo 2012 à Yeosu, inspirée par le mouvement de la fleur "oiseau de Paradis" (Hosseini et al., 2021). 69

Figure 2.25 (a, b et c) Nouveau bâtiment de l'École Nationale de Cirque, équipé de dispositifs d'ombrage en maille d'acier (d) Application de Solera® au niveau du sol qui réduit considérablement l'éblouissement, le convertissant en une lumière du jour diffuse uniforme tiré de https://www.advancedglazings.com/case-studies/cirque..... 70

Figure 2.26 Dispositifs d'ombrage du Centre des technologies textiles, Cégep de St-Hyacinthe. ABCP architecture 73

Figure 2.27 Le 740 Bel-Air. Lyons et De Grâce (2009). Canada's Green Prototype. High performing buildings. http://www.pageaumorel.com/publications/23-2009-05-00_ASHRAE_HPB_740_Bel-Air_JDG_FGE_AL.pdf..... 75

Figure 3.1 Les Jardins suspendus de Babylone, une des premières manifestations connues de végétation sur la façade. Knab,.F(1886) [peinture]. https://docs.google.com/document/d/1bdUZ6y5tuPGhwT5yKTMjyFDkBI9-lUY5/edit#..... 79

Figure 3.2 À gauche: musée du Quai Branly à Paris par Patrick Blanc Halble, R. (s.d). Musée du quai Branly/Atelier Jean Nouvel [Photographie]. Archdaily. https://www.archdaily.com/914842/musee-du-quai-branly-ateliers-jean-nouvel 80

Figure 3.3 Living Wall Biofilter à Toronto par Diamond Schmitt Architects..... 81

Figure 3.4 Mur vivant de L'oasis d'Aboukir à Paris par Patrick Blanc 81

Figure 3.5 Application de jasmin étoilé sur les façades avant et latérales du complexe Ex Ducati.Archdaily (2009, 27 mars). [Photographie]. Dans Ex Ducati/Mario Cucinella Architects. https://www.archdaily.com/16863/ex-ducati-mario-cucinella-architects 82

Figure 3.6 Façade verte (à gauche) et mur vivant (à droite), inspiré de Safikhani et al. (2014). 83

Figure 3.7 Schéma des SVV selon le système d'enracinement, tiré de Kromoser et al. (2020). 84

Figure 3.8 Récapitulatif des catégories de murs végétaux, inspiré de Bernier (2011b) et Manso et al. (2015) 85

Figure 3.9 Absorption, transmission et réflexion des feuilles, tiré de Brown et Gillespie (1995). 89

Figure 3.10 Murs de l'Université McGill recouverts de plantes grimpantes, comme élément symbolique du bâtiment éducationnel à Montréal. 94

Figure 3.11 Les murs recouverts de vigne vierge dans la cour intérieure du pub Sainte-Elizabeth, Montréal 96

Figure 3.12 Application de la végétation au Québec dans trois espaces différents : en haut à gauche, sur les fenêtres; en haut à droite, sur les façades et, en bas, comme espaces intermédiaires. 98

Figure 3.13 Salles d'essais sans façade verte à gauche et avec façade verte à droite, tiré de Sunakorna et Yimprayoona (2011). 101

Figure 3.14 Schéma d'installation des végétaux dans la lame d'air de la façade double peau, tiré de Stec et al. (2005). 102

Figure 3.15 Expérimentation Bioshade dans la salle de test (à gauche) et vue en coupe du Bioshader (à droite) tiré de de IP et al. (2020) 107

Figure 3.16 Création d'un paysage dynamique montréalais grâce à l'implantation de plantes grimpantes. 117

Figure 3.17 Application de la vigne vierge (Parthenocissus quinquefolia) dans un espace intermédiaire d'un bâtiment résidentiel de l'Université technique de Munich en Allemagne, tiré de EuroInox et diamant building (n.d.). 117

Figure 3.18 Illustration de radicelles aériennes sur plantes grimpantes, tiré de Petty (2008). 118

Figure 3.19 Illustration de tiges volubiles, tiré de Petty (2008). 118

Figure 3.20 Illustration de plantes à vrille, tiré de Petty (2008). 119

Figure 3.21 Application de tapis succulents (à gauche), tiré de Kelaidis (2012); les succulentes appropriées en extérieur (à droite), tiré de Baldwin (2013)..... 122

Figure 3.22 Utilisation de mousse dans un SVV intérieur. Archdaily (s.d). [Photographie]. https://www.archdaily.com/926367/why-incorporate-moss-walls-into-architecture/5da0986a3312fd25b1000030-why-incorporate-moss-walls-into-architecture-photo. 124

Figure 3.23 Végétation de montagne. Le Jardin alpin au Jardin Botanique de Montréal. 127

Figure 3.24 Zones de rusticité au Canada tiré de Hydro-Québec (2010)..... 129

Figure 3.25 Implantation des arbres et leur impact sur les ouvertures et les bâtiments, École Laurier à Montréal. 130

Figure 3.26 Schéma du système G-Sky Vine Container, tiré de Petty (2008)..... 136

Figure 3.27 Systèmes de mur vivant de Parabienta avec panneaux portables (à gauche). Coupe..... 140

Figure 4.1 École Laurier et salle de classe sélectionnée encerclée en rouge(a), Église catholique Saint-Denis, située au sud-est de la salle de classe, qui fait partie d'un réseau de milieux naturels protégés et qui représente un monument important dans le quartier (b) 144

Figure 4.3 Intérieur de la salle de classe 145

Figure 4.2 (a) Localisation de l'école Laurier (b) Localisation des arbres à proximité de l'école..... 145

Figure 4.4 Plan et coupe de la salle de classe 146

Figure 4.5 Rapport entre pénétration de la lumière et hauteur du linteau de fenêtre, tiré de Reinhart et LoVerso (2010). 148

Figure 4.6 Zones d'éclairement dans la salle de classe sélectionnée..... 148

Figure 4.7 Vue extérieure de la salle de classe sans dispositifs d'ombrage 149

Figure 4.8 Position du soleil à midi et trajectoire du soleil au-dessus de l'école Laurier au solstice d'été (à gauche) et d'hiver (à droite). 151

Figure 4.9 Températures, humidité et rayonnement solaire moyens sur une année . 152

Figure 4.10 Direction, fréquence et intensité du vent à Montréal 152

Figure 4.11 Humidité moyenne de l'air à Montréal sur une année. 152

Figure 4.12 : Température moyenne de l'air à Montréal sur une journée et tout au long de l'année 153

Figure 4.13 Rendu HDR de l'intensité lumineuse à 15h00 lors du solstice d'été (21 juin 2022) (à gauche) et solstice d'hiver (21 décembre 2022) (à droite). 154

Figure 4.14 Lumière du jour et éblouissement dans la salle de classe (en haut à gauche sDA, en 158

Figure 4.15 : Modification des dimensions des ouvertures pour améliorer le confort visuel. 159

Figure 4.16 : Scénario 1: l'étagère lumineuse 161

Figure 4.17 : Lumière du jour et éblouissement avec l'agrandissement des fenêtres (en haut à gauche : sDA; en haut à droite : ASE; en bas à gauche : UDI et en bas à droite : DGP). 161

Figure 4.18:(a) Flux de lumière avec un angle nul (1), 10 ° (2) et de de 30 ° (3), tiré de Lee et al. (2018) (b) impact de la saison et de l'inclination sur la pénétration de la lumière, tiré de Ruck et al. (2000). 162

Figure 4.19 : scénario 2: Panneau d'ombrage conventionnel 166

Figure 4.20Mur végétal et changements de feuillage selon les saisons (respectivement printemps, été, ... 167

Figure 4.21 Photographies négatives du feuillage. (e) : modélisation de photographie négative. 167

Figure 4.22 À gauche UDI et à droite DGP pour une couverture foliaire de 30%. .. 168

Figure 4.23 Scénario 3: panneau de verdure verticale (ou SVV) réglable..... 170

Figure 4.24 À gauche : modèles de panneaux de verdure verticale avec 20%, 40% et 65% de couverture sélectionnés pour la simulation finale; À droite : simulation finale de l'espace intérieur de la classe et UDI avec panneau de verdure verticale d'une couverture de 20%. 171

Figure 4.25 Combinaison du panneau de verdure verticale réglable avec l'étagère lumineuse. (a) étagère lumineuse avec pente de 15° (b) espace d'évacuation de l'eau vers la jardinière (c) voie d'eau (d) Squelette et cadre en acier inoxydable (e) Cadre en acier inoxydable pour régler le panneau d'ombrage. 174

Figure 4.26 Schéma de plantation 174

Figure 4.27 Plantes proposées pour le SVV et le jardin de fenêtre respectivement; lierre grimpant (hedera helix), lierre de boston (parthenocissus tricuspidata),

vigne vierge (parthenocissus quinquefolia), lysimaque nummulaire (Lysimachia nummularia) et arnica des montagnes (arnica montana).: 174

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Caractéristiques types des salles de classe du Québec, adapté de Després et al. (2021). 18

Tableau 3-1 : Résumé des bénéfices des systèmes de verdure verticale..... 97

Tableau 3-2 : Paramètres qui affectent les performances thermiques et de la lumière naturelle d'un système de verdure verticale, tiré de Sheweka et Mohamed (2012). 111

Tableau 3-3 : Plantes appropriées selon l'orientation de la façade, inspiré de Johnston et Newton (2004), Huang et al. (2019) et Ip et al. (2010)..... 112

Tableau 3-4 : Plantes grimpantes avec le niveau d'ensoleillement requis et la zone de rusticité compatible au climat du Québec, adapté de Johnston et Newton (2004) et Bernier (2011b). 121

Tableau 3-5:Avantages et désavantages des plantes de montagne selon les espèces, d'après Bernier (2011a)..... 126

Tableau 3-6 : Les différents types de systèmes de soutènement en acier pour façades vertes (végétalisées), les images tirées de EuroInox et diamant building (n.d.). 134

Tableau 3-7 : Caractéristiques des modes de plantation, tiré de Petty (2008). 137

Tableau 4-1Matériaux sélectionnés pour la simulation et leurs caractéristiques, en se basant sur le standard de la bibliothèque Climate studio.: 153

Tableau 4-2:Mesures de la lumière du jour et de l'éblouissement avec implantation d'une étagère lumineuse et selon ses différentes caractéristiques 163

RÉSUMÉ

La présente recherche tente de déterminer l'impact des dispositifs d'ombrage sur la qualité de la lumière du jour à l'intérieur d'une salle de classe sélectionnée à Montréal. Afin d'améliorer le confort visuel dans cette salle de classe, plusieurs alternatives à l'existant sont proposées, prenant en compte l'esthétique et des considérations environnementales et sociales. Cette recherche s'inscrit dans un contexte d'urgence en matière de rénovation du parc immobilier scolaire québécois. En effet, la grande majorité des écoles primaires du Québec a dépassé le premier cycle de vie et nécessitent d'importantes rénovations. Considérant la quantité d'écoles devant subir des rénovations majeures et l'évolution des normes en termes de qualité des espaces, le questionnement autour du confort thermique et visuel est plus que pertinent.

La recherche propose l'évaluation de trois dispositifs d'ombrage pour améliorer la disponibilité de la lumière du jour et contrôler l'éblouissement sans obstruer la vue sur l'extérieur : l'étagère lumineuse, le panneau d'ombrage conventionnel et le système de verdure verticale. Trois objectifs sous-tendent l'étude : (1) Améliorer la répartition de la lumière du jour dans la salle de classe. (2) Fournir un ombrage réglable qui répond aux besoins des occupants pendant toute la période d'occupation afin de créer un confort visuel et contrôler l'éblouissement (3) Concevoir un dispositif inspiré de la nature. En effet, cette recherche se base sur l'hypothèse que la géométrie des plantes et leurs motifs de croissance peuvent être transposés aux panneaux d'ombrage afin de créer un modèle optimal en matière de confort visuel. Les résultats et les conclusions de ces expérimentations doivent dégager les caractéristiques optimales de chaque système pour la conception d'un dispositif final.

Mots-clés : Confort visuel, Contrôle de l'éblouissement, Panneaux d'ombrage conventionnel, Dispositifs d'ombrage de verdure, Étagère de lumière

ABSTRACT

The present research investigates the impact of shading devices on the quality of daylight inside a selected classroom in Montreal. In order to improve visual comfort in this classroom, several alternatives are proposed, taking into account aesthetics and environmental and social considerations. This research studies the retrofitting and the renovation of a Quebec school building in terms of daylighting and glare control. Indeed, the vast majority of primary schools in Quebec have passed their first life cycle and require major renovations. Considering the number of schools that have to undergo major renovations and the evolution of standards in terms of the quality of spaces, the questioning of thermal and visual comfort is more relevant than ever.

This research proposes the evaluation of three shading devices to improve the availability of daylight and control glare without obstructing the view to the outside: the light shelf, the conventional shading panel and the system of vertical greenery. Three objectives underlie the study: (1) Improve the distribution of daylight in the classroom. (2) Provide adjustable shading that meets the needs of occupants throughout the occupancy period to create visual comfort and control glare (3) Design a device inspired by nature. Indeed, this research is based on the hypothesis that the geometry of plants and their growth patterns can be transposed to shade panels in order to create an optimal model in terms of visual comfort. The results and conclusions of these experiments should identify the optimal characteristics of each system for the design of a final device.

Keywords: Visual comfort, Glare control, Shading panel, vertical greenery system, Light shelf

INTRODUCTION

Au Québec, plus des deux tiers des écoles ont été construites entre 1947 et 1965, avec un sommet au début de la Révolution tranquille. Le développement soudain de la construction d'édifices scolaires à l'après-guerre s'explique par l'explosion des naissances (baby-boom) et l'adoption de la Loi pour l'instruction obligatoire jusqu'à 14 ans, votée en 1943 (Tremblay-Lemieux, 2019). Ces deux évènements occasionnent une pression démographique sur le système scolaire, auquel le Québec répond d'autant plus vite qu'il vit une forte croissance économique jusque dans le milieu des années 1970. Aujourd'hui, le parc immobilier scolaire du Québec est vieillissant et les commissions scolaires manquent de ressources pour son entretien. Les élèves et les enseignants héritent ainsi d'espaces figés dans le temps et représentatifs d'une vision, de valeurs éducatives et de normes dépassées. C'est particulièrement le cas de la Commission scolaire de Montréal, qui possède un des parcs immobiliers les plus anciens de tout le Québec, avec près de 36% des bâtiments construits avant 1950 et près de 63% construits entre 1950 et 1980 alors que ceux construit après 1990 ne représentent que 1% du parc immobilier (Commission scolaire de Montréal, 2005). Pourtant, comme le soulignent de nombreux chercheurs, l'architecture scolaire a une incidence sur la réussite scolaire.

Dans ce contexte, la démolition et la reconstruction n'est pas la seule solution pour arrimer les écoles aux exigences d'une réalité éducative qui a beaucoup évolué ces dernières années. Les systèmes du bâtiment peuvent généralement être réparés ou remplacés. En effet, pour des questions de durabilité, la rénovation est une meilleure réponse pour les mettre aux normes en vigueur actuellement. De ce fait, les institutions opèrent chaque année des rénovations mineures ou majeures, comme la réparation des

toitures, le remplacement des fenêtres ou des systèmes de chauffage (Desprès et al., 2021).

Parmi les pratiques de rénovations, l'éco rénovation et le rétrofit restent les options les plus intéressantes en raison de leur faible coût comparé à celui de rénovations majeures. Le rétrofit signifie « doter quelque chose d'un composant ou d'une fonctionnalité qui n'a pas été installé lors de la fabrication ou ajouter quelque chose qu'il n'avait pas lors de sa construction initiale » (traduction de l'auteure) (Eames et al., 2014). En architecture et en urbanisme, le rétrofit décrit les modifications physiques substantielles à l'échelle du bâtiment, du quartier ou de la ville (Eames et al., 2014). On associe souvent le terme à la rénovation. Cependant, le rétrofit intègre des notions de durabilité, ce qui n'est pas forcément le cas pour la rénovation. Le rétrofit est une réponse aux changements climatiques et induit des considérations environnementales telles que la réduction de la consommation en énergies et en eau, la réduction des déchets, tout en améliorant la qualité de vie des usagers (Eames et al., 2014). Parce qu'il est basé sur la protection des ressources, le rétrofit participe aussi à la protection du patrimoine.

On sait aujourd'hui que l'inconfort thermique et visuel influence négativement la santé, les apprentissages et les performances des élèves. La surchauffe et l'éblouissement causés par la présence du rayonnement solaire direct sont des problèmes qui peuvent être résolus par la modification, l'ajout ou l'installation d'un ou de dispositifs qui n'avaient pas été prévu lors de la conception d'un espace. L'installation de « dispositifs d'ombrage » fait partie des solutions rétrofit courantes de contrôle de la lumière directe du soleil et son éblouissement gênant, afin de maintenir le confort des utilisateurs. Le système d'ombrage est l'une des stratégies les plus populaires chez les concepteurs pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

L'objectif principal de ce mémoire est d'améliorer la qualité de l'éclairage et le confort visuel dans les écoles du Québec.

La recherche se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre initie avec une évaluation de l'état historique des bâtiments scolaires aux Québec et d'un argument pour intervenir par le biais de la rénovation afin d'améliorer la qualité des salles de classe, en particulier en ce qui concerne la lumière naturelle.

Le deuxième chapitre met en contexte la lumière naturelle et le bien-être. Dans l'étape suivante, une révision réalisée sur des articles connexes à propos de l'éclairage naturel et des dispositifs d'ombrages conventionnel avec accent sur les panneaux d'ombrage comme le Mashrabia. Cette recherche met en évidence l'histoire et l'origine de la création de ces panneaux, en Afrique du Nord et au Moyen-Orient.

Après avoir expliqué les principes de base du biomimétisme, les différentes catégories de dispositifs d'ombrages et de modulation de la lumière naturelle, les solutions architecturales, technologiques, végétales sont proposées et des cas existants au Québec ont été étudiés.

Dans le troisième chapitre je ferai part du concept d'architecture végétale, qui a énormément évolué. De la conception d'un système de fenêtres verticales vertes qui améliore le confort visuel et thermique à l'intérieur des bâtiments comparativement aux aménagements traditionnels. Ce chapitre présente aussi les méthodes qui ont été développées pour concevoir ces systèmes de verdure de fenêtres verticales dans le contexte montréalais en expliquant la sélection des plantes et des structures de soutien ainsi que leur entretien et croissance, afin que le système produise des effets maximisés.

A intérieur du quatrième chapitre, les conditions d'une salle de classe type sont examinées a travers différents scénarios et alternatives afin d'explorer les pistes d'amélioration de la qualité de l'éclairage et de proposer la conception de dispositifs d'ombrage. Dans l'objectif d'améliorer la disponibilité de la lumière du jour et le contrôle de l'éblouissement, quatre stratégies sont envisagées : la modification des

fenêtres existantes, l'étagère lumineuse, le panneau d'ombrage conventionnel et le panneau de verdure verticale réglable. Ce projet étudie également l'impact des motifs organiques et la géométrie des panneaux d'ombrage sur la qualité de la lumière du jour. Une salle de classe de l'école primaire Laurier est sélectionnée comme espace d'exploration. Construite dans les années 1970, les problématiques auxquelles l'école est confrontée sont typiques de la majorité des écoles au Québec. En effet, elle subit actuellement des rénovations majeures en raison de la vétusté d'une partie de ses systèmes, ce qui permet au bâtiment une remise aux normes actuelles. Considérant la quantité d'écoles québécoises devant subir des rénovations majeures et l'évolution des normes en termes de qualité des espaces, le questionnement autour du confort thermique et visuel est plus que pertinent.

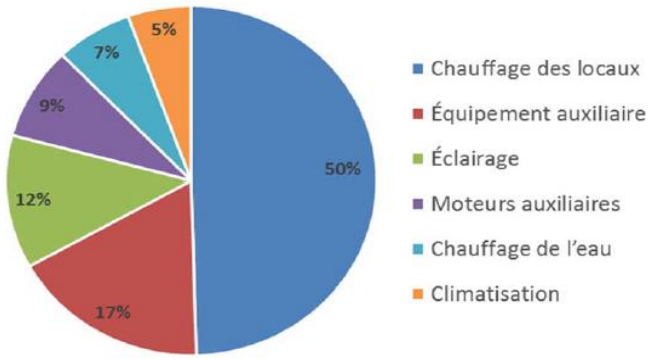
CHAPITRE I

CADRE DE RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE

1.1 Problématique

La salle de classe est l'unité la plus fondamentale pour considérer les performances thermiques et visuelles dans la plupart des bâtiments scolaires (Desprès et al., 2021; Moazzeni et Ghiabaklo, 2016). En effet, les enfants y passent la plupart de leur temps. Dans cet espace éducatif, les fenêtres tiennent un rôle primordial puisqu'elles affectent les performances de la lumière du jour, qui répond à des besoins physiques et mentaux essentiels et crée un environnement confortable pour les élèves, améliorant ainsi leur productivité (Moazzeni et Ghiabaklo, 2016). Une répartition adéquate et uniforme de la lumière est donc bénéfique pour les élèves. À contrario, des salles de classe sans fenêtres génèrent des comportements hostiles, hésitants et inadaptés et un manque d'intérêt chez les élèves (Edwards et Torcellini al., 2002). En dehors des aspects humains, la pénétration de la lumière du jour dans les bâtiments a aussi une incidence sur la consommation énergétique. Un contrôle adéquat de la lumière du jour peut favoriser une réduction de la consommation d'énergies, ce qui est économiquement etenvironnementalement avantageux, d'autant plus lorsque l'on sait que le chauffage, l'éclairage et les équipements auxiliaires représentent près de 80% de la consommation d'énergie des bâtiments scolaires au Québec (Fig 1.1) (Shiraziadle, 2017)

Figure1.1 Consommation d'énergie par utilisation finale du service d'enseignement québécois, tiré de Shiraziadle (2017).



Les fenêtres peuvent fournir une lumière du jour adéquate, mais aussi créer des problèmes d'éblouissement, de surchauffe ou de refroidissement importants. En effet, les élèves peuvent ressentir différents niveaux de confort visuel et thermique dépendamment de leur place dans la classe et du climat. C'est le cas, par exemple, des élèves installés dans le côté opposé aux fenêtres qui ne reçoivent pas suffisamment de lumière du jour ou des élèves installés à proximité des fenêtres, qui peuvent créer de micro-espaces particulièrement froids ou chaud selon la saison et qui laissent passer les courants d'air (Zomorodian et al., 2016; Zomorodian et Tahsil Doostb, 2017). Ce phénomène est particulièrement présent dans les salles de classe au Québec alors que beaucoup d'écoles ne possèdent pas un système de ventilation aux normes. Un ratio de verre trop élevé peut empirer les phénomènes de surchauffe et d'éblouissement en été et de refroidissement en hiver (Fig 1.2).

Selon la définition du confort thermique et (confort visuel) par le ministère de la Santé, Il y avait une zone de très haut inconfort qui commençait à 40 degrés Celsius. Les changements climatiques augmentent désormais la possibilité de vagues de chaleur pendant l'année scolaire. Ils ont donc un impact sur le calendrier scolaire et les annulations d'écoles en particulier début septembre ou fin juin (Boursier,2022).

Pour remédier à ces problèmes, beaucoup d'écoles optent pour des dispositifs d'ombrages intérieurs, tels que les rideaux ou les stores, mais ces dispositifs n'empêchent pas la surchauffe et réduisent considérablement l'apport en lumière naturelle, rendant nécessaire l'utilisation de la lumière artificielle en pleine journée. (Fig 1.3) La question du confort dépasse cependant les lois de la physique. Il existe aussi une part de subjectivité dont tout concepteur doit tenir compte lors de la conception de dispositifs d'ombrage.

Les dispositifs d'ombrage extérieurs peuvent être une solution appropriée pour réduire durablement le rayonnement solaire, l'éblouissement, la surchauffe et la consommation d'énergie à l'intérieur des bâtiments. Bien que des études aient prouvé les avantages de ces dispositifs, beaucoup sont conçus uniquement à des fins esthétiques sans tenir pleinement compte de leur potentiel environnemental, social et en matière de confort (Shahdan et al., 2018). Par conséquent, cette étude examine l'efficacité des dispositifs d'ombrage externes et leur incidence sur les humains et son environnement. Des panneaux d'ombrage pourraient améliorer la température de la salle de classe et leur permettre d'être utilisés pendant les étés chauds.

Figure 1.2 Un ratio de verre trop élevé entraîne l'éblouissement et la surchauffe en été et le refroidissement en hiver: (en haut) école Saint-Joseph et (en bas) école Saint-Bernardin à Montréal.

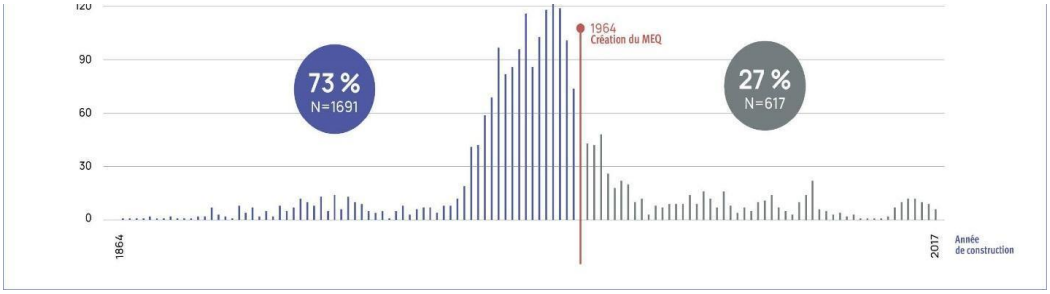
Figure 1.3 Inconfort visuel typique en classe dans une école québécoise : (en haut) grande fenestration et stores rabattables pour contrôler une lumière du jour excessive et l'éblouissement; (en bas) éblouissement et lumière du jour non uniforme, tiré de Coulombe-Morency (2019).

1.2 Les écoles du Québec

Les écoles élémentaires du Québec ont différents modèles architecturaux. Cette différence s'explique par le fait qu'il existe plusieurs vagues de construction de bâtiments scolaires. Cependant, les trois quarts des écoles primaires ont été construites avant 1964, date de création du ministère de l'Éducation, en réponse à la succession de lois pour l'instruction publique obligatoire et aux poussées démographiques (Fig 1.4) (Després et al., 2021). C'est le cas de la période d'après-guerre, particulièrement entre

les années 1950 et 1965, qui voit le taux de natalité exploser. En 1943, l'adoption de la loi pour l'éducation obligatoire de 6 à 14 ans combinée à l'explosion du taux de natalité qui s'étend jusqu'au milieu des années 1960 pousse les gouvernements à la création de nombreuses écoles, dont la construction est soutenue par le développement des transports scolaires dans les années 1950 (Després et al., 2021). Ceci explique pourquoi la majorité des constructions se situent dans cette période, tandis que le nombre de constructions est relativement stable avant et après cette période.

Figure 1.4 Répartition des bâtiments selon leur année de construction, tiré de Després et al. (2021).



Malgré, une augmentation de la population immigrante, particulièrement dans la grande région de Montréal, et la création d'un service maternelle à 4 ans, le gouvernement prévoit une diminution des effectifs, ce qui explique la préférence pour l'amélioration de l'existant par l'ajout d'espaces ou la restructuration plutôt que la construction de nouveaux bâtiments (Després et al., 2021). La démolition et la reconstruction ne sont du reste pas les seules options pour arrimer les écoles aux exigences d'une réalité éducative qui a beaucoup évolué ces dernières années, d'autant plus que nombre des bâtiments possèdent une valeur patrimoniale. Pour ces raisons, auxquelles s'ajoutent des raisons économiques, la rénovation semble être une meilleure réponse pour mettre les bâtiments aux normes actuelles (Radio-Canada, 2014). En effet, les systèmes du bâtiment peuvent généralement être réparés ou remplacés. Les centres de services scolaires opèrent d'ailleurs chaque année des rénovations mineures et

majeures, comme la réparation des toitures, le remplacement des fenêtres ou des systèmes de chauffage (Després et al., 2021).

1.3 État des écoles existantes

Selon une étude du Conseil supérieur de l'éducation, on retrouve 156 établissements scolaires privés et 491 établissements scolaires publics sur l'île de Montréal (Gaumont, 2007). Les établissements sont regroupés dans cinq centres de services scolaires, dont le Centre de services scolaire de Montréal (CSSDM). Selon un article publié en 2014, les trois quarts des écoles du CSSDM sont vétustes (Sampson, 2014). Leur état de vétusté est tellement avancé que 67 écoles nécessitent des travaux de réhabilitation majeurs (indice de vétusté entre 40 et 60) (Fig 1.5) et 27 écoles devraient être démolies (indice de vétusté supérieure à 60) (Fig 1.5) (Sampson, 2014). Parmi elles, on retrouve l'école primaire Laurier, dont l'indice de vétusté se situe à 113. Le CSSDM n'est pas le seul organisme scolaire à vivre cette problématique. 53 % des écoles du Centre de services scolaire de Marguerite-Bourgeoys (CSSMB) se trouvent aussi dans un état préoccupant et 16 écoles dépassent le seuil critique (Sampson, 2014). Sur les 2 308 écoles primaires au Québec, la grande majorité a dépassé ce que l'on nomme le premier cycle de vie et nécessitent d'importantes rénovations (Després et al., 2021).

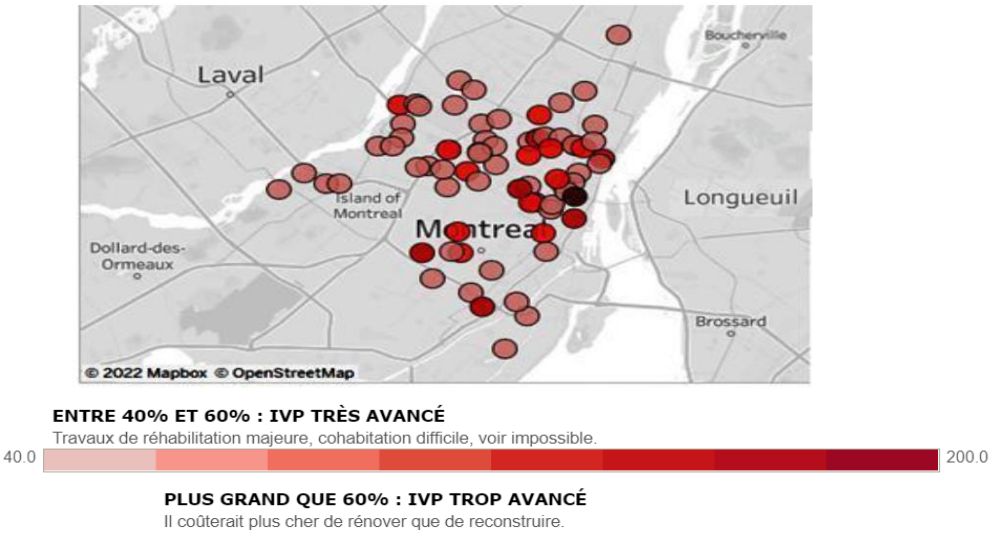
Bien que la Commission scolaire de Montréal possède un des plus vieux parcs immobiliers au Québec avec un âge moyen des bâtiments d'environ 70 ans (Radio-Canada, 2014), les plus vieilles écoles ne sont pas nécessairement celles en plus mauvais état (Sampson, 2014). Le mode constructif d'avant la Deuxième guerre mondiale, avec ses structures en béton ou en pierre, a mené à des bâtiments scolaires pérennes (Sampson, 2014). Cependant, le développement soudain du réseau scolaire lors du baby-boom (1946-1965) a nécessité une réduction de la période de construction et l'application de matériaux innovants, tandis que l'exploitation, l'entretien et la

durabilité ne faisaient pas partie des préoccupations (Sampson, 2014). En conséquence, la durée de vie utile des écoles construites après la Deuxième Guerre mondiale a été réduite, accélérant la vétusté du parc immobilier scolaire (Sampson, 2014).

1.4 Rénovation des établissements scolaires au Québec

Dans les prochaines années, un nombre considérable de bâtiments devraient être rénovés. Puisque la priorité de la CSSDM est de ne pas démolir les écoles, mais de préserver leurs bâtiments patrimoniaux (Fig 1.5), elle se retrouvera avec des travaux énormes (Radio Canada, 2014). Une meilleure connaissance du parc immobilier permettrait de mieux guider et éclairer les interventions au-delà des besoins urgents comme le mauvais état des infrastructures. À l'inverse, les investissements dans la rénovation des écoles et dans leur agrandissement, comme l'ajout d'espaces polyvalents et l'élimination des bâtiments temporaires, ont été associés à la réussite scolaire (Berry, 2002 ; Jimenez-Castellanos, 2010).

Figure 1.5 Localisation des écoles de la CSSDM par indice de vétusté (IVP). L'IVP est un indicateur permettant d'évaluer la santé globale d'un bâtiment, tiré de Radio-Canada (2014).



Les transformations sur le bâtiment scolaire viennent généralement répondre à l'augmentation de la clientèle (agrandissements et ajout de classes supplémentaires) ou à l'intégration de nouvelles fonctions (gymnase, classes de maternelle, service de garde, etc.) (Després et al., 2021). Outre l'aspect fonctionnel, le confort doit entrer en ligne de compte. Selon l'enquête Renseignez-nous!, les répondants (employés des écoles) dégageaient plusieurs sources d'inconfort, dont l'intensité du bruit à l'intérieur et à l'extérieur de la classe, la difficulté à manipuler les fenêtres pour créer une ventilation, des températures trop chaudes ou trop froides à certaines périodes de l'année, un manque de lumière naturelle, un ensoleillement trop important et l'éblouissement causé par le soleil se reflétant sur le tableau blanc interactif (Després et al., 2021).

Le verdissement des écoles est un autre enjeu de la rénovation. Parmi les nombreux bénéfices de la nature à l'école, sa présence encourage les élèves et les membres du personnel scolaire, qui passent la majeure partie de leur temps à l'école, à adopter un mode de vie sain et améliore leur bien-être. D'un point de vue environnemental, le verdissement possède aussi de nombreux avantages. Il lutte contre les îlots de chaleur par la réduction de la température environnante et les inondations par la réduction des surfaces imperméables et prévient la surchauffe et l'éblouissement dans les espaces intérieurs, lorsque la végétation est positionnée devant les ouvertures d'un bâtiment (Després et al., 2021; Gaumont, 2007). Pourtant, les espaces de végétation sont toujours aménagés comme des espaces résiduels : principalement constitués d'aires gazonnées, leur aménagement paysager est souvent conventionnel. Comme Després et al. (2021) le font remarquer, les espaces de verdure « prennent la forme d'une rangée d'arbres matures ou d'arbustes situés devant la façade principale du bâtiment, entre la cour d'école et le stationnement ou le débarcadère, le long des limites des lots voisins, ou encore entre le pourtour de la parcelle et les rues adjacentes ». Pour des raisons esthétiques, écologiques et pédagogiques, la CSSDM a intégré dans son plan d'action environnemental le verdissement des cours d'écoles et le remplacement d'une partie de l'asphalte par des végétaux (Gaumont, 2007). Depuis de nombreux projets de

verdissement ont vu le jour (Gaumont, 2007). Néanmoins, il ne faudrait pas limiter le verdissement à la cour d'école ou aux espaces résiduels. Le verdissement vertical peut générer les mêmes bénéfices que la végétalisation au sol (Fig 1.6). Malgré son potentiel, le verdissement vertical reçoit moins d'attention (Gaumont, 2007; Després et al., 2021).

Figure 1.6 : Verdissement vertical des façades à Montréal.

1.5 Objectifs et questions de recherche

Sur la base de ce qui précède, cette recherche propose trois alternatives pour l'amélioration des conditions lumineuses dans les salles de classe. En s'appuyant sur les conditions lumineuses d'une salle de classe existante située dans une école considérée comme vétuste et devant subir des rénovations majeures, la recherche tente de montrer qu'il est possible de contrôler l'éblouissement, d'uniformiser la distribution de la lumière du jour et de fournir un ombrage réglable selon les besoins et à moindre coût. Dans une perspective holistique, elle intègre des considérations esthétiques,

fonctionnelles, matérielles environnementales et sociales. Cette étude examine différents scénarios de dispositifs d'ombrage, leur impact et leur potentiel en matière de confort. L'étagère de lumière a été choisie en raison de son efficacité dans la redirection de la lumière. Ce dispositif est considéré comme l'un des meilleurs systèmes pour l'amélioration de la lumière du jour dans les écoles (Meresi, 2016). Les panneaux d'ombrage externes ont été choisis pour leur potentiel de contrôle de l'éblouissement et de la surchauffe. Quant à eux, les systèmes de verdure verticale réglables ont été choisis pour leur effets d'ombrage et leur capacité à s'adapter aux besoins des utilisateurs et aux différentes conditions météorologiques.

Cette recherche tente particulièrement de répondre aux questions suivantes :

1- Quel est l'impact de l'étagère lumineuse et de ses caractéristiques sur la distribution de la lumière du jour à l'intérieur de la salle de classe sélectionnée à Montréal?

2- Quel est l'impact de la bio-géométrie et des motifs végétaux appliqués aux panneaux d'ombrage extérieurs sur la performance de la lumière du jour à l'intérieur de la salle de classe sélectionnée à Montréal?

3- Quel est l'impact du panneau de verdure verticale extérieur et de ses caractéristiques sur la performance de la lumière du jour dans la salle de classe sélectionnée à Montréal?

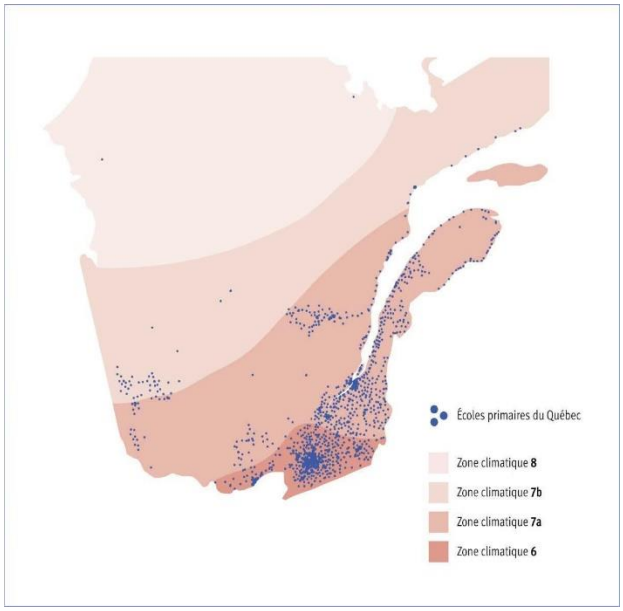
1.6 Conditions climatiques

Le climat joue un rôle essentiel dans la conception de dispositifs d'ombrage. Les architectes et les designers doivent tenir compte de toutes les conditions climatiques (pluie, nébulosité, vent, etc.) influençant l'ensoleillement et qui font, de ce fait, varier les conditions à l'intérieur du bâtiment et conséquemment la demande énergétique (Després et al., 2021). Chaque zone climatique est formée de microclimats, c'est

pourquoi une analyse approfondie des données météorologiques moyennes locales est nécessaire à la conception de dispositifs optimaux.

Després et al. (2021) divisent le Québec en quatre principales zones climatiques (8, 7b, 7a et 6). Selon cette classification, plus le chiffre est élevé, plus le climat est froid (la partie a étant plus chaude que la b). Comme on peut l'observer sur la figure 1.7, la presque totalité des écoles publiques du Québec se situent entre les zones 6 (58%) et 7a (39%) (Després et al., 2021), dont le climat est de type continental humide avec une forte variation entre l'été et l'hiver (Fig 1.7). Cependant, une même zone climatique couvre un ensemble de territoires possédant des différences en matière d'ensoleillement, de vent et de pluie. Le contexte climatique ne sera pas le même que l'on se trouve à Québec, Rimouski ou Rouyn-Noranda, même si ces villes sont classées dans la même zone climatique. Il en va de même pour deux bâtiments situés dans différentes zones d'une même ville.

Figure 1.7 : Localisation des écoles primaires du Québec selon la zone climatique (N=2308), tiré de Després et al. (2021).



1.7 Description des bâtiments scolaires types du Québec

La plupart des écoles primaires publiques du Québec possède généralement de deux à quatre étages, celles à quatre étages étant souvent les plus anciennes (Després et al., 2021). Elles possèdent un à plusieurs corps de bâtiment et se déploient selon trois principaux modes de distribution spatiale : le corridor central, distribué par un hall ou avec un corridor en boucle (Després et al., 2021). On retrouve surtout le modèle d'écoles distribuées par un hall dans les milieux villageois. Dans ce modèle dérivé des écoles de rang, les bâtiments sont sur deux niveaux et possèdent une trame d'ordonnancement et une distribution spatiale organisées autour d'un hall central qui s'étend de l'avant vers l'arrière (Fig 1.8) (Després et al., 2021). Les fenêtres donnent soit sur la rue soit sur la cour et des escaliers sont situés aux extrémités du hall (Fig 1.9) (Després et al., 2021). Le modèle à corridor central est le plus largement diffusé sur le territoire (Després et al., 2021). Dans ce modèle, les bâtiments possèdent une distribution spatiale organisées autour d'un corridor central qui se déploie parallèlement à la façade (Després et al., 2021). L'école issue de ce modèle est généralement composée de deux étages hors-sols avec un corps de bâtiment en trois travées spatiales pour les classes et un corps de bâtiments pour les fonctions spécialisées (Després et al., 2021). Le modèle à corridor en boucle, que l'on retrouve généralement dans les zones urbanisées et les banlieues, apparaît en 1959 (Després et al., 2021). Dans ce modèle, le gymnase occupe un rôle central dans la distribution spatiale (Després et al., 2021). Majoritairement sur deux niveaux, les écoles possèdent un corps bâti profond qui se déploie sur cinq travées monofonctionnelles (Després et al., 2021). La plupart des structures scolaires sont en béton, en acier ou bois. Certaines

ont une structure mixte, alors qu'une très petite partie d'entre elles sont exclusivement en maçonnerie (Desprès et al., 2021).

Figure 1.8 : Classe conventionnelle avec son aménagement d'origine, tiré de Desprès et al. (2021).

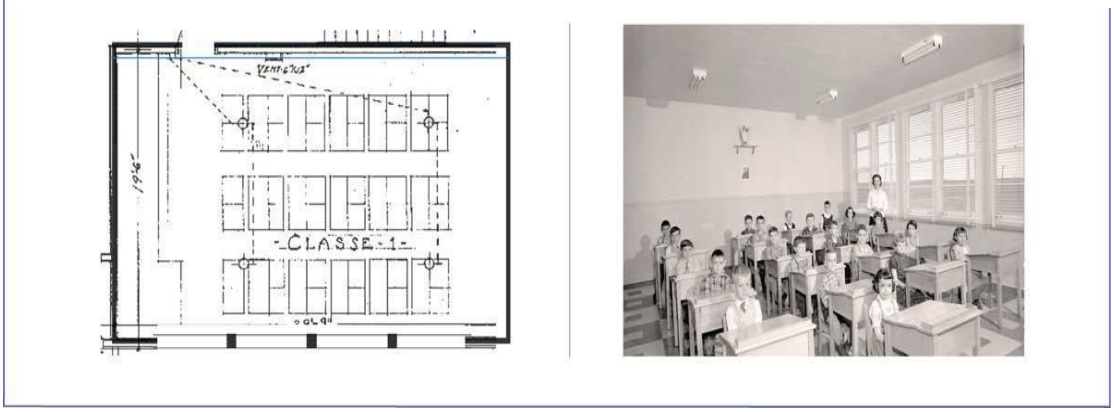
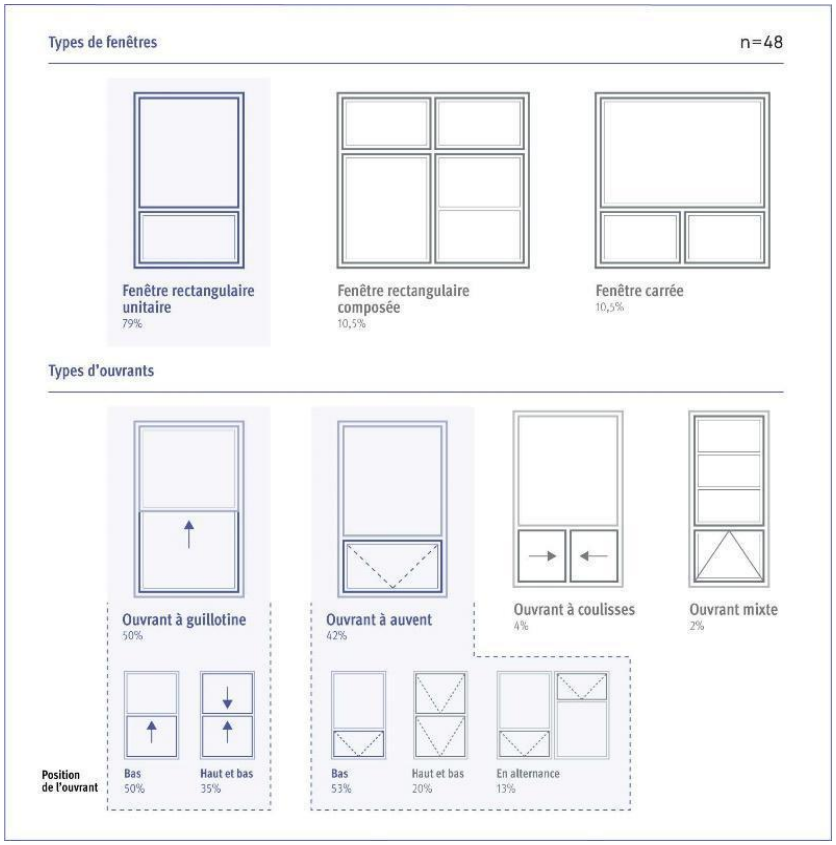


Figure 1.9 : Types de fenêtres et d'ouvrants dans les classes d'un sous-échantillon de 48 écoles construites entre 1947 et 1968, tiré de Desprès et al. (2021).



En ce qui concerne la salle de classe, leur configuration peut être répartie sous quatre modèles dominants: les traditionnelles rectangulaires, les modernes rectangulaires, carrées ou atypiques (Desprès et al., 2021). Parmi ces modèles, la salle de classe rectangulaire est la plus répandue (Desprès et al., 2021). Avant 1964, les salles de classes sont rectangulaires et les fenêtres sont disposées sur la longueur du rectangle, ce qui permet une répartition uniforme des fenêtres et des dimensions qui laissent pénétrer profondément la lumière (Desprès et al., 2021). À cette période, les règlements en vigueur imposent déjà des standards pour garantir le bien-être et l'attention des élèves : une superficie moyenne des classes d'environ 55 m2, une fenestration large et abondante pour optimiser l'éclairage naturel sans créer de l'éblouissement, des vasistas pour améliorer la ventilation naturelle et un mobilier approprié (Desprès et al., 2021). À partir de 1967, les salles de classe restent majoritairement rectangulaires, mais les fenêtres sont disposées sur la largeur du rectangle, ce qui limite la pénétration de la lumière du jour et la ventilation naturelle (Desprès et al., 2021). Dans la majorité des cas, la fenêtre rectangulaire unitaire de bois munie d'ouvrant à guillotine ou à auvent prévaut. L'étude menée par Desprès et al. (2021) montre que, dans certains cas, les travaux de transformation ou de rénovation ont réduit les performances des bâtiments. C'est le cas lorsque les fenêtres d'origine ont été remplacées par des fenêtres avec des ouvrants plus petits. (Tableau 1.1) (Desprès et al., 2021).

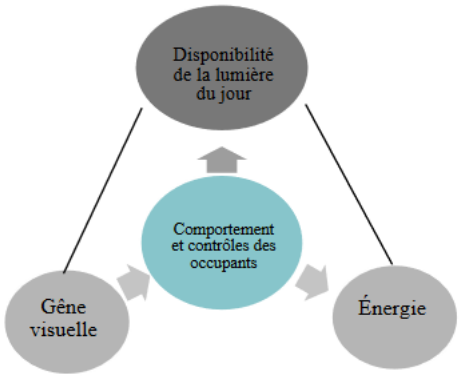
Tableau 1-1 : Caractéristiques types des salles de classe du Québec, adapté de Desprès et al. (2021).

Date de construction	**Configuration**	**Éclairage naturel**	**Ventilation naturelle**	**Fenestration**
1900, +/-1950	Rectangulaire	Suffisant	Suffisant	Sur la longueur du rectangle
1950-1964	Rectangulaire	Avec éclairage électrique	Avec ventilation mécanique	Sur la largeur du rectangle
1967-aujourd'hui	Rectangulaire (6,1 m x 9.1m)	Suffisant	Suffisant	Sur la longueur du rectangle

1.8 Lumière naturelle et lumière du jour

La lumière naturelle est la partie visible du rayonnement direct du soleil. La lumière du jour se compose de la lumière directe du soleil (lumière naturelle) et de la lumière diffuse de l'éclairage du ciel par l'atmosphère terrestre et les nuages (Le Lab Promodul, n.d.). Pour un confort optimal des usagers d'un bâtiment, la lumière du jour doit être contrôlée. De fait, la disponibilité de la lumière du jour et un apport adéquat de lumière naturelle peuvent offrir non seulement une grande satisfaction visuelle et thermique pour les occupants, mais réduit aussi les besoins énergétiques (Figure 1.10) (Reinhart, 2014). Inversement, un excès de lumière génère l'éblouissement et de l'inconfort visuel qui doit être pallié par des dispositifs d'ombrage. Selon Reinhart, la perception d'une personne de ce qui constitue un "bon éclairage" ou un "espace bien éclairé" est personnelle et évolue dans le temps. Cette perception est aussi influencée par le contexte culturel. Pour déterminer et évaluer les performances et la qualité lumineuse d'un espace, un concepteur doit s'appuyer sur des techniques de conception et d'analyse basées sur des simulations informatiques et des modélisations à l'échelle humaine ainsi que sur les appréciations des utilisateurs (Reinhart, 2014).

Figure 1.10 Relation entre disponibilité de la lumière du jour, confort visuel, comportement des occupants et consommation d'énergie, tiré de Reinhart (2014).



1.9 Confort visuel

Le confort visuel peut se définir comme la sensation de bien-être, la satisfaction, la commodité, et l'aisance induite par l'environnement lumineux. Comme l'expliquent Leclercq et al. (2007), le confort visuel est d'abord une question de perception, liée à la quantité, la qualité et la distribution de la lumière. C'est donc une condition subjective qui est liée à des paramètres physiques quantifiables. Ainsi, il est possible d'expliquer en partie l'inconfort grâce à des mesures de luminosité qui quantifient les seuils de visibilité, de sensibilité et d'adaptabilité de l'œil (Leclercq et al., 2007).

La conception d'espaces visuellement confortables doit tenir compte d'éléments physiologiques (par exemple, l'âge et l'acuité visuelle), d'éléments sociaux (par exemple, le type d'utilisateurs ou la culture) et d'éléments physiques (par exemple, l'usage du bâtiment, les activités et les tâches à effectuer) (Michaélidou, 2012). Il existe deux approches pour aborder l'éclairage naturel : l'approche quantitative ou l'approche qualitative (Sawyer, 2019; Ai, 2010). L'approche quantitative se base sur des mesures photométriques alors que l'approche qualitative se base sur des appréciations subjectives. Les concepteurs qui utilisent l'approche qualitative orientent leur étude sur l'impact de la lumière naturelle sur les occupants; ceux-ci sont plus concernés par l'aspect qualitatif de la lumière. Cette approche prête attention aux modèles de lumière dans l'espace et à leur impact sur la perception humaine. La recherche quantitative conduit à des réglementations de l'éclairage pour différents types de bâtiments ou d'activités. Cette approche se concentre généralement sur l'environnement de travail, le confort visuel et l'intensité lumineuse selon les tâches et la prévention de l'éblouissement (Ai, 2010). L'approche quantitative concerne la quantité de lumière requise alors que l'approche qualitative est principalement subjective et étudie les perceptions des utilisateurs et l'utilisation inspirante et psychologique de la lumière (Sawyer, 2019). Dans une approche quantitative, le concepteur peut jouer un rôle sur le confort visuel à travers six principaux paramètres physiques: l'éclairement et son

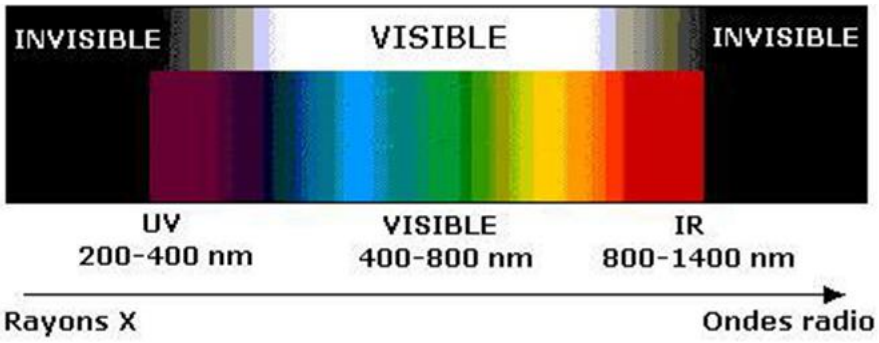
uniformité, la luminance et sa distribution, le contraste, l'éblouissement, la distribution spectrale et la possibilité de contrôle individuel (Bodart, 2002).

L'éclairement définit la quantité de lumière que reçoit une surface ou un espace (Lesage, 2013). Cette quantité est exprimée en lux. Par exemple, lors d'une journée d'été, l'éclairement est d'environ 100 000 lux alors que le niveau d'éclairement d'un ciel couvert se situe entre 5000 et 20 000 lux (Zemmouri, 2018). Le besoin en éclairement dépend des activités qui sont pratiquées. Pour les salles de classe, on recommande un éclairement minimal de 500 lux (ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports, n.d). L'être humain a besoin d'une exposition d'un minimum de 2500 lux deux heures quotidiennement pour être en santé (Zemmouri, 2018).

La luminance traduit la sensation visuelle de luminosité (Zemmouri, 2018). Elle mesure, en candela par mètre carré (cd/m2), le flux de lumière émis par un objet ou réfléchi par une surface et qui se réfléchit dans l'œil. Elle dépend donc non seulement de l'émanation de l'objet, mais aussi des caractéristiques (orientation, texture, couleur) des surfaces sur lesquelles la lumière se réfléchit (Zemmouri, 2018). Par exemple, les surfaces claires et lisses augmentent la luminance (Lesage, 2013), c'est-à-dire qu'elles augmentent la sensation de lumière. Le niveau de luminance de la lumière du jour dépend de la saison, de l'heure et des conditions météorologiques alors que le niveau de luminance d'une lumière artificielle est prédéfini. Par exemple, la luminance d'un paysage par ciel clair se situe entre 500 et 25 000 cd/m2 alors que la luminance de la lune est de 2500 cd/m2 (Zemmouri, 2018). De la luminance dépend la distinction des objets et des formes qui résulte des contrastes créés par les rapports entre les diverses luminances en présence (Zemmouri, 2018).

La distribution spectrale définit la répartition de l'intensité d'une lumière en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence des rayonnements (Figure 1.11) (Zemmouri, 2018). Le spectre lumineux visible par l'œil humain se situe entre 380nm (violet) et 780 nm (rouge). Les ultraviolets et le rayonnement infrarouge, qui se situent en dehors de cette échelle, ne peuvent pas être perçus par l'œil humain (Zemmouri, 2018). Chaque couleur est associée à une longueur d'onde et une fréquence. Le rayonnement électromagnétique d'une longueur d'onde comprise entre 436 et 495nm est perçu comme bleu, entre 495 et 566nm comme vert, entre 566 et 589nm comme jaune et entre 589 et 627nm comme orange.

Figure 1.11 Spectre solaire.tiré de Zemmouri, (2018).



La perception de teintes et de nuances dépend du niveau d'intensité de chaque longueur d'onde et de leur superposition (Houser et al., 2016). Le "rendu des couleurs d'une source" est défini comme "l'effet d'un illuminant sur l'apparence des couleurs des objets par comparaison consciente ou inconsciente avec l'apparence des couleurs sous un illuminant de référence" (traduction de l'auteure) (Hashimoto et al., 2007). Dans la lumière du jour, toutes les longueurs d'ondes sont présentes en continu, ce qui permet d'avoir un bon rendu des couleurs. La modification de la propriété de rendu des couleurs de la source lumineuse a un effet significatif sur la "clarté visuelle" ou la "sensation de contraste" des couleurs de l'objet sous éclairage (Hashimoto et al., 2007).

1.10 Éblouissement

L’éblouissement est défini comme un trouble de la vue causé par une luminance ou des contrastes de luminance excessifs. L’éblouissement peut être causé par une lumière naturelle directe, par un reflet de la lumière sur des surfaces réfléchissantes (sol, écrans d’ordinateur, bâtiments avoisinants, etc.), par une lumière artificielle trop intense ou par un contraste lumineux trop important entre lumière directe ou indirecte et les surfaces adjacentes (Michaelidou, 2012; Tuaycharoen et Trezenga, 2005). L'éblouissement est divisé en deux catégories: l'éblouissement d'incapacité et l'éblouissement d'inconfort. On parle d’éblouissement d’incapacité lorsque la lumière parasite l'œil, réduisant la visibilité et les performances visuelles, alors que l'éblouissement d'inconfort est un éblouissement qui produit une gêne sans nécessairement influencer les performances visuelles ou la visibilité (Michaelidou, 2012; Pierson et al., 2018). L'inconfort dépend de quatre facteurs communs (Tuaycharoen et Trezenga, 2005; Pierson et al., 2018):

-la luminance de la source lumineuse (intensité lumineuse)

-la taille vue de la source (angle solide de la source)

-la luminance de l'arrière-plan ou éclairement vertical au niveau des yeux (niveau d'adaptation)

-l'angle de la source par rapport à la ligne de vision (indice de position).

Le niveau d’inconfort s’accentue lorsque l'éblouissement est créé par de grandes sources, telles que des baies vitrées. En effet, plus la source est grande, plus l'inconfort est élevé. La luminance de l'arrière-plan et l'angle de la source par rapport à la ligne de vision du sujet peuvent cependant réduire l'inconfort. Un aménagement intérieur qui

tient compte de la distribution intérieure de la luminance est donc important pour prévenir les risques d'éblouissement (Tuaycharoen et Trezenga, 2005).

L'éblouissement dépend d'autres facteurs, tels que le type de tâche à effectuer (Pierson et al., 2018) ou la direction de notre attention (Tuaycharoen et Trezenga, 2005). L'architecture est remplie de questions qualitatives telles que la culture, le contexte historique et l'esthétique. Les problématiques liées à des phénomènes physiques, tels que le confort thermique, le confort visuel ou l'acoustique, relèvent à la fois du qualitatif et du quantitatif. Le confort visuel est une question de perception, ce qui rend difficile l'évaluation prédictive des différentes options. Les aspects du phénomène peuvent être mesurés, mais la perception est plus insaisissable (Schiler, 2000). Une étude menée par Tuaycharoen et Trezenga (2005) montre, par exemple, que l'éblouissement semble moins inconfortable à partir d'une fenêtre avec une vue attrayante qu'à partir d'une fenêtre avec une vue sans attrait. Comme ils l'expliquent, le confort visuel est aussi une question d'esthétique. À cet égard, les théories quantitatives et les unités de mesure jouent un rôle important pour évaluer les performances de la lumière du jour, mais l'expérimentation dans la matière reste essentielle pour la conception d'un espace confortable visuellement.

1.11 Simulation des performances de l'éclairage naturel

Cette recherche vise à démontrer la pertinence de l'installation de dispositifs d'ombrage pour des salles de classe confortables et le potentiel de la végétation dans la conception de ces dispositifs. La démarche adoptée tente de répondre à cet objectif par l'analyse des effets des dispositifs d'ombrage sur la performance de la lumière du jour et la qualité de l'éclairage à l'intérieur d'une salle de classe type au Québec. Grâce à une meilleure compréhension de l'impact des systèmes de contrôle de la lumière naturelle sur la disponibilité et l'uniformité de la lumière du jour et l'éblouissement dans les

salles de classe au Québec, la recherche tente de montrer qu'il est possible de créer des environnements propices à l'apprentissage et générateurs de bien-être à moindre coût.

La première démarche a été de délimiter géographiquement la recherche. Le choix s'est porté en toute logique à Montréal. D'une part, parce que vivant sur place, il était plus pratique d'y planifier une étude de terrain. D'autre part, Montréal fait partie des régions administratives regroupant le plus d'écoles primaires après la Montérégie, avec 282 écoles préscolaires et primaires (Després et al., 2021). Enfin, le Centre de services scolaires de Montréal possède un des parcs immobiliers les plus anciens de tout le Québec, avec près de 36% des bâtiments construits avant 1950 et près de 63% construits entre 1950 et 1980 alors que ceux construit après 1990 ne représentent que 1% du parc immobilier (Commission scolaire de Montréal, 2005). Cette recherche s'inscrit dans un contexte de rénovation majeures de bâtiments scolaires et cherche à proposer des solutions durables et à moindre coût. Le Centre de services scolaires de Montréal est le plus important du Québec. Il fait partie des cinq centres de services scolaires qui desservent l'île de Montréal avec les CSS francophones de la Pointe-de-l'Île et Marguerite-Bourgeoys et les CS anglophones Lester-B.-Pearson et English-Montréal.

La seconde étape a été de sélectionner l'école et la classe dans laquelle l'expérimentation allait s'ancrer. Le choix de sélectionner l'école primaire Laurier s'est basé sur les rénovations majeures que doit subir le bâtiment dans la période d'écriture de ce mémoire. La salle de classe n'est pas spécialement typique de l'architecture, la distribution et l'aménagement des classes au Québec, mais elle est représentative des enjeux que vivent les écoles en matière de confort visuel et de vétusté. En effet, l'état de vétusté de l'école est considéré comme plus qu'avancé, avec un indice de 113 (Radio-Canada, 2014).

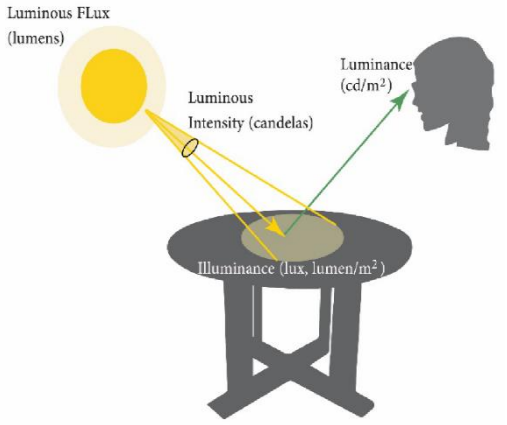
Pour la conception de dispositifs d'ombrage performants, l'étude des aspects quantitatifs et qualitatifs est importante. Pour cette raison, cette recherche s'appuie sur plusieurs mesures quantitatives de la lumière du jour. L'objectif des différentes mesures est de distinguer et définir les caractéristiques de pénétration de la lumière du jour et les conditions qu'elle génère à l'intérieur pour la création d'espaces visuellement confortables.

1.11.1 Unités de mesures quantitatives de la lumière du jour

Selon Omidfar (2015), l'environnement lumineux est décrit par deux unités d'éclairage, l'éclairement (illuminance) et la luminance. L'éclairement est la quantité de lumière reçue par unité de surface. Elle dépend de la source lumineuse, de son intensité, de sa distance et des propriétés réfléchissantes des surfaces environnantes (Zemmouri, 2018). L'éclairement est exprimé en lux (lx), ce qui correspond à un flux lumineux de 1 lumen (lm) par mètre carré. La luminance, quant à elle, est l'intensité lumineuse réfléchie par une surface par unité de surface dans une direction donnée. La luminance est mesurée en candela par mètre carré (cd/m2 ou nits). Alors que l'éclairement est utilisé pour décrire la quantité de lumière sur une surface donnée, la luminance joue un rôle clé dans la description du confort visuel associé à l'éblouissement, aux niveaux de luminosité et à la visibilité dans un espace donné (Fig 1.12).

Motamedi (2017) résume les autres unités de mesures quantitatives généralement utilisées pour mesurer l'éclairement intérieur à une période précise, dans le temps ou dans une zone particulière:

Figure 1.12 : Propriétés de la lumière : luminance et éclairement, tiré de Omidfar (2015).



• Le facteur de lumière du jour (Daylight Factor ou DF) définit le « rapport de l'éclairement intérieur d'un point donné et l'éclairement horizontal non obstrué sous un ciel couvert CIE » (traduction de l'auteure) (Motamedi, 2017). La Commission Internationale de l'Éclairage ou CIE a publié, en 1996, la norme « CIE S003 Distribution spatiale de la lumière du jour-CIE standard ciel couvert et ciel clair » qui a mené à un consensus international et à la normalisation de la luminance de différents types de ciel (CIE, n.d.).

• L'autonomie maximale de la lumière du jour (DAmax) définit le « pourcentage d'heures occupées annuellement où le niveau d'éclairement de la lumière du jour est 10 fois supérieur au niveau d'éclairage requis. L'intention est d'estimer les heures globales avec des incidents d'éblouissement potentiel » (traduction de l'auteure) (Motamedi, 2017).

• L'autonomie spatiale de la lumière du jour (spatial Daylight Autonomy ou sDA) définit le « pourcentage de la surface au sol qui reçoit suffisamment de lumière du jour pendant au moins 50 % des heures d'occupation annuelles » (traduction de l'auteure) (Motamedi, 2017).

• L’éclairement utile de la lumière du jour (Useful Daylight Illuminance ou UDI) définit le « pourcentage de la surface au sol qui respecte une plage d'éclairement de 100 et 2 000 lux pendant au moins 50 % des heures d'occupation » (traduction de l’auteure) (Motamedi, 2017).

• L’exposition annuelle au soleil (Annual Sunlight Exposure ou aSE) définit le « pourcentage de la surface au sol qui reçoit au moins 1 000 lux pendant au moins 250 heures occupées par an. L'intention est d'estimer la quantité d'espace qui reçoit un ensoleillement excessif, ce qui peut entraîner une gêne visuelle (éblouissement) » (traduction de l’auteure) (Motamedi, 2017).

1.11.2 Unités de mesures et mesures basées sur la luminance

D'autres unités de mesures sont utilisées pour mesurer la qualité de l'éclairage, l'uniformité et le problème d'éblouissement en mesurant la lumière du jour horizontale à hauteur de bureau ou en détectant les points d'éblouissement dans un angle de vue (Motamedi, 2017).

• L’indice d'éblouissement de la lumière du jour (Daylight Glare Index ou DGI) définit la magnitude de l’éblouissement selon la luminance de la source, l’angle solide de la source, la luminance de fond et l’indice de position. Selon cette mesure, l’éblouissement est classé comme imperceptible (inférieur à 18), perceptible (entre 18 et 24), gênant (entre 24 et 31) et intolérable (au-dessus de 31) (Motamedi, 2017).

La présente recherche s’appuie sur l’autonomie spatiale de la lumière du jour, l’éclairement utile de la lumière du jour, l’exposition annuelle au soleil et la probabilité d'éblouissement de la lumière du jour.

La COVID-19 a transformé les systèmes éducatifs conventionnels. L'éducation en ligne est devenue la seule option pour enseigner, suivre des cours et faire de la recherche. La

COVID-19 touche durablement les écoles du Québec. Ainsi, pendant une majeure partie de cette recherche, les écoles étaient fermées pour prévenir la propagation du virus, par conséquent, il aura fallu trouver d'autres avenues que les études sur le terrain. Dans des conditions de travail à distance et face aux difficultés rencontrées pour avoir accès à la salle de classe sélectionnée et étudier l'espace dans la matière, cette recherche s'appuie sur la technologie informatique et les interactions numériques et applique des méthodes d'exploration et d'expérimentation de modèles physiques et de simulation.

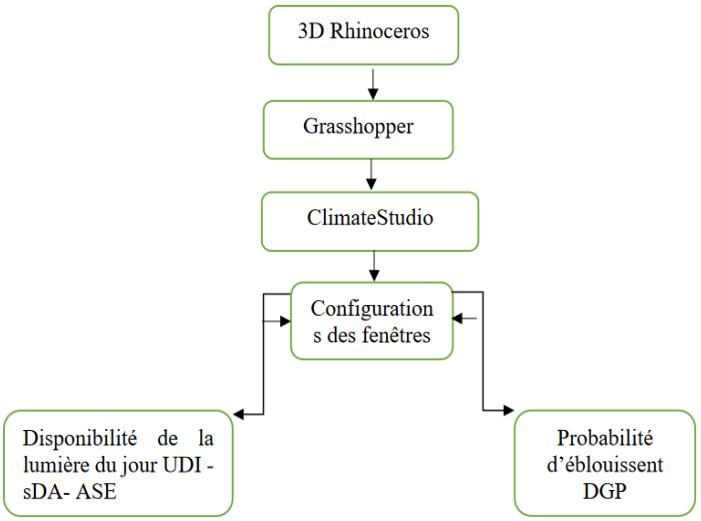
1.12 Approche informatique et simulation

Les méthodes d'analyse informatisées connectent les mondes de l'art et de la science de l'éclairage. L'analyse qualitative de la lumière du jour aborde le sujet du point de vue de l'observateur. Ce type d'analyse, parce qu'elle est influencée par la culture et les croyances, est subjective. L'analyse informatisée mélange le quantitatif et le qualitatif, le scientifique et l'artistique pour concevoir des espaces cohérents et sensibles (Demers, 1997).

Grâce à des logiciels de simulation tels que Energy Plus, Daysim, Radiance et Ecotect, il est possible de prédire avec précision les qualités lumineuses d'un espace et les potentiels problèmes d'inconfort visuel et thermique. La simulation aide également à gérer les relations complexes entre les caractéristiques de conception, le climat et les occupants d'un bâtiment (Kirimtatet al., 2016). Selon Reinhart (2012), dans le processus de conception architecturale, le logiciel de simulation de la lumière du jour est plus efficace et avancé dans les premières étapes de la conception que les autres méthodes d'analyse de la lumière du jour (Galasiu et Reinhart, 2008). Parmi les logiciels de simulation de la lumière du jour les plus populaires chez les chercheurs, on retrouve Radiance, qui fournit une géométrie d'espace illimitée et une variété de matériaux appréciable (Ward, 1994; Reinhart, 2012)

L’espace de la salle de classe de l’école primaire Laurier à Montréal (45,5 degrés nord, 73,6 degrés ouest) a été simulé pour mesurer les performances de la lumière du jour. Les modèles paramétriques des dispositifs d'ombrage ont été conçus à l'aide de Grasshopper, un plug-in pour le logiciel de modélisation Rhinoceros. Les simulations ont été réalisées à l'aide de Climate Studio, un plug-in pour 3D Rhinoceros. "Climate Studio" construit sur EnergyPlus est une nouvelle technologie de traçage basée sur RADIANCE. "Climate Studio" est le logiciel d'analyse de performance environnementale le plus rapide et le plus précis pour le secteur de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction (AEC). Son processus de simulation aide les concepteurs et les consultants à optimiser les bâtiments en matière d’énergie, de lumière, d’éclairage, de confort visuel et thermique et d’autres mesures en lien avec la santé et le bien-être des occupants (Solemma, LLC ,2022) De son côté, Grasshopper est connecté au composant matériel de la bibliothèque Climate Studio qui offre différentes options de matériaux et de finis (transparence, réflexion, etc.). La simulation s’appuie sur l’entrée de données météorologiques, l’emplacement des capteurs de lumière du jour, la configuration des fenêtres et des mesures de disponibilité de la lumière du jour avec des paramètres de contrôle de l'éblouissement. Elle s’appuie sur l’analyse développée par Reinhart qui est résumée dans la figure 1.13.

Figure 1.13Étapes d'analyse et de simulation



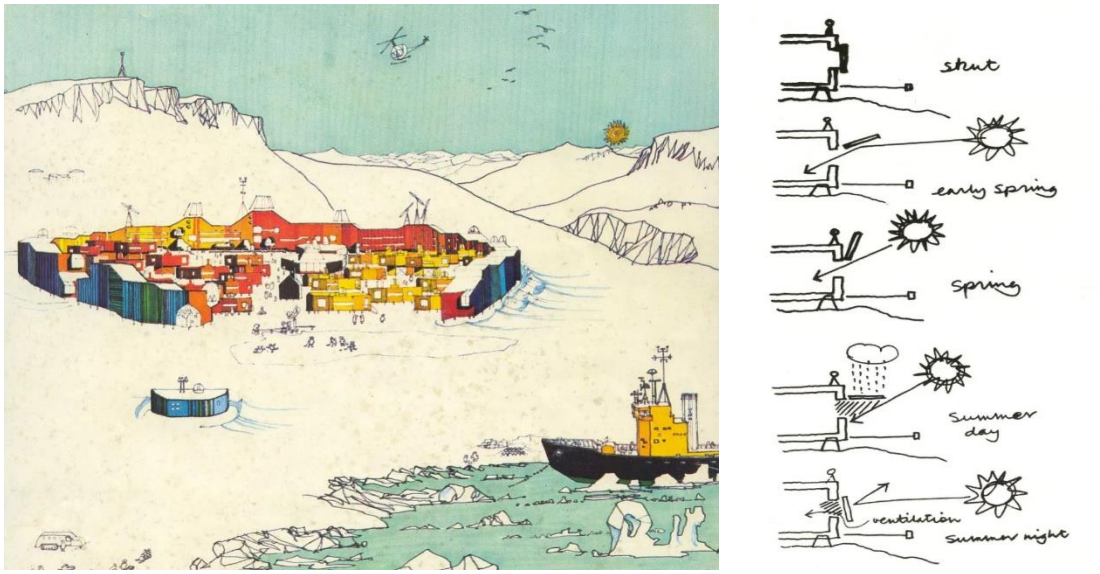
1.12.1 Configurations des fenêtres

La fenêtre est un élément architectural incontournable, qui permet à la lumière naturelle et à l'air de pénétrer à l'intérieur des bâtiments tout en reliant les occupants à l'extérieur. Selon Badeche et Bouchahm (2020), des recherches ont montré l'importance de tenir compte du climat dans le choix des caractéristiques de fenêtres. En effet, les dimensions, les matériaux, les ouvrants, l'aménagement, le rapport fenêtre/mur sont une réponse aux conditions climatiques et ont des effets sur la demande énergétique totale (Badeche et Bouchahm, 2020). La configuration et les orientations de la fenêtre influencent également la distribution de la lumière du jour (Zomorodian et al., 2016).

Erskine était un architecte britannique qui a étudié la fonction des bâtiments en tant qu'abri climatique pour réduire les déperditions de chaleur, en offrant plus de lumière solaire aux conditions extrêmes et froides. Ses œuvres se situent dans les régions arctiques et subarctiques comme la Suède et le Canada. Sa conception évite l'accumulation de neige sur les bâtiments par les techniques de construction préfabriquées modulaires ; « formes aérodynamiques » (Luciani et Maudsley.,2021). En 1970, il a proposé ses idées pour la nouvelle ville de Resolute qui est située sur l'île de Cornwallis au Canada (Fig.1.a). Erskine « combine ses compétences en design urbain en climat froid avec la possibilité d'expérimenter une planification physique et sociale qui permettrait l'intégration ethnique des communautés arctiques » (traduction de l'auteure) (Resolute Bay,2021). Il (1968) a soutenu que les maisons et les villes du nord "devraient s'ouvrir comme des fleurs au soleil du printemps et de l'été mais, aussi comme des fleurs, tourner le dos à l'ombre et aux vents froids du nord, offrant la chaleur du soleil et une protection contre le vent sur les terrasses, jardins et rues » (traduction de l'auteure). « Ses croquis (Fig.1.14) montrent des communautés sur des pentes exposées au sud entourées de périmètres murés des bâtiments les plus élevés, offrant une protection contre le vent et le blizzard, tout en s'ouvrant au soleil » (traduction de l'auteure) (Luciani et Maudsley., 2021). Il considérait les murs d'enceinte et les pentes

sud comme une source d'économie de chaleur en hiver et d'ombre en été. Il oppose cette orientation aux fenêtres orientées au nord qui « induisent du froid en hiver et de la chaleur au soleil de minuit » (Luciani et Maudsley., 2021).

Figure 1.14 Nouvelle ville de Resolute Bay (à gauche) et les dessins détaillés d'une fenêtre nordique adaptée aux variations saisonnières de la lumière dans ces régions (à droite), senses atlas (2021). [Https://www.sensesatlas.com/territory/resolute-bay-ralph-erskine-and-the-arctic-utopia].

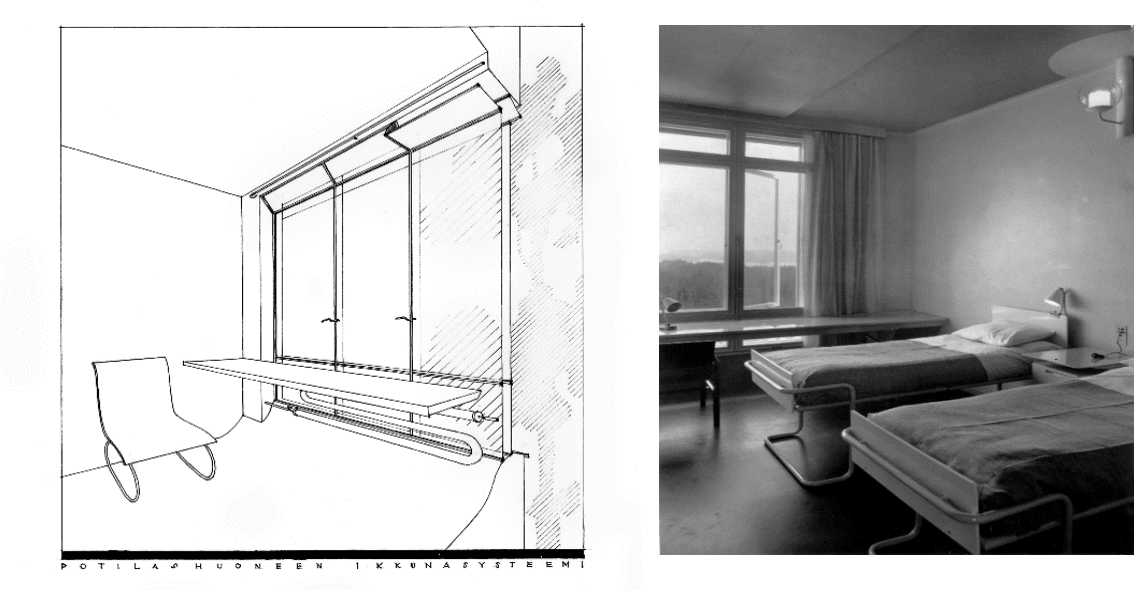


Entre (1928-1933), Alvar Aalto à l'hôpital Paimio Sanatorium, en Finlande, a conçu un type de fenêtre qui convient aux hivers rigoureux de la Finlande. Cette fenêtre contient un assemblage de deux couches encadrées individuellement séparées pour fournir la pénétration la plus profonde possible et un bénéfice maximal des quantités de lumière du jour pour le patient. De plus, à la base de la fenêtre, le plancher a été recourbé pour recouvrir le dosseret ainsi obtenu afin d'offrir une meilleure réflexion de la lumière et un nettoyage facile. (Fig 1.15) (Woodman et al., 2016 et Heikinheimo, 2018).

Selon les mots d'Aalto, la fenêtre de la chambre des patients avait, entre autres, les caractéristiques suivantes : « Le soleil du matin sur les lits des patients ; soleil de l'après-midi sur la partie avant de la pièce, devant la fenêtre. Fenêtres en bois à double

vitrage avec cadres en L, avec ventilation permanente par des vitres à ouvertures verticales. L'exposition au soleil peut être réglée à l'aide de stores extérieurs. » (traduction de l'auteure)(Heikinheimo, 2018). Malgré la présence du dosseret et celle d'un bureau intégré en contreplaqué, la fenêtre s'étendait suffisamment bas pour permettre aux patients de voir le terrain environnant lorsqu'ils étaient allongés dans leur lit (Heikinheimo, 2018).

Figure 1.15 L'image de la conception asymétrique de la phase de compétition de la première version de la fenêtre de la chambre du patient (à gauche). Une étape plus tard dans le processus de conception, le dessin standard montre que le bord inférieur de la section de fenêtre était de niveau. L'architecte a également modifié la forme du plancher afin qu'il se courbe vers le haut près de la fenêtre. (à droite), tiré de Heikinheimo (2018).



1.12.2 Disponibilité de la lumière du jour

Pour évaluer la suffisance de la lumière du jour dans un environnement d'apprentissage, l'éclairement utile de la lumière du jour (UDI), l'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) et l'exposition annuelle au soleil (ASE) sont appliquées. Ces mesures évaluent les distributions d'éclairement intérieur dues à la lumière du jour, soit dans certaines conditions, soit tout au long de l'année (Solemma, LLC ,2022)

L’éclairement utile de la lumière du jour (UDI) analyse la disponibilité de la lumière du jour en déterminant « l'utilisation de l'espace (occupation), les heures occupées (dans cette recherche 8h00 à 18h00) et la quantité minimale de lumière du jour reçue pour la salle de classe dans le plan de travail (dans cette recherche, 500 lux) ; ensuite, il étudie et calcule le pourcentage de lumière du jour perçu dans les capteurs intégrés dans le plan de travail au cours de l'année » (traduction de l’auteure) (Solemma, LLC ,2022) .

L’éclairement utile de la lumière du jour (UDI) analyse la disponibilité de la lumière du jour en déterminant « l'utilisation de l'espace (occupation), les heures occupées [dans cet article, de 8h00 à 18h00] et la quantité minimale de lumière du jour reçue pour la salle de classe dans le plan de travail [dans cet article, 500 lux] ; ensuite, il étudie et calcule le pourcentage de lumière du jour perçu dans les capteurs intégrés dans le plan de travail au cours de l'année » (traduction de l’auteure(Solemma, LLC ,2022) .

L’autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) établit le « pourcentage de la surface au sol régulièrement occupée qui est « éclairée par le jour ». Dans ce contexte, les emplacements « éclairés par le jour » sont ceux qui répondent aux niveaux d'éclairement cibles (300 lux) et utilisent la lumière du jour seule pendant au moins 50 % des heures d'occupation [dans cet article, de 8 h 00 à 18 h 00]. On dit que ces emplacements sont à 50 % autonomes à la lumière du jour. Les calculs sDA sont basés sur des simulations annuelles basées sur le climat de milliers de conditions différentes du ciel tout au long de l'année » (traduction de l’auteure) (Solemma, LLC ,2022).

L’exposition annuelle à la lumière du soleil (ASE) établit le « pourcentage de la surface au sol régulièrement occupée qui est « suréclairée » résultant de l’observation d’une source potentielle d'inconfort visuel : la lumière directe du soleil. Dans ce contexte, les emplacements « suréclairés » sont ceux qui reçoivent la lumière directe du soleil (> 1 000 lux directement du disque solaire) pendant plus de 250 heures d'occupation. Il

convient de souligner que l'ASE est calculée pour le système d'ombrage dynamique entièrement ouvert toute l'année, alors que sDA prend en compte le fonctionnement de l'ombrage dynamique » (traduction de l'auteure) (Solemma, LLC ,2022).

1.12.3 Analyse de l'éblouissement

Le calcul de l'éblouissement est basé sur la probabilité d'éblouissement de la lumière du jour (DGP) expliquée précédemment. La DGP prédit la probabilité qu'un observateur ressente un éblouissement inconfortable à une certaine position ou orientation. Pour les simulations DPG annuelles, ClimateStudio s'appuie sur la partie d'éclairement vertical de la formule DGP, en plus de mesurer le contraste du disque solaire. La métrique est généralement calculée à l'aide d'un rendu fisheye avec un angle d'ouverture de 180 degrés. DGP peut avoir des valeurs comprises entre 0 % et 100 %, qui sont divisées en quatre catégories : éblouissement imperceptible, perceptible, gênant et inconfortable (Fig 1.16) (Solemma, LLC ,2022) Le calcul de la DPG se fait en fonction des entrées, des résultats de simulation et des informations météorologiques moyennes annuelles, telles que l'état du ciel au cours de l'année sur la base de ClimateStudio for 3D.

Figure 1.16 Classement de l'éblouissement d'après calcul de la DGP dans ClimateStudio —Solemma adapté de (Solemma, LLC ,2022) https://www.solemma.com/climatestudio

CHAPITRE II

LUMIERE NATURELLE ET DISPOSITIFS D'OMBRAGE CONVENTIONNELS

2.1 Lumière naturelle et bien-être

La lumière naturelle est essentielle à la santé et au bien-être des humains. Elle satisfait des besoins biologiques et a des effets sur la santé mentale et physique (Edwards et Torcellini, 2002). En effet, l'œil, en captant la lumière, transmet des informations à l'hypothalamus qui régule de nombreuses fonctions de l'organisme. La fonction de l'hypothalamus est de maintenir le corps dans un état stable. Pour ce faire, il effectue des tâches de coordination et de rééquilibrage en influençant le système nerveux autonome et le système endocrinien (Edwards et Torcellini, 2002). Le système nerveux contrôle des fonctions telles que le rythme cardiaque, la tension artérielle ou la température corporelle alors que le système endocrinien régule des fonctions telles que le sommeil, la croissance musculaire, l'humeur, l'attention, l'apprentissage et la motivation. De plus, la lumière naturelle favorise la synthèse de la vitamine D qui participe au bon fonctionnement des systèmes immunitaire, musculaire et osseux (Gronfier, s.d.; Zemmouri, 2018). Malgré ses bienfaits, l'exposition à la lumière directe du soleil doit être contrôlée (Tregenza et Wilson, 2013). En effet, même si elle est nécessaire au bon fonctionnement du corps humain, une exposition excessive ou insuffisante peut être néfaste et générer des troubles de la santé et du comportement. L'excès ou le manque de lumière naturelle ou un éclairage artificiel inadapté créent un inconfort qui épuise les ressources psychologiques et mentales, provoquant de la

fatigue, une diminution des performances, une augmentation du stress et du besoin de récupération (Steidle et al., 2014).

La lumière naturelle reste non seulement la plus adaptée aux fonctions biologiques du corps humain, mais aussi à la sensibilité visuelle de l'œil (Gronfier, s.d.). La lumière blanche émise par le soleil regroupe l'ensemble des longueurs d'ondes du spectre visible. Le spectre visible est formé du mélange des couleurs de l'arc-en-ciel. Lorsque la lumière est émise par le soleil, le spectre est complet même si l'intensité et l'équilibre des couleurs changent selon les heures de la journée, la saison et la situation atmosphérique. Par exemple, le spectre visible se déplace du bleu vers le rouge au fur et à mesure que la journée avance. Mais, même lorsqu'elle a une plus grande proportion de bleu ou de rouge, la lumière naturelle contient encore toutes les couleurs et le spectre reste équilibré et relativement uniforme. L'œil, qui perçoit les changements de tons, envoie des informations à l'hypothalamus qui va, en conséquence, synchroniser toutes les horloges internes (Edwards et Torcellini, 2002).

De son côté, le spectre visible de la lumière blanche émise par une lampe dépend de la technologie d'éclairage, créant des pics importants dans certaines couleurs alors que d'autres ne sont pas ou peu présentes. Les lampes ont ainsi une température de couleur qui est soit chaude soit froide et reste toujours la même quel que soit le moment de la journée, ce qui ne tient pas compte des cycles biologiques et peut devenir toxique pour l'œil. Par exemple, une exposition prolongée à une lumière artificielle froide (avec une forte concentration de bleu) peut dérégler la production de mélatonine.

La lumière naturelle est non seulement souhaitable en raison de ses qualités spectrales, mais aussi en raison de l'agrément que procure les vues qui lui sont associées (Zemmouri, 2018). Comme le soulignent Edwards et Torcellini (2002), elle répond aussi à un besoin psychologique de contact avec l'extérieur. Comme la lumière naturelle est la source de lumière de référence de l'être humain, elle est naturellement

préférée à la lumière artificielle (Beute et de Kort, 2014). Elle conforte psychologiquement et émotionnellement, améliorant ainsi l'humeur et la vitalité (Steidle et al., 2014).

2.1.1 Rythmes circadiens

Comme on a pu le voir, la lumière qui pénètre les yeux ne sert pas seulement à la vision (Zemmouri, 2018). Elle satisfait non seulement des besoins physiques et psychologiques, mais synchronise aussi l'horloge biologique interne contrôlée par les noyaux suprachiasmatiques de l'hypothalamus, situés au croisement de deux nerfs optiques (Louiset, 2009; Touitou, 2016). Cette horloge biologique régule les activités physiologiques et comportementales qui suivent un rythme circadien (environ 24 heures), comme l'alternance veille/sommeil (Louiset, 2009). La lumière, captée par la rétine grâce à la mélanopsine, est transformée en influx nerveux qui sont transmis aux noyaux suprachiasmatiques par le tractus rétino-hypothalamique pour aboutir à la glande pinéale ou épiphyse (Touitou, 2016; Zemmouri, 2018; Hébert, 2007) et au cortex surrénalien (Louiset, 2009). L'influx nerveux, en indiquant le niveau d'intensité et le spectre lumineux ambiants, va permettre l'ajustement de l'horloge interne primaire à l'environnement (Tregenza et Wilson, 2011; Zemmouri, 2018). Cette synchronisation de l'horloge interne aux changements lumineux crée des pics hormonaux qui vont répondre aux besoins des activités humaines tout au long de la journée (Zemmouri, 2018). C'est le cas de la mélatonine qui est inhibée ou activée par l'épiphyse, dépendamment de l'information lumineuse transmise. La mélatonine est une hormone qui affecte le sommeil, l'humeur, la température corporelle, l'agilité mentale, l'appétit ou le développement tumoral (Tregenza et Wilson, 2011; Touitou, 2016). La sécrétion de cortisol à partir de la corticosurrénale suit de près la production de mélatonine (Tregenza et Wilson, 2011). Le cortisol aide le corps à équilibrer les taux de glucides, de protéines et de graisses et affecte le développement des globules blancs, l'activité du système immunitaire et nerveux (Tregenza et Wilson, 2011;

Louiset, 2009). D'autres oscillateurs circadiens, situés cette fois-ci dans le foie, les poumons ou encore le cœur, se synchronisent au rythme de l'horloge interne primaire pour correspondre aux cycles de la journée.

2.1.2 Trouble affectif saisonnier

Le « trouble affectif saisonnier » est un trouble de l'humeur cyclique associé à l'automne et à l'hiver qui disparaît au printemps et à l'été (Hébert, 2007). Ce trouble présente des symptômes similaires à d'autres types de dépressions, tels que le sommeil excessif ou l'insomnie, les changements d'humeur, le manque d'énergie, des problèmes de concentration et la perte d'appétit ou la suralimentation (Hébert, 2007). Ce type de dépression est attribué à une variété d'événements, mais tout particulièrement à une désynchronisation de l'horloge interne due au manque de lumière pendant les saisons froides (Edwards et al., 2002; Zemmouri, 2018). Pendant ces saisons, les jours sont les plus courts et les plus froids, ce qui pousse les individus à être plus casaniers (Zemmouri, 2018; Hébert, 2007). Les individus s'exposent alors moins à la lumière du jour (Hébert, 2007). Le manque de lumière naturelle engendrerait un dérèglement de l'horloge interne, ce qui se traduirait par un décalage du cycle de production de mélatonine (Hébert, 2007; Michaelidou, 2012) et de cortisol. La médecine propose la luminothérapie, particulièrement en matinée, pour favoriser une production de cortisol en adéquation avec l'environnement, pour resynchroniser l'horloge interne et, ainsi, traiter les individus atteints du trouble affectif saisonnier (Hébert, 2007).

La désynchronisation de l'horloge interne peut venir d'autres sources que le manque de lumière saisonnier. Elle peut aussi être la conséquence du décalage horaire, du travail posté ou de nuit, de l'inefficacité ou du dysfonctionnement de certains synchroniseurs (cécité, vieillissement, maladies psychiatriques), du dysfonctionnement de l'horloge elle-même (cancers hormonaux dépendants, dépression, etc.), d'un désordre du sommeil, de la consommation de substances comme les drogues, l'alcool ou les médicaments ou une exposition prolongée à la lumière artificielle pendant la nuit

(Touitou, 2016). La désynchronisation de l'horloge interne, c'est-à-dire lorsque l'heure biologique n'est plus en phase avec l'heure astronomique, déclenche toute une série de troubles qui vont des troubles de l'humeur, du sommeil, du comportement, métaboliques et neurocognitifs, jusqu'au développement de cancers (Touitou, 2016). Touitou donne l'exemple de l'utilisation généralisée des écrans par les adolescents. Cette exposition à la lumière artificielle bien après le coucher du soleil retarde la phase d'endormissement et a des répercussions sur la qualité de leur sommeil. La dette de sommeil génère, par effet d'entraînement, de nombreux troubles cités plus haut, mais aussi des troubles de la mémoire à long terme puisque le cerveau endormi offre les conditions optimales pour la consolidation de la mémoire (Rasch et Born, 2013).

2.1.3 Lumière du jour et stress

Le cortisol est la principale hormone produite par l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien (HPA) (Smyth et al., 1997). La sécrétion de cette hormone, qui est essentielle aux activités diurnes, dépend de l'intensité lumineuse et de la qualité spectrale de la lumière. Lorsque les cycles de la lumière du jour sont respectés, les niveaux de cortisol communs atteignent un pic au petit matin pour diminuer graduellement au cours de la journée (Smyth et al., 1997), inversement aux niveaux de mélatonine. Lorsque l'organisme est confronté à un agent stressant, la production de cortisol et d'adrénaline augmente pour activer le système nerveux et mobiliser l'énergie nécessaire pour répondre à la situation (Smyth et al., 1997; Plusquellec et al., 2015). Alors que le cortisol peut être une alliée pour le bon fonctionnement du corps et dans la réponse à un danger imminent, la production excessive et répétée, comme dans le cas d'un stress chronique, provoque de nombreux troubles de la santé physique (respiratoires, inflammatoires, diabète, obésité, trouble de la mémoire et de la croissance, etc.) et mentale (dépression, insomnie, anxiété, etc.) (Smyth et al., 1997; Louiset, 2009).

La surproduction de cortisol est particulièrement problématique pour les enfants, les jeunes adolescents et les jeunes adultes. Comme l'expliquent Plusquellec et al. (2015), le cortisol se fixe à des récepteurs spécifiques, en particulier dans le cortex préfrontal, qui sont plus nombreux à ce stade de développement. Des taux élevés de cortisol dans ces tranches d'âges jouent un rôle important dans le développement de la dépression à moyen et long terme (Plusquellec et al., 2015). Selon une étude menée en Suède auprès de 90 élèves du primaire, un taux de cortisol inadéquat peut aussi entraîner des comportements d'opposition, de l'agitation et réduire la socialisation (Michaelidou, 2012; Edwards et Torcellini, 2002). En outre, le stress persistant, parce qu'il affecte la sécrétion de cortisol, impacte négativement la croissance (Edwards et Torcellini, 2002; Michaelidou, 2012), l'estime de soi et la capacité de mémorialisation (Plusquellec et al., 2015). Des recherches menées dans les écoles canadiennes révèlent que des enfants exposés, à l'intérieur, à la lumière naturelle ou à une lumière fluorescente à spectre complet développent moins de caries et de myopie (Edwards et Torcellini, 2002). Ces recherches montrent aussi une augmentation des capacités d'apprentissage, de l'assiduité, une diminution du stress et de l'absentéisme chez les élèves et les enseignants, une amélioration des résultats scolaires par rapport aux écoles avec éclairage artificiel traditionnel (Edwards et Torcellini, 2002). Comme les enfants passent beaucoup de temps à l'école, des bâtiments qui laissent entrer la lumière naturelle sont importants, surtout dans une ville comme Montréal où le climat ne permet pas toujours d'aller dehors.

2.1.4 Effets de la lumière en situation d'apprentissage scolaire

Comme il a été souligné plus haut, l'exposition à la lumière naturelle aide, entre autres, à fixer la vitamine D, à traiter les troubles affectifs saisonniers et à réguler les rythmes circadiens. Elle a aussi tendance à améliorer l'humeur et à réduire le stress (Heschong Mahone group, 1999). Comme tout être humain, elle est donc bénéfique pour la santé et le bien-être des élèves. Des recherches plus spécifiques ont été menées pour mesurer

l'importance de la lumière naturelle sur leur réussite scolaire. Nicklas et Bailey (1996) ont, par exemple, comparé sur plusieurs années les performances d'élèves exposés à la lumière naturelle en classe à celles d'élèves dont la classe est majoritairement éclairée artificiellement. Pour ce faire, ils ont sélectionné 24 écoles du primaire et du secondaire du comté de Johnston en Caroline du Nord. L'échantillon comprenait d'anciens et de nouveaux bâtiments, dont trois ont été conçus par leur cabinet d'architecture Innovative Design, dans une optique d'optimisation de la lumière naturelle. Les résultats de cette étude montrent qu'un bâtiment récent n'implique pas nécessairement une amélioration des performances. Par contre, l'exposition à une lumière naturelle optimale et contrôlée permet une amélioration notable des performances des élèves (Nicklas et Bailey, 1996). En 1998, le groupe Heschong Mahone a mené une étude similaire auprès de 21 000 élèves, répartis sur 2000 classes situées dans trois districts scolaires distincts aux États-Unis. Pour classer les conditions d'éclairage, ils ont examiné les plans architecturaux, les photographies aériennes et les dossiers d'entretien des bâtiments et visité un échantillon d'écoles dans chaque district. L'étude montre que les meilleurs résultats aux tests sont obtenus par les élèves les plus exposés à la lumière du jour. Elle montre également que le système qui permet à la lumière naturelle de pénétrer dans les espaces intérieurs est important. En effet, chaque système permet un contrôle différent de la lumière naturelle directe et propose une vue, une communication entre extérieur et intérieur et une ventilation qui lui est propre. Comme ils l'expliquent, les systèmes qui favorisent un niveau d'éclairement élevé permettent une meilleure visibilité, ce qui améliore la vitesse d'exécution et de précision des tâches. De plus, comparé à la lumière artificielle, la lumière naturelle a tendance à éclairer en continuité, uniformément et dans toutes les directions, tout en offrant un meilleur rendu des couleurs (Heschong Mahone group, 1999; Lesage, 2013). Ces caractéristiques favorisent une meilleure perception des objets en trois dimensions, une meilleure attention et coopération, tout en réduisant les maux de tête et les douleurs oculaires des élèves (Heschong Mahone group, 1999). Sur le long terme, l'exposition à la lumière naturelle dans et en dehors des classes a une incidence sur la croissance et les absences des élèves (Heschong

Mahone group, 1999). Plus récemment, Maesano et Annesi-Maesano (2013) ont analysé les données recueillies par l'observatoire Sinphonie (The Schools Indoor Pollution and Health: Observatory Network in Europe) lors d'une étude menée entre 2011 et 2012 dans 23 pays européens pour évaluer les effets de la pollution de l'air dans les écoles sur la santé des usagers. L'étude couvrait 148 salles de classes dans 54 écoles et évaluait 2837 élèves âgés de 8 à 12 ans. Parmi les données, Sinphonie a relevé des caractéristiques liées aux conditions d'éclairage: l'étage, la hauteur des plafonds, la surface au sol, le type d'éclairage, la surface des fenêtres, le type de fenêtre, d'ouverture, de vitrage, l'orientation, la vue et le système d'ombrage. La recherche a montré que le bon fonctionnement des rythmes circadiens libère à bon escient des hormones responsables de la mémoire. La lumière est donc un facteur positif dans le processus d'apprentissage des élèves. Lorsque l'horloge interne est synchrone, le corps humain connaît un pic d'hormones, dont le cortisol, entre dix heures et midi, favorisant un traitement de l'information sur le court terme (Baker et Steemers, 2002). De 18h à minuit, les hormones libérées, telle que la mélatonine, affectent la mémoire à long terme, permettant la consolidation des apprentissages de la journée avec les devoirs scolaires (Baker et Steemers, 2002).

2.2 Dispositifs d'ombrage

Cette partie présente des dispositifs d'ombrage usuels, en tant que composantes intégrées au bâtiment, et leurs caractéristiques. Même si leur performance est difficilement quantifiable, ces systèmes offrent de nombreux avantages. Dans la mesure où aux facteurs objectifs s'ajoutent des facteurs subjectifs, tels que les préférences des occupants et le contrôle individuel, il existe toujours un doute ou une imprécision sur leur performance (O'Brien et al., 2013; Al-Masrani et al., 2018; Yao, 2014).

2.2.1 Classification des dispositifs d'ombrage

Les dispositifs d'ombrage ont pour objectif de créer un environnement sain dans les espaces intérieurs et d'améliorer les performances du bâtiment (Al-Masrani et al., 2018). Leur conception doit tenir compte d'une multitude d'aspects, tels que leur coût, leur esthétique, leur entretien, les attentes des usagers et les exigences en termes de lumière et thermiques (Al-Masrani et al., 2018). Aujourd'hui, il existe une grande variété de dispositifs. Ils peuvent être internes, externes ou intermédiaires (Grynning et al., 2017). Ils peuvent également être fixes ou mobiles (Bellia et al., 2014; Kirimtat et al., 2016). Les dispositifs mobiles permettent soit un contrôle manuel par l'usager soit un contrôle automatique. Les dispositifs mobiles automatiques adoptent des technologies actives et l'automatisation, telles que les systèmes dynamiques intelligents (Al-Masrani et al., 2018; Bellia et al., 2014). Certains chercheurs classent aussi les dispositifs d'ombrage en systèmes passifs (sans énergie requise), actifs (qui reposent sur l'énergie active) et hybrides. Les systèmes hybrides sont dérivés d'approches biomimétiques. Ils s'inspirent des systèmes biologiques naturels et s'appuient sur les propriétés intrinsèques de matériaux intelligents (Al-Masrani et al., 2018; O'Brien et al., 2013).

Les systèmes internes permettent un contrôle individuel de l'éblouissement tout en maintenant une vue sur l'extérieur. Ils assurent l'intimité et régulent la transmission de la lumière visible à travers le vitrage (Grynning et al., 2017). Néanmoins, ils sont moins efficaces que les dispositifs d'ombrage externes (Grynning et al., 2017; kim et al., 2012). En effet, les dispositifs intérieurs absorbent la chaleur solaire et la répandent à l'intérieur. Cette chaleur, absorbée par les matériaux à l'intérieur, est convertie en rayonnement thermique puis libérée sous forme de rayonnement à ondes longues qui reste confiné dans l'espace, puisque le vitrage bloque les rayonnements à ondes longues. La chaleur ainsi emprisonnée entraîne une augmentation des charges de refroidissement pendant la période de surchauffe (kim et al., 2012). Par contre, si les

dispositifs d'ombrage sont montés à l'extérieur, ils peuvent bloquer efficacement le bruit (Carletti et al., 2014) et le rayonnement solaire avant qu'il ne pénètre à travers le vitrage. Leur performance augmente quand ces systèmes peuvent être ajustés selon l'altitude solaire (kim et al., 2012). Ce genre de dispositifs est justifié, particulièrement dans les régions climatiques chaudes. Cependant, comme ils se situent en extérieur, ils sont directement exposés aux éléments, de sorte que leur installation peut être difficile dans des zones venteuses ou sur des immeubles très élevés (Grynning et al., 2017). Grynning et al. (2017) intègrent aussi le vitrage intelligent qu'ils considèrent comme une catégorie intermédiaire, entre intérieur et extérieur. Ce type de vitrage comprend des dispositifs thermochromiques, photochromiques ou encore électrochromiques (Grynning et al., 2017). Pour eux, les dispositifs intermédiaires sont plus durables que les dispositifs externes, car leur position les protège des intempéries. Cependant, leur installation et leur accès limité entraînent un entretien plus lourd des systèmes (Grynning et al., 2017). Bien que les systèmes d'ombrage externes soient plus difficiles à intégrer architecturalement, et en particulier dans les climats rigoureux comme le Québec, ils restent les plus performants pour réduire la surchauffe, contrôler l'éblouissement et créer un confort visuel à l'intérieur du bâtiment.

2.2.1.1 Dispositif d'ombrage fixe

Les principales fonctions des dispositifs d'ombrage fixes sont de contrôler la lumière du jour, de réduire l'éblouissement, d'améliorer les conditions visuelles et de réduire la charge de refroidissement (Al-Masrani et al., 2018; Oghazian et al., 2001). Ils peuvent également décomposer l'irradiation solaire directe et rediriger des quantités adéquates de lumière diffuse vers des espaces profonds (Al-Masrani et al., 2018). Ces dispositifs sont statiques en termes de géométries, de caractéristiques matérielles et esthétiques (Al-Masrani et al., 2018). Les dispositifs d'ombrage fixes passifs prennent différentes formes, telles que les porte-à-faux horizontaux, les lamelles verticales, horizontales et inclinées, les surplombs, les vérandas et balcons et les structures en alvéoles (Kirimtat

et al., 2016, Al-Masrani et al., 2018). En Europe puis aux Antilles, on utilise aussi, dès le 18e siècle, des jalousies ou des claire-vue (système à caillebotis), qui peuvent être fixées temporairement, puis retirées lorsque l'ensoleillement est moins intense (Charlery, 2003). L'utilisation de ces systèmes, qui s'inspirent des dispositifs développés dans l'architecture vernaculaire islamique et d'Asie de l'Est, se démocratisent à la fin du même siècle (Charlery, 2003).

L'architecture islamique a développé une pléthore de dispositifs d'ombrage : "Mashrabiya", "Rowshan", "Shobāk" et "Shanāsheel". Ces dispositifs d'ombrage fixes fournissent une lumière tamisée ainsi qu'une ventilation naturelle à l'intérieur des bâtiments, mais répondent aussi à un besoin socio-culturel d'intimité. Dans un contexte contemporain, ils ont également un grand potentiel d'utilisation et peuvent être améliorés sur la base d'approches paramétriques complexes et de la technologie moderne (Oghazian et al., 2001; Sherif et al., 2012).

En effet, l'intégration de la paramétrisation permet de pallier le manque de réactivité des dispositifs fixes face aux changements climatiques et météorologiques (Al-Masrani et al., 2018). La paramétrisation, soutenue par des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), est un processus de conception basé sur des algorithmes. La paramétrisation permet de générer des variations de formes complexes et des solutions techniques à partir de l'exploitation d'une grande quantité de données (Simone, 2021; Cingolani, 2013). L'intégration d'une multitude de paramètres et variables dès l'esquisse permet donc l'optimisation du dispositif fixe et la création de formes sensibles au contexte (Omidfar, 2015; Al-Masrani et al., 2018).

Masdar City est un exemple notoire de modernisation d'éléments de l'architecture vernaculaire. Ce projet conçu par Foster+Partners et finalisé en 2014 se situe à quelques kilomètres du centre-ville d'Abou Dabi, aux Émirats arabes unis (Fig 2.1) (Foster+Partners, n.d.). Cette ville oasis fait partie du projet Estidama (durabilité en

arabe), lancé en 2008 par le Gouvernement d'Abou Dhabi, pour promouvoir une architecture durable (Patel et Griffiths, 2013; El Amrousi, 2017). Pour atteindre les objectifs de durabilité énergétique, les concepteurs ont mis en place plusieurs stratégies, dont l'utilisation de matériaux locaux et une conception solaire passive inspirée de l'architecture traditionnelle islamique. C'est le cas de l'Institut des sciences et des technologies, un bâtiment au cœur même de cette initiative. Les laboratoires et les résidences sont orientés de façon à créer de l'ombre sur les bâtiments adjacents et les rues piétonnes (Foster+Partners, n.d.). Des installations photovoltaïques sont installées sur le toit pour fournir de l'énergie et une protection solaire supplémentaire (Foster+Partners, n.d.). Les résidences et des laboratoires sont dotés de tours à vents, réinterprétation du barjeel traditionnel perse, afin de créer une ventilation naturelle à l'intérieur des bâtiments. Les fenêtres des bâtiments résidentiels sont protégées par une réinterprétation contemporaine du Mashrabiya (Patel et Griffith, 2013). L'élément est construit avec du béton renforcé de verre et coloré avec du sable local et les perforations reprennent les motifs géométriques traditionnels de l'architecture islamique. En plus d'offrir intimité et esthétique, cet élément agit comme double peau grâce à sa technologie structurelle et les matériaux utilisés (El Amrousi, 2017). Pour Masdar, les concepteurs ont développé une vision régionaliste qui revisite des éléments du passé avec des techniques et des matériaux contemporains (El Amrousi, 2017).

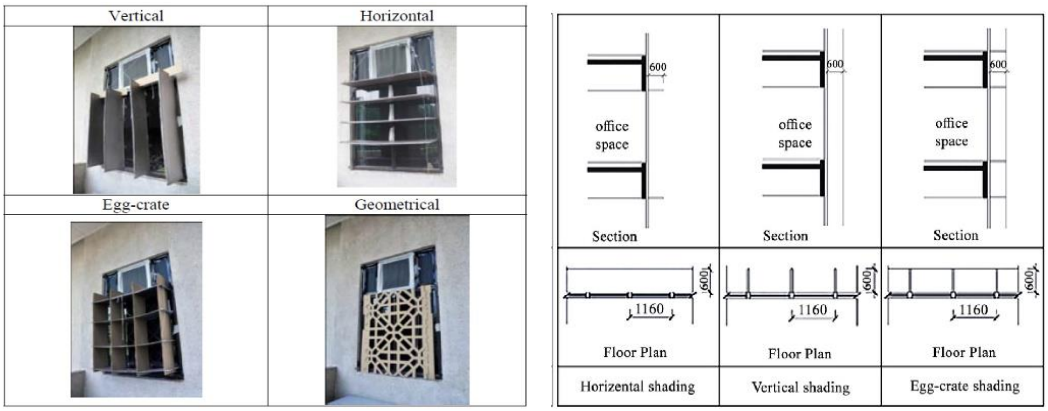
Figure 2.1 Résidences et laboratoires de l'Institut des sciences et technologies de Masdar City, un exemple de modernisation du mashrabiya, T. Caine (2014). [Photographie]. Archdaily. (Https://www.archdaily.com/517456/inside-masdar-city).

En août 2012, Denan et Majid (2015) ont expérimenté quatre dispositifs courants pour déterminer lequel était le plus approprié sous le climat chaud et humide de la Malaisie. Elles ont installé les dispositifs (vertical, horizontal, alvéole et perforations géométriques) à la fenêtre d'une salle du campus de l'Université islamique internationale de Malaisie. 50 étudiants ont été sélectionnés pour donner leurs impressions sur les performances de ces dispositifs dans 6 zones différentes de la pièce. L'expérience montre que tous les dispositifs filtraient une quantité considérable de lumière naturelle, mais qu'aucun ne réussissait à éliminer l'éblouissement, même si certains sont plus efficaces que d'autres. L'alvéole semble la moins appropriée alors que le dispositif vertical est préféré par tous les participants (Denan et Majid, 2015).

Lau et al. (2016) ont comparé l'impact de l'installation d'un écran solaire horizontal, vertical et en alvéoles sur l'énergie de refroidissement. Pour l'étude, ils ont sélectionné comme modèle de base un immeuble de bureaux typique de Kuala Lumpur, en Malaisie. L'immeuble sélectionné comprend un hall de 4 étages et 41 étages de bureaux. Il est rectangulaire, orienté nord-sud et totalement vitré. Près de la moitié de sa consommation annuelle d'énergie est destinée au refroidissement (Fig 2.2). Au total, ils ont réalisé plus de vingt simulations avec différents dispositifs, différentes orientations et différents vitrages. Les résultats indiquent que l'utilisation d'un dispositif d'ombrage associé à un double vitrage à faible émissivité permet de réduire la consommation quel que soit l'orientation, mais les économies sont encore plus importantes lorsque le dispositif est associé à un vitrage standard. Néanmoins, les

économies les plus importantes sont réalisées avec le dispositif alvéolé et sur les façades est et ouest (Lau et al., 2016).

Figure 2.2 Expérimentation de dispositifs solaires en Malaisie, tiré de Lau et al. (2016).



2.2.1.2 Dispositifs d'ombrage réglables ou mobiles

Les dispositifs d'ombrage réglables ou mobiles sont des systèmes dont les éléments peuvent être déplacés (Al-Masrani et al., 2018). Ces derniers sont généralement préférés aux dispositifs fixes en raison de leur capacité à s'adapter aux conditions extérieures, ce qui les rend particulièrement performants dans le contrôle de la lumière et la réduction du gain de chaleur solaire et de l'éblouissement pendant l'été ou les périodes de pénétration profonde de la lumière du soleil (O'Brien et al., 2013 cités dans Al-Masrani et al., 2018). Les dispositifs mobiles se présentent sous deux formes, en 2D (éléments d'ombrage plats avec mouvement de translation) ou en 3D (forme géométrique qui dépend du type de mouvement) (Al-Masrani et al., 2018).

Dans les dispositifs d'ombrage réglables ou mobiles, on retrouve sans exhaustivité, les volets, persiennes et auvents, les pare-soleil ou brise-soleil, les stores vénitiens, les toiles à enroulement, les stores verticaux et les ailettes (Kirimtat et al., 2016; O'Brien et al., 2013). Il existe deux types de réglage: automatique ou manuel. Les systèmes d'ombrage réglables manuellement permettent aux occupants de contrôler leur

environnement et d'assurer l'intimité (O'Brien et al., 2013 cités dans Al-Masrani et al., 2018). Ce contrôle se fait à travers des actionneurs mécaniques passifs, tels que cordons, tiges ou chaînes (Al-Masrani et al., 2018). Ce type de dispositif est préféré aux dispositifs automatiques parce qu'il rend possible un contrôle rapide et individuel (Al-Masrani et al., 2018). De plus, ces systèmes ont un coût moins élevé que les systèmes automatisés. Les systèmes automatisés prennent la même forme que les systèmes manuels mais, au lieu d'utiliser un mécanisme passif, ils possèdent un moteur électrique qui est actionné soit par l'usager soit par un système de contrôle dynamique qui réagit à des stimuli, tels que la température, l'intensité de la lumière ou le champ magnétique (Fig 2.3 - 2.4) (Al-Masrani et al., 2018).

Figure 2.4 Classification des dispositifs d'ombrage selon l'implication énergétique, d'après Al-Masrani et al. (2018).

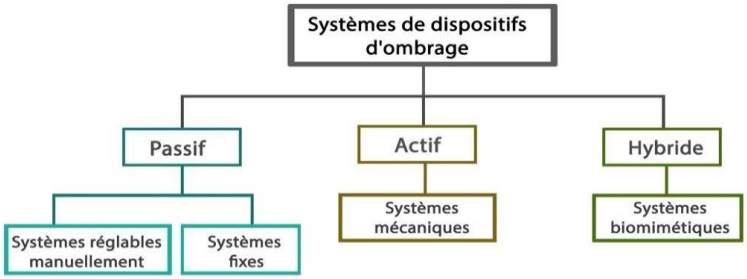
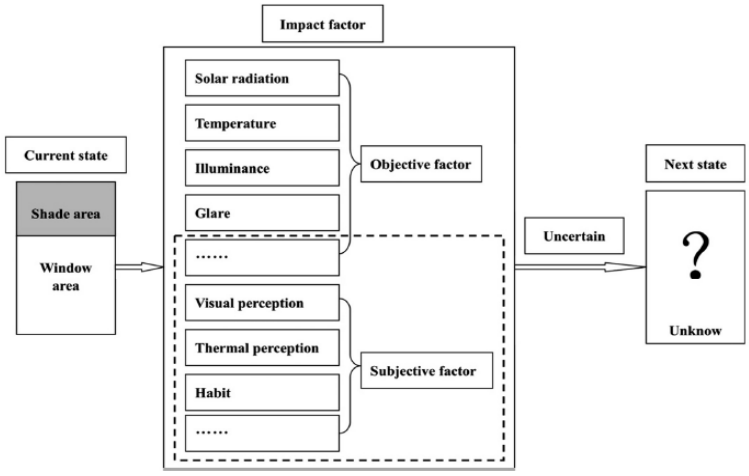


Figure 2.3 Facteurs et variables qui affectent les performances des dispositifs d'ombrage manuels (Al-Masrani et al., 2018).



Les dispositifs architecturaux d'ombrage ajustables manuellement ne sont pas nouveaux. Par exemple, au 18e siècles, certaines habitations, particulièrement celles situées dans les zones tropicales, possédaient des persiennes pour ventiler à l'intérieur des maisons et contrôler la lumière (Charlery, 2003). En 1933, Le Corbusier propose un prototype moderne du brise-soleil, réglable manuellement. Son système se concrétise dans le bâtiment du ministère de l'Éducation à Rio de Janeiro, conçu entre 1936 et 1943 (Fig 2.5). Dans ce projet, la façade est composée d'alvéoles contenant des persiennes mobiles pouvant être ajustées par l'usager (Al-Masrani et al., 2018).

Figure 2.5 Mministère de l'Éducation à Rio de Janeiro avec son système d'ombrage ajustable manuellement. [Photographie]. Holanda, M. (n.d). Archdaily. (Https://www.archdaily.com/577579/spotlight-oscar-niemeyer/548caa52e58eceb76d000068-ministry-of-educatio?next_project=no).

Bénéfices des dispositifs d'ombrage selon la saison, tiré de Carletti et al. (2014) (Fig 2.6) : Légende : + + = Effet très favorable; + = effet positif ; - = Aucun effet ou effet potentiellement négatif.

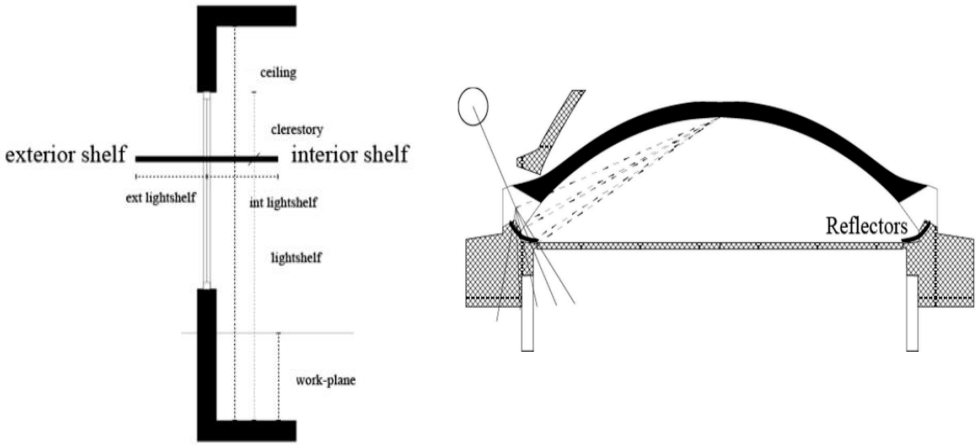
Figure 2.6 Bénéfices des dispositifs d'ombrage selon la saison, tiré de Carletti et al. (2014)

Position	Summer Thermal Gains	Winter Thermal Gains	Summer Thermal Comfort	Visual Comfort	Acoustic Comfort
External	++	-	++	+	+
Intermediate	+	+	+	+	-
Internal	-	++	-	+	-

2.3 Étagère lumineuse (light shelf)

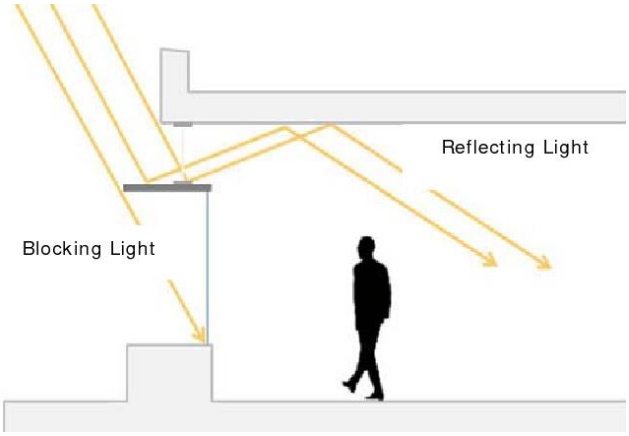
Une étagère lumineuse est un dispositif architectural passif qui capte la lumière du jour et la réfléchit vers le plafond (Daich, 2011). Ce dispositif permet de redistribuer la lumière plus uniformément et plus profondément et d'augmenter l'éclairage intérieur (Daich, 2011; Antonis et al., 2017). Il bloque aussi le rayonnement direct, considéré comme le principal facteur de gain de chaleur à l'intérieur des espaces intérieurs (Antonis et al., 2017). Comme l'expliquent Antoniset al. (2017), cette technique n'est pas nouvelle. L'application de miroirs pour rediriger la lumière du soleil est connue depuis l'Antiquité. La première étagère lumineuse connue se situe dans la mosquée Sainte-Sophie, en Turquie, et date du 6ième siècle après JC. Dans ce concept développé par Anthemius, des appuis de fenêtre sont installés autour du dôme pour augmenter la luminosité à l'intérieur du dôme (Antonis et al., 2017). Ce système se compose d'un élément opaque avec une surface supérieure très réfléchissante et une sous-surface blanche diffusante (Fig 2.7) (Al Mosaed, 2011).

Figure 2.7 Coupe transversale d'un espace avec étagère lumineuse étendue (interne et externe) (Antonis et al., 2017). Droite : Représentation schématique du parapet de Sainte-Sophie (Antonis et al., 2017).



Dans un dispositif moderne, la fenêtre en claire-voie laisse pénétrer la lumière du soleil et la diffuse vers l'intérieur tandis qu'une tablette, placée sous la claire-voie, bloque le soleil à hauteur de vue (Almusaed, 2011; Antonis et al., 2017; Im et al., 2013). La tablette peut être intérieure, extérieure ou combinée (intérieur et extérieur) (Almusaed, 2011; Antonis et al., 2017) et elle est composée d'un matériau clair et réfléchissant sur le dessus. Le dispositif est préférablement placé dans la moitié supérieure de la fenêtre, au-dessus du niveau du regard. Elle peut être horizontale, inclinée, incurvée, courbe ou active (Fig 2.8) (Antonis et al., 2017; Daich, 2011).

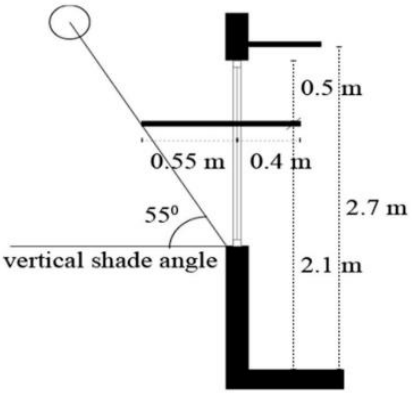
Figure 2.8 Concept et fonction de l'étagère lumineuse, tiré de Im et al. (2013).



De tous les dispositifs d'ombrage, les étagères lumineuses font partie des plus fiables et des plus efficaces, particulièrement par temps couvert et sur les façades sud (Al-Masrani et al., 2018; Antonis et al., 2017). Cependant, leur performance dépend de nombreux facteurs. Comme l'expliquent Antonis et al. (2017), pour concevoir une étagère lumineuse performante, il faut tenir compte de sa géométrie (largeur, longueur, hauteur de montage, angle d'inclinaison et forme), du type de réflectance (spéculaire ou diffuse) et de matériau (métal perforé ou non, transparent), du réglage de la position (rotation, fonctionnement), des caractéristiques du bâtiment (dimensions de la pièce,

hauteur de plafond, taille des ouvertures, orientation) et des conditions climatiques (temps, hauteur du soleil, climat) (Fig 2. 9).

Figure 2.9 Coupe de l'étagère lumineuse légère à droite, tiré de Antonis et al. (2017).



Dans une étude publiée en 1994, Abdulmohsen et al. ont mesuré les performances de plusieurs configurations d'étagères lumineuses. Les expérimentations se sont déroulées à l'Université A&M du Texas, aux États-Unis. Pour mener l'expérience, ils ont créé un module reprenant les caractéristiques conventionnelles d'un espace à bureau qui recevait une lumière du jour simulée. Lors de cette étude, différentes profondeurs de tablette ont été évaluées et comparées. Ils ont constaté que la combinaison d'une étagère lumineuse intérieure et extérieure était le système le plus efficace en termes d'éclairement, d'uniformité de la lumière du jour et de réduction de l'éblouissement. Pour des performances maximales, ils conseillent des profondeurs de tablette deux à trois fois plus grandes que la hauteur de la fenêtre à claire-voie lorsque le soleil est bas ou lorsque la tablette est installée à l'intérieur.

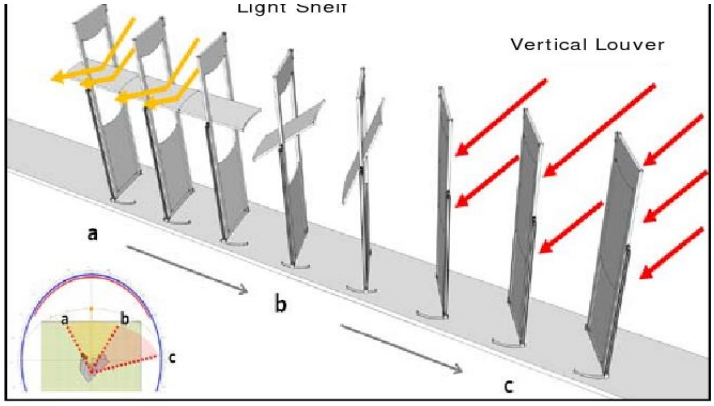
Berardi et Anaraki (2018) ont mesuré les performances d'une étagère lumineuse dans un espace à bureau ouvert typique de Toronto, au Canada. Pour ce faire, ils ont comparé le dispositif en y intégrant différentes variables, telles que les ratio fenêtre-mur, les

formes des fenêtres, l'orientation de la pièce, la hauteur du soleil et les caractéristiques architecturales du bâtiment. Les résultats indiquent que, dans un contexte torontois, ces dispositifs sont les plus avantageux lorsque les ratios fenêtre-mur sont supérieurs à 25% et lorsque les façades sont orientées sud. Plus le ratio augmente, plus le dispositif génère de bénéfices. Il réduit la gêne à proximité des ouvertures, augmente la qualité de l'éclairement sans affecter les niveaux d'éclairement dans le fond de la pièce.

Ochoa et Capeluto (2013) ont comparé les performances d'une fenêtre sans protection, d'une étagère lumineuse et d'un concentrateur anidolique pour des immeubles à bureau. Le plafond anidolique est un système composé de deux miroirs en forme de parabole qui concentrent et captent la lumière pour la redistribuer dans l'espace intérieur (Daich, 2011). Ce système est particulièrement adapté au ciel couvert (Daich, 2011). Pour simuler un espace à bureau conventionnel, Ochoa et Capeluto ont choisi une salle de réunion orientée sud-ouest de l'Institut de technologie d'Israël, à Haïfa. Les résultats indiquent que, bien que le concentrateur anidolique fournisse les niveaux d'éclairement les plus élevés à l'arrière de la pièce, dans certains angles solaires, il cause de l'éblouissement. Les auteurs expliquent que ces résultats sont dus à des erreurs dans les dimensions et l'orientation. Pour ces raisons, ils considèrent que l'étagère lumineuse offre une approche plus sûre d'un point de vue qualitatif, car même si elle est moins performante en termes de niveau d'éclairement, elle réduit le contraste entre l'avant et l'arrière de la pièce (Ochoa et Capeluto, 2013). À la suite de ces expérimentations, Ochoa et Capeluto (2013) ont remarqué que, dans les espaces dotés d'une seule fenêtre panoramique et situés dans des climats à fort ensoleillement, les dispositifs d'ombrage sont beaucoup moins performants dans le fond de la pièce. Ils conseillent aux architectes de concevoir des espaces de moins de 7 mètres de profondeur ou de rajouter des fenêtres.

Pour améliorer les performances de l'étagère lumineuse, Im et al (2013) ont conçu un modèle expérimental cinétique. Ce modèle s'adapte en fonction de l'altitude du soleil. Lorsqu'il est bas, le modèle fonctionne comme une persienne verticale. Les rayons du soleil sont ainsi bloqués, empêchant la surchauffe à l'intérieur du bâtiment. Lorsque l'altitude du soleil est élevée, une portion du cadre exerce une rotation pour se positionner à l'horizontale et fonctionner telle une étagère lumineuse. L'étagère lumineuse est particulièrement performante lorsque le soleil est haut. Ce système résout les problèmes liés à l'altitude solaire en faisant passer le dispositif d'un concept statique à un concept réactif à son environnement (Fig 2.10).

Figure 2.10 Processus de conversion de l'étagère cinétique (à droite), tiré de Im et al. (2013).



2.3.1 Panneau d'ombrage

Le panneau d'ombrage perforé est un dispositif architectural situé généralement à l'extérieur et implanté au niveau des fenêtres ou sur toute la surface de la façade d'un bâtiment. Ce dispositif a diverses fonctions, telles que la régulation de la lumière, la création d'une ventilation passive et la réduction de la température (Naciri, 2007). Le dispositif crée parfois un relief sur le bâtiment, c'est pourquoi le bâtiment peut être décrit comme une « boîte dans la boîte ». Sa forme possède une fonction à la fois culturelle, ornementale et fonctionnelle. La composition ornementale de l'ensemble

participe à la régulation, la dispersion et la redistribution de la lumière à l'intérieur (Babaei et al., 2013). Les écrans de protection perforés (Mashrabiya, Rawshan, Shanāsheel et Moshabak) sont particulièrement utilisés en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, parce qu'ils offrent des vues sur l'extérieur sans perturber l'intimité des occupants d'un bâtiment (Fig 2.11-2.12).

Figure 2.11 Répartition des dispositifs d'ombrage vernaculaires islamiques et type de climats.

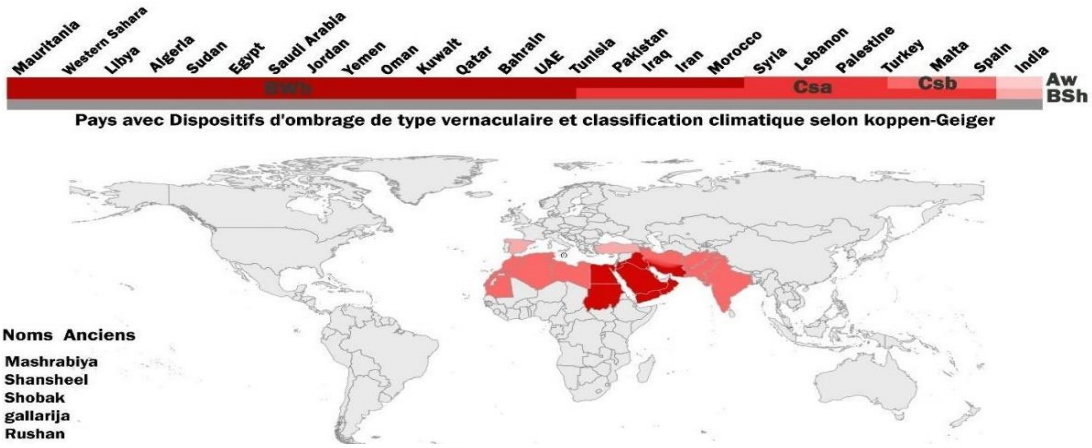
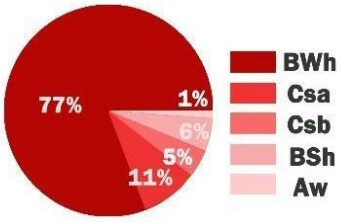


Figure 2.12 Répartition des pays avec dispositifs d'ombrage de type vernaculaire selon le type de climat, d'après Koppen-Geiger



	Main climates	Precipitation	Temprature
BWh	Arid	desert	Hot Arid
Bsh	Arid	Steppe	Hot arid
Csa	Warm temperate	Steppe	Hot summer
Csb	Warm temperate	Steppe	Warm summer
Aw	Equatorial	Desert	

Cependant, l'utilisation de panneaux d'ombrage n'est pas limitée à l'architecture islamique ou à l'architecture traditionnelle et vernaculaire. Selon Germanà al. (2015), en dehors de l'approche traditionnelle, trois approches synthétisent un large éventail de panneaux d'ombrage: l'approche moderniste, l'approche régionaliste et l'approche paramétrique (Germanà et al., 2015).

L'approche moderniste, développée au début du 20e siècle, se déconnecte de la tradition et de l'architecture vernaculaire. Selon cette approche, le brise-soleil doit s'adapter à la fonction du bâtiment (El Amrousi, 2017). Le premier modèle de panneau d'ombrage moderniste voit le jour avec Le Corbusier qui, en 1929, élabore un concept pour concilier les bénéfices du soleil en hiver et ceux de l'ombre en été (Siret et Harzallah, 2006). Il le met en pratique pour la première fois, en 1932, dans un projet de lotissement en Algérie (Siret et Harzallah, 2006). Ce concept est utilisé dans plusieurs autres projets, dont l'Unité d'habitation de Marseille ou l'ancien ministère de l'Éducation et de la Santé de Rio de Janeiro. La deuxième approche réinterprète et remodélise les dispositifs traditionnels en termes de fonction et d'identité comme, par exemple pour le complexe Dar al-Islam de Hassan Fathi ou l'Institut du monde arabe de Jean Nouvel. L'approche paramétrique, apparue au début du 21e siècle, utilise les techniques et technologies de l'informatique et des matériaux pour concevoir des dispositifs adaptés à leur environnement comme la Golden House par Abbink X De Haas architecture, le musée de la Céramique de Séville par AF6 Architects ou le nouvel édifice du musée de San Telmo par Nieto Sobejano Arquitectos (Fig 2.13) (Germanà et al., 2015).

Figure 2.13 Exemples de panneaux d'ombrage perforés (a) Panneau d'ombrage moderniste: l'Unité d'habitation de Marseille. Ghoussainy, B. (s.d). [Photographie]. Archdaily. (https://www.archdaily.com/952993/the-corbusierhaus-through-the-lens-of-bahaa-ghoussainy). (b) Réinterprétation et remodélisation des dispositifs traditionnels. [Photographie]. Archdaily. (Https://www.archdaily.com/517456/inside-masdar-city).

(a) (b) (c)

2.4 Le rôle de la géométrie dans les dispositifs d'ombrage

Cette section traite de l'emploi de l'ornementation et de son incidence sur la performance des écrans solaires. Plusieurs recherches se sont particulièrement intéressées à l'impact du motif géométrique sur la pénétration de la lumière et le contrôle de l'éblouissement à l'intérieur du bâtiment. Leurs expérimentations s'appuient sur des motifs traditionnels, comme ceux utilisés dans la conception des Mashrabeya ou des Rawshan (Sherif et al., 2012).

2.4.1 Motifs géométriques

Dans l'architecture islamique, il existe une multiplicité d'écrans ajourés. Parmi eux, on retrouve le Takhtabush (sorte de loggia), le Taqa (meurtrière décorative) et la Qamariya (ouverture semi-circulaire surmontant la fenêtre) (Germanà et al., 2015). Les motifs ajourés de la Qamariya sont recouverts de verre coloré. Lorsque la lumière traverse le verre, elle reflète les motifs avec une ombre colorée (Emami et Giles, 2016). Le panneau le plus connu reste encore le Mashrabiya (aussi appelé Rawshan, Moshabak ou encore Shabake), un dispositif dont la fonction est d'intercepter la lumière directe, d'adoucir l'éblouissement, de créer un flux d'air, de refroidir l'espace intérieur et de garantir l'intimité (Germanà et al., 2015; Babaei et al., 2013; Gelil, 2006). Placé devant une fenêtre, autour d'un balcon, d'une saillie ou servant de porte, ce dispositif possède parfois des fenêtres qui permettent l'interaction entre intérieur et extérieur (Germanà et al., 2015). Le Mashrabiya prend la forme d'un treillis en bois, terre cuite, maçonnerie ou même marbre. Les motifs formés dans la partie ajourée composent un ensemble inspiré de la nature et de la géométrie. Le niveau de complexité des motifs diffère selon l'emplacement, le matériau, la fonction du lieu et l'objectif de l'installation. Plusieurs chercheurs se sont particulièrement penchés sur l'impact du motif sur la performance des écrans solaires ajourés (Fig 2.14 - 2.15em) (Oghazian et al., 2017).

Figure 2.14 Shanāsheel dans l'espace intermédiaire de la maison Taheri en Iran. (Afshin Iranpour). (12avril,2012). [Photographie].Ouriranphotos. (https://ouriranphotos.com/fa/photo/592).

Figure 2.15 Un moucharabieh devant la fenêtre et le balcon en Tunisie. Phileon (2007, 1 juin). [Photographie].Wikipedia.(https://en.wikipedia.org/wiki/Mashrabiya#/media/File:Moucharabier-panoramio.jpg

Aujourd'hui, de plus en plus d'études montrent l'importance environnementale de cet élément architectural. Comme l'expliquent Naik et Elzeyadi (2020), plusieurs de ces études se sont concentrées sur l'impact du Moshabak sur la consommation d'énergie, l'éclairage naturel et le confort visuel dans des climats chauds-secs, chauds-arides et chauds-humides. Pour comparer les performances selon le type de Shabak, les auteurs se sont appuyés sur trois paramètres, soit le ratio de perforation (PR = % de la surface ajourée versus surface totale), le taux de profondeur (DR = profondeur/largeur de perforation) et la granularité (distribution et quantité de perforations) (Naik et Elzeyadi, 2020; Emami et Giles, 2016) (Fig 2.16-2.17). Naik et Elzeyadi (2020) ont eux-mêmes analysé les performances des écrans solaires perforés d'une chambre funéraire vieille de 500 ans, située dans le complexe de la mosquée Sarkhej à Ahmedabad, en Inde. Les écrans perforés se succèdent sur toutes les façades du bâtiment, ouvert au public. Après étude du bâtiment, les auteurs ont remarqué que les écrans maintenaient un confort thermique, mais que les visiteurs ne se concentraient pas dans les espaces confortables, ce qui leur a laissé penser que l'uniformité ou la neutralité n'est pas une solution adéquate. Ils recommandent plutôt de concevoir des écrans avec des paramètres géométriques mobiles ou dynamiques (comme c'est le cas pour l'Institut du monde arabe à Paris) et de laisser des zones d'inconfort afin de répondre aux besoins de tous les états internes des usagers (Naik et Elzeyadi, 2020).

Figure 2.16 Dispositif d'ombrage inspiré des motifs persans dans différentes résolutions (Emami et Giles, 2016).

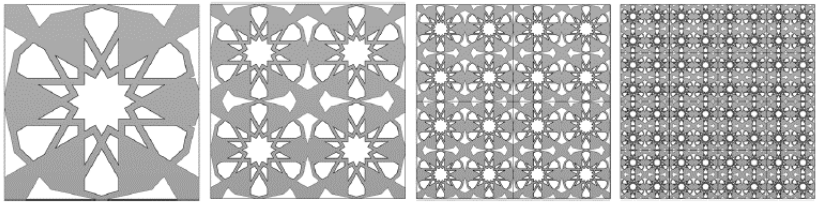
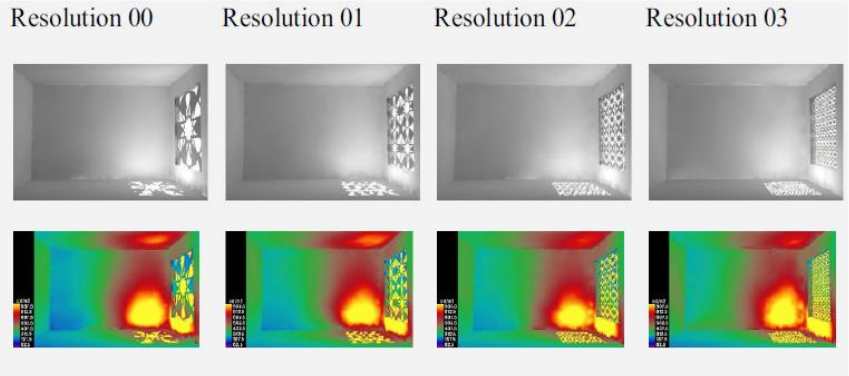
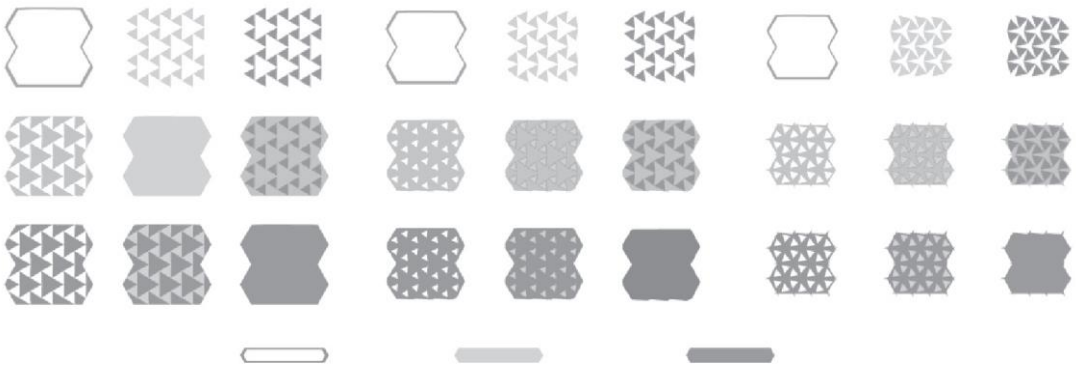


Figure 2.17 Simulation de luminance selon les motifs géométriques du dispositif d'ombrage (Emami et Giles, 2016).



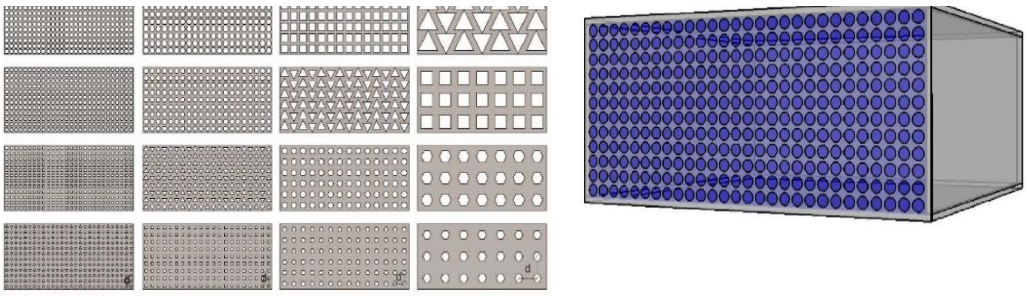
Lors d'une étude préliminaire, Pesenti et al. (2015) ont analysé le potentiel de la géométrie tridimentionnelle dans l'optimisation des systèmes d'ombrage pour immeubles à bureau selon des paramètres de confort visuel (éclairement naturel utile, éblouissement et autonomie en lumière) et la consommation totale d'énergie. Les concepteurs se sont appuyés sur l'art de l'origami et sa capacité à varier les angles et les propriétés des alliages à mémoire de formes pour concevoir un système qui s'adapte aux conditions climatiques et aux besoins des usagers. Pour l'expérimentation, ils ont simulé une salle de bureau conventionnelle orientée sud et comparé l'impact des déplacements de trois modèles géométriques sur l'environnement numérisé, en tenant compte des variations climatiques tout au long de l'année. Les résultats montrent que, même si chacune des configurations possède des inconvénients, les dispositifs dynamiques possèdent un plus grand potentiel en termes de performances que les systèmes statiques (Fig 2.18) (Pesenti et al., 2015)

Figure 2.18 Configurations d'ombrage : aucun ombrage, ombrage complet et combinaisons mixtes d'opacité pour les faces, chacune pour un taux de contraction spécifique (Pesenti et al, 2015).



Chi et al. (2018) ont examiné la relation entre disponibilité de la lumière du jour et consommation d'énergie annuelle dans le climat chaud et tempéré de Séville, en Espagne. Pour l'étude, ils ont modélisé un espace à bureau entièrement vitré protégé par un panneau d'ombrage dont les valeurs de perforations varient. Au total, 16 configurations par orientation ont été analysées. L'étude montre qu'il existe une corrélation entre l'orientation et la quantification de la suffisance de lumière du jour et une corrélation entre une disponibilité excessive de la lumière du jour et éblouissement et surchauffe. Pour des économies d'énergie, les auteurs conseillent aux concepteurs de limiter le recouvrement des surfaces vitrées à moins de 40% au sud et moins de 50% pour les autres orientations (Fig 2.19) (Chi et al., 2018).

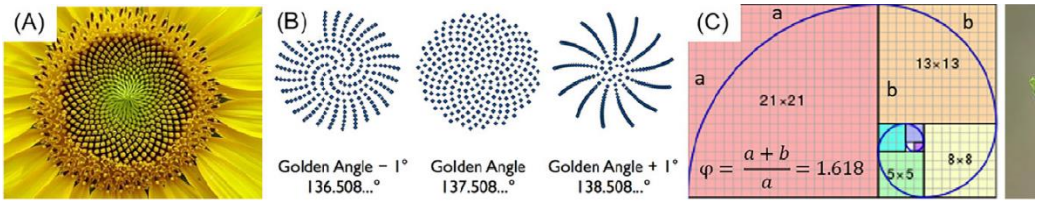
Figure 2.19 Panneau d'ombrage perforé et corrélation entre une disponibilité excessive de la lumière du jour et éblouissement et surchauffe (Chi et al., 2018).



2.4.2 Biomimétisme

Gosztonyi (2018) explique que, ces dernières années, le développement d'outils de conception paramétrique et de production numérique a permis la conception de plus en plus de systèmes d'ombrage cinétiques. Cependant, les systèmes cinétiques conventionnels restent généralement confinés à des géométries linéaires ou planes et possèdent des mécanismes adaptatifs limités, ce qui ne leur permet pas d'atteindre les effets souhaités. Afin d'optimiser leur adaptabilité et leur fonctionnalité, Gosztonyi (2018) propose de s'inspirer des processus de croissance, de développement et d'adaptation des organismes biologiques, pour qui la géométrie joue un rôle primordial. En effet, dans la nature, la forme est cruciale pour la survie. Par exemple, une plante est obligée de s'adapter aux changements que vit son environnement et à leurs impacts puisqu'elle ne peut pas se déplacer à volonté. Ceci explique pourquoi certaines espèces apparentées ont développé des caractéristiques différentes selon la zone géographique (Fig 2.20) (Gosztonyi, 2018).

Figure 2.20 Optimisation des surfaces et schémas de croissance biologiques inspirant les formes géométriques. La disposition des fleurs et des feuilles du tournesol sert à éviter l'auto-ombrage avec une utilisation maximale de l'espace afin d'assurer une croissance optimale des plantes. Son principe mathématique est illustré dans le (B) et le (C), la spirale dorée (Gosztonyi, 2018).



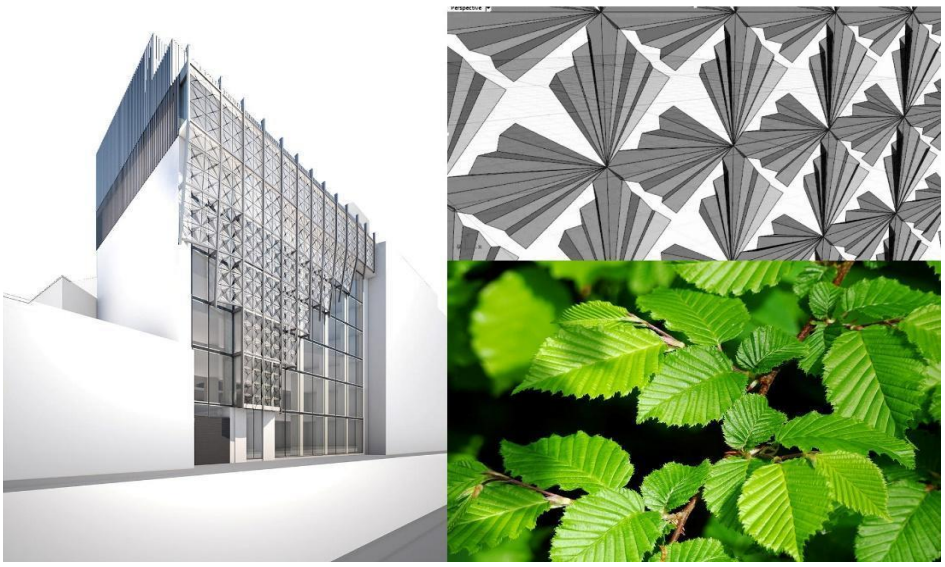
Pour concevoir un dispositif inspiré des principes du biomimétisme, Gosztonyi (2018) part de la théorie soutenue par plusieurs chercheurs selon laquelle les formes et les modèles de la nature peuvent être expliqués par des formules mathématiques, puisque la nature suit les lois de la physique. Vernoux et al. (2018) expliquent que tous les éléments d'un organisme biologique croissent de manière séquentielle et selon un ordre précis et des principes géométriques, ce que l'on nomme la phyllotaxie. Dans les

phyllotaxies spiralées, les organes suivent des arrangements qui font appel à la suite de Fibonacci et au nombre d'or (Vernoux et al., 2018; Gosztonyi, 2018), pour optimiser l'exposition au soleil et leur adaptabilité à leur environnement (Gosztonyi, 2018). Ces mécanismes biologiques ont inspiré les arts, comme c'est le cas pour l'architecture avec Le Corbusier ou l'art islamique et roman (Vernoux et al., 2018).

Dans les morphologies biologiques, la forme géométrique de base s'appuie sur une grille constituée d'éléments circulaires, polyédriques et à surfaces polygonales (Gosztonyi, 2018). De ce fait, le cercle et les polygones, qui sont déjà appliquées dans l'architecture vernaculaire, peuvent être appliqués dans la conception de dispositifs cinétiques complexes afin de créer des mouvements dynamiques flexibles qui optimisent leur fonction d'ombrage et leur adaptabilité. Pour faciliter le transfert entre principes naturels et techniques, Gosztonyi (2018) propose l'application de modèles mathématiques, tels que le diagramme de Voronoï, la tessellation (mosaïque à base de formes géométriques), le tangram (jeu chinois de dissection du carré en 7 pièces élémentaires) et l'origami.

Afin de diminuer l'empreinte écologique des bâtiments, d'éviter la surchauffe et optimiser la consommation énergétique, les frères Vernoux s'inspirent de la phyllotaxie et de ses règles géométriques. En 2017, ils initient le développement d'un algorithme qui calcule la disposition optimale de chaque logement dans un bâtiment pour maximiser la quantité de lumière captée. Dans un projet de bureaux plus récent situé dans le 15e arrondissement de Paris, ils s'inspirent de la feuille de charme pour concevoir une façade « double peau », composée de cellules recouvertes de tissu qui réagissent aux changements climatiques (Fig. 2.21). Dans ce dispositif, la toile de tissu, tendue sur les côtés grâce à des baleines, se replie ou se déploie en suivant des nervures alignées en V (Vernoux, 2020).

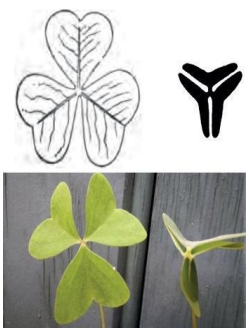
Figure 2.21 Façade « double peau » inspirée des feuilles de charme (Vernoux, 2020).



En 2017, Ware, l'un des associés du studio d'architecture Art&Built, débute la conception d'un dispositif de protection solaire passif, cinétique et biomimétique pour la façade du nouveau siège du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) de Lyon dont la livraison est prévue pour 2022 (Chayaamor-Heil et Vitalis, 2021). Dans le cadre de ce projet, Ware s'inspire de la nastie, mouvement réversible d'un végétal déclenché par un stimuli externe, pour concevoir un dispositif réactif à la variation de la lumière et de la température (Chayaamor-Heil et Vitalis, 2021). La transformation de ce processus naturel, qui ne nécessite ni énergie externe ni contrôle mécanique ou électronique, en un dispositif architectural inclut un grand nombre d'études, d'expérimentations et de nouvelles technologies (Chayaamor-Heil et Vitalis, 2021). Le premier prototype BILAME, prévu pour les façades extérieures, est une enveloppe vitrée qui révèle de manière séquentielle des motifs organiques à mesure que les pixels thermo-réactifs intégrés deviennent opaques (*Pho'liage* ®, 2019). Le deuxième prototype Pho'liage, prévu pour la façade de la cour, utilise des matériaux à mémoire de forme qui s'ouvrent et se ferment comme une fleur selon les mouvements du soleil.

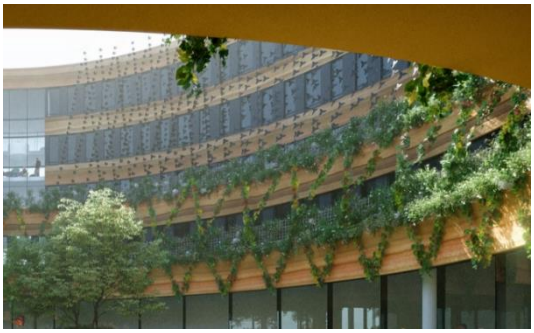
Ces deux prototypes sont activés et pilotés par l'énergie solaire (Fig. 2.22) (*Pho'liage* ®, 2019).

Figure 2.22 (a) Dispositif d'ombrage BILAME. (b) BILAME (Source de l'image : ArtBuild). (c) Le deuxième prototype Pho'liage. (d) mouvement de Pho'liage (e) nastique des « pétales » triangulaires individuelles (*Pho'liage* ®, 2019). (Https://www.artbuild.com/lab/pholiage)

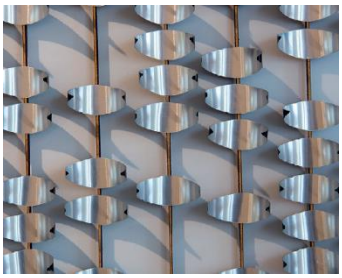


(a)

(b)



(c)



(d)

(e)

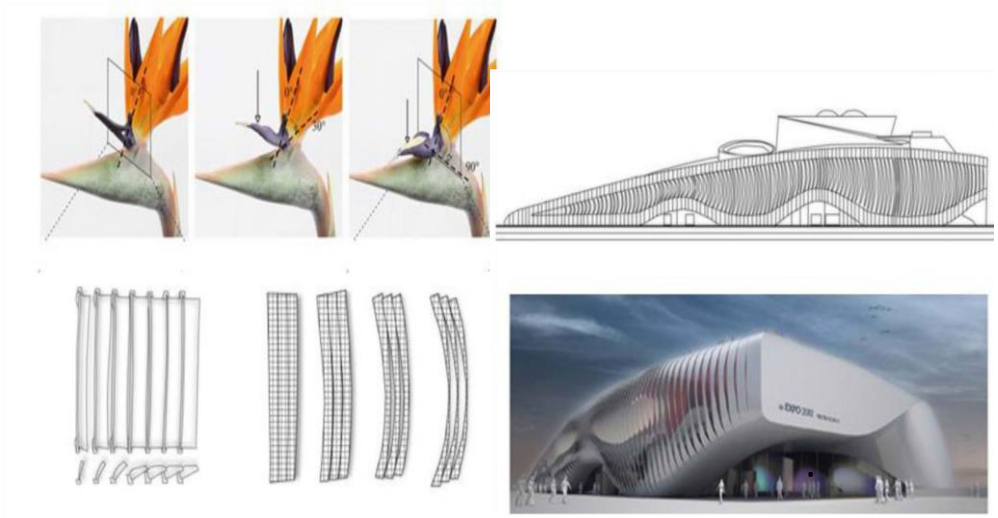
Sur la base d'une combinaison de formes et quantité de pétales, l'équipe dirigée par Ware a testé diverses configurations en tenant compte des propriétés physiques des matériaux. La modélisation a aussi servi à minimiser la perte de matériaux lors du processus industriel de poinçonnage et à localiser les surfaces d'actionnement critiques. Des tests en laboratoire ont permis de réduire le gaspillage de matériau, d'augmenter l'efficacité du rapport ouverture/fermeture, de réduire les émissions sonores pendant le processus d'activation et de ralentir le processus de fermeture (Fig. 2.23) (*Pho'liage* ®, 2019).

Figure 2.23 Prototype perforé (gauche : photo de la position pliée, droite : CAO de la position ouverte) (*Pho'liage* ®, 2019).

Schleicher et al. (2011) se sont aussi intéressés à la conception d'un système d'ombrage inspiré de la cinétique végétale. Les auteurs se sont particulièrement intéressés au processus de transposition du mouvement élastique et réversible du végétal en un mécanisme de déformation élastique actionné artificiellement. Cette recherche préliminaire a pour objectif de créer sur le long terme une bibliothèque de formes applicables à la conception de nouveaux dispositifs cinétiques. Pour ce faire, ils se sont appuyés sur trois mouvements de végétaux. Le premier s'inspire du mécanisme de pollinisation de l'oiseau de Paradis (Strelitzia reginae), qui présente un mouvement ponctuel, passif et non-autonome. En effet, pour s'adapter à ses pollinisateurs, la plante forme un perchoir en saillie composé de deux pétales. Lorsque l'oiseau se pose, son poids fait pencher le perchoir, ce qui lui permet d'atteindre le nectar. La déformation permet de libérer le pollen qui est transféré sur les pattes de l'oiseau, qui va transférer le pollen sur une autre fleur. Les auteurs ont traduit le mécanisme par une tige à laquelle sont rattachées deux ailettes. Lorsqu'une pression est exercée sur la tige, les ailettes se déploient de chaque côté de la tige. Le concept de déformation élastique de la fleur "oiseau de Paradis" a inspiré la façade cinétique du pavillon thématique de l'Expo Yeosu-2012. La façade cinétique a été conçue pour contrôler la lumière du jour et démontrer les aspects esthétiques de l'enveloppe réactive (Fig. 2.24) (Al-Masrani et al., 2018; Hosseini et al., 2021). Le deuxième modèle s'inspire de l'aldrovandie à vessies

(Aldrovanda vesiculosa), dont les feuilles se referment en un instant pour piéger leurs proies. Le mouvement rapide est entraîné hydrauliquement par une surface centrale avec nervure médiane. Le claquement souple et bi-directionnel est le résultat de multiples déformations interconnectées. Les auteurs ont traduit le mécanisme de piégeage par un système basé sur l'origami qui peut être plié par un mouvement de translation. Le troisième modèle s'inspire du lys (Lilium casablanca), dont la croissance force l'ouverture de la fleur et la déformation des pétales. Les auteurs ont traduit le mécanisme végétal par un dispositif dont les bords se dilatent lorsqu'une chaleur est appliquée (Schleicher et al., 2011).

Figure 2.24 :(a) Déformation élastique de l'oiseau de Paradis pendant le processus de pollinisation (b) Façade cinétique du pavillon thématique de l'Expo 2012 à Yeosu, inspirée par le mouvement de la fleur "oiseau de Paradis" (Hosseini et al., 2021).



(a) (b)

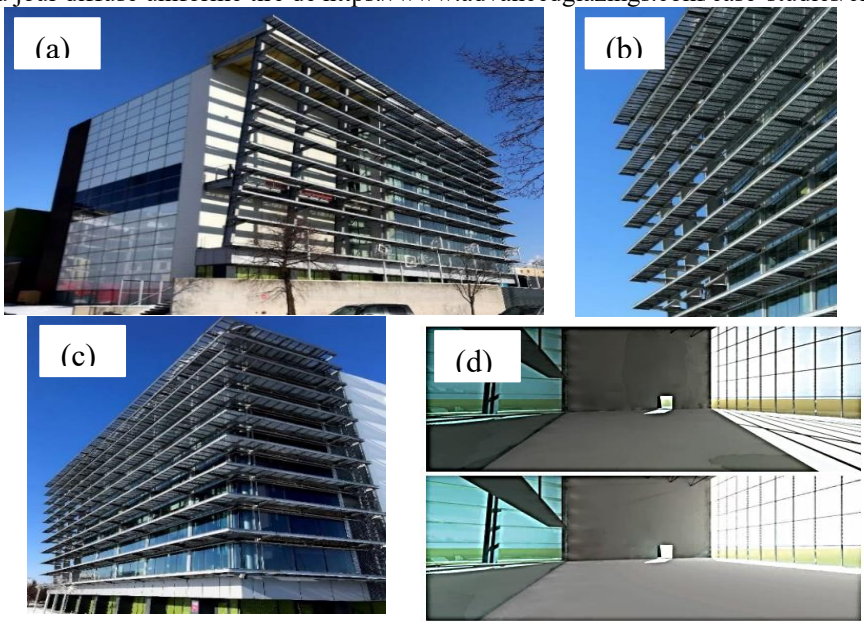
2.5 Études de cas existants au Québec

Les trois exemples proposés ne sont pas des études de cas exhaustives, mais de brèves présentations de divers dispositifs d'ombrages dans des bâtiments existants. Les trois bâtiments étudiés, qui ont des fonctions éducatives et administratives, se situent au Québec et utilisent des dispositifs d'ombrages. Les bâtiments étudiés sont l'École Nationale de Cirque, le Centre des technologies textiles du Cégep de Saint-Hyacinthe et le 740 Bel-Air à Montréal.

2.5.1 École Nationale de Cirque de Montréal

L'École Nationale de cirque a été fondée en 1981. Ses premiers locaux se situent dans le Centre Immaculée-Conception. En 1989, l'école déménage dans l'ancienne gare Dalhousie, dans le Vieux-Montréal. En constante croissance, l'école se relocalise en 2003 dans la Cité des arts du cirque qu'elle crée en collaboration avec le Cirque du Soleil et En Piste (Fig 2.25) (École nationale de cirque, n.d.).

Figure 2.25 (a, b et c) Nouveau bâtiment de l'École Nationale de Cirque, équipé de dispositifs d'ombrage en maille d'acier (d) Application de Solera® au niveau du sol qui réduit considérablement l'éblouissement, le convertissant en une lumière du jour diffuse uniforme tiré de https://www.advancedglazings.com/case-studies/cirque



Pour les gymnases superposés, l'École exigeait une conception durable qui réponde aux nécessités opérationnelles du gymnase et aux pratiques aériennes (advanced glazings LTD, n.d.). La nature hautement risquée de la pratique du cirque et la hauteur des plafonds exigeait des niveaux d'éclairage élevés, sans éblouissement et thermiquement confortables, ce qui est un défi en hiver dans une ville où les températures hivernales culminent rarement au-dessus de -17.5 C et où le risque d'éblouissement est élevé en raison de la position basse du soleil (advanced glazings LTD, n.d.). Elle exigeait également une diffusion uniforme de la lumière entrante, ainsi qu'un contrôle sur le niveau de transmission lumineuse (advanced glazings LTD, n.d.).

Contre toute attente, les architectes ont fait le choix d'utiliser le verre dans la conception des gymnases. En conséquence, ils devaient surmonter les problèmes d'inconfort, d'éblouissement et de perte de chaleur coûteuse (advanced glazings LTD, n.d.). Sur l'élévation sud, ils ont combiné un mur-rideau à pente négative avec un brise-soleil en maille d'acier pour ne pas recourir à des luminaires HID (Fig 2.25). Les perforations du brise-soleil peuvent limiter la surchauffe de la maille d'acier, les problèmes liés à son poids et l'accumulation de neige sur le dessus tout en améliorant la circulation de l'air. De plus, la pente vers l'extérieur peut augmenter l'effet d'ombrage dans les parties inférieures et empêcher l'accumulation de neige et de pluie dans les parties inférieures. En raison de la latitude nord de Montréal et de l'incidence des angles du soleil de l'après-midi et du soir, ils ont choisi d'installer sur l'élévation ouest un vitrage translucide de haute performance qui facilite les vues, à l'intérieur comme à l'extérieur, tout en minimisant les pertes de chaleur en hiver et les gains de chaleur en été (Fig 2.25(d)) (advanced glazings LTD, n.d.).

Dans le cas de l'École de cirque, les décisions des architectes ont relevé plus d'une vision esthétique que d'une vision fonctionnaliste. La relation entre le dispositif d'ombrage fonctionnel et le programme de l'École explique la torsion de la structure et le fait que l'ombrage recouvre une grande partie de la façade du bâtiment qui est

opaque. Il sert également à éliminer l'empilement répétitif des étages afin de faire oublier que cet empilement était interdit pendant le concours.

2.5.2 Centre des technologies textiles, Cégep de St-Hyacinthe

En 1998, ABCP architecture conçoit le nouveau siège social et centre de recherche du Cégep de Saint-Hyacinthe. Pour ce projet, les architectes décident de créer une esthétique au plus proche des fonctions technologiques et industrielles du bâtiment (*ABCP*, n.d.). En raison des installations existantes, le bâtiment est orienté nord-sud, ce qui génère de l'inconfort, particulièrement au niveau de la façade sud du bâtiment où les laboratoires sont installés. Pour réduire l'incidence de la lumière solaire directe dans l'espace laboratoire et augmenter la lumière réfléchie au plafond, les architectes ont mis en place un dispositif d'ombrage qui lie expression architecturale et fonction de l'espace. Puisqu'il s'agissait d'un laboratoire de textiles industriels, les architectes ont choisi le textile comme matériau pour la conception de ce dispositif. Au fil du temps, le matériau s'est affaissé par manque d'entretien et en raison du climat. Il a finalement été remplacé par des tiges métalliques dont la symbolique répond aussi à la fonction (Fig 2.26).

.

Figure 2.26 Dispositifs d'ombrage du Centre des technologies textiles, Cégep de St-Hyacinthe. ABCP architecture

2.5.3 Le 740 Bel-Air- Édifice Maurice-Normand, Montréal

Le projet du 740 Bel-Air a été conçu par un consortium d'architectes formé des firmes ABCP, Beauchamp et Bourbeau architectes et Busby Perkins + Will (ABCP, n.d; Lyons et al., 2009). Le projet, complété en 2005, a reçu plusieurs prix et mentions, dont le Prix d'excellence de l'Institut canadien de la construction en acier, catégorie bâtiments verts et la certification LEED NC Or du Conseil du bâtiment durable du Canada (ABCP, n.d.). Pour le projet, le client Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC) exigeait la conception d'un bâtiment durable qui répondait aux critères LEED. Le projet comprenait des bureaux pour cinq ministères

ou organismes fédéraux, des salles de classe et de réunion, des entrepôts, un gymnase, un champ de tir, des cafétérias, des ateliers et 10 quais pour camions (ABCP, n.d.; les affaires, 15 octobre 2005, Lyons et al., 2009). Il prévoyait la conservation, la réutilisation et le recyclage d'une partie des bâtiments existants et l'intégration de nouvelles structures (ABCP, n.d.). Comme le projet devait s'installer sur le site d'une ancienne fonderie construite en 1890 dans le quartier de St-Henri à Montréal, les questions de décontamination ont été soulevées (ABCP, n.d.; les affaires, 15 octobre 2005; Lyons et al., 2009). Le projet final intègre plusieurs innovations en matière de développement durable et d'éco-ingénierie qui répondent aux objectifs de réduction de la consommation d'énergie et d'eau (les affaires, 15 octobre 2005; Lyons et al., 2009). Pour atteindre ces objectifs, une variété de dispositifs ont été mis en place : système de ventilation, refroidisseurs, chaudières, champ de forage géothermique, stockage d'énergie thermique solide et dalles radiantes (les affaires, 15 octobre 2005, Lyons et al., 2009). Le contrôle de ces dispositifs est centralisé et se fait numériquement (Lyons et al., 2009). Les fenêtres, conçues pour optimiser les rayons solaires, peuvent s'ouvrir, ce qui est rare dans les bâtiments administratifs et institutionnels. Des puits de lumière laissent pénétrer la lumière sur les trois étages du bâtiment (Lyons et al., 2009). Des toits verts sont aussi aménagés afin de réduire les îlots de chaleur (les affaires, 15 octobre 2005). De son côté, l'atrium est équipé d'un brise-soleil extérieur constitué de lames d'aluminium fixes stratégiquement orientées (Lyons et al., 2009). Comme le montrent les photos de la figure 2.25, les pales sont inclinées pour éviter l'accumulation de neige (Lyons et al., 2009 ; Provencher Roy, n.d). De plus, puisque l'atrium fait face au sud-est, elles sont orientées vers l'ouest pour maximiser la lumière naturelle en journée et le chauffage solaire passif pendant l'hiver, tout en coupant la lumière directe du soleil en été pour éviter la surchauffe de l'espace (Fig 2.27) (Lyons et al., 2009).

Figure 2.27 Le 740 Bel-Air. Lyons et De Grâce (2009). Canada's Green Prototype. High performing buildings. http://www.pageaumorel.com/publications/23-2009-05-00_ASHRAE_HPB_740_Bel-Air_JDG_FGE_AL.pdf

Ces exemples démontrent que l'installation de dispositifs d'ombrage extérieurs a sa place dans le contexte urbain québécois et que les dispositifs ont le potentiel de répondre aux objectifs fonctionnels et esthétiques. La créativité et le caractère inédit de ces trois projets devraient constituer une source d'inspiration pour de nouveaux projets dans une métropole telle que Montréal.

2.6 Conclusion

Les ouvertures sont le lien le plus important et le plus fondamental avec le monde extérieur et la lumière, source de vie. En effet, la lumière jour joue un rôle prépondérant

dans la santé physique et mentale des individus, particulièrement chez les jeunes pour qui le manque de lumière ou l'exposition à une lumière inadéquate peut avoir des conséquences sur le long terme que ce soit sur leur croissance, leur bien-être ou leur santé. À court terme, une mauvaise distribution de la lumière et l'inconfort visuel ont des effets sur leur santé physique et mentale, leurs comportements, leurs apprentissages et leur réussite.La pénétration de la lumière du jour dans un bâtiment dépend de nombreux facteurs, notamment la profondeur de la pièce, la hauteur du plafond, la valeur de réflexion interne des surfaces de la pièce, l'orientation, la forme et la taille des ouvertures et les propriétés optiques du vitrage. Les dispositifs d'ombrage extérieurs jouent un rôle essentiel dans la réduction du rayonnement solaire et de l'éblouissement. Grâce à sa capacité à contrôler la lumière, ce type de dispositif réduit la surchauffe et la consommation d'énergie à l'intérieur des bâtiments (Shahdan et al, 2018). Bien que des études aient prouvé les avantages de ces dispositifs, l'analyse de leur potentiel environnemental arrive trop tardivement dans la conception, comparativement à leur esthétique (Shahdan et al, 2018). La configuration et la forme que prend un dispositif ne devraient pas se limiter à sa fonction ornementale. Sa conception doit aussi tenir compte de sa fonction écologique. Une meilleure compréhension de l'effet de la géométrie sur la création d'un environnement sain et responsable peut conduire à de nouvelles versions, plus performantes que les dispositifs conventionnels. Aujourd'hui, grâce à la paramétrisation et à l'amélioration des technologies des matériaux et de la construction, les concepteurs peuvent concevoir des dispositifs de plus en plus complexes, pour s'adapter à l'environnement dans lequel ils sont implantés (Emami et Giles., 2016).

Même si la performance d'un dispositif est difficilement quantifiable, de nombreux problèmes rencontrés dans l'intégration de systèmes d'ombrage traditionnels peuvent être résolus en passant d'un concept statique à un concept mobile et adaptable. Au Canada, les dispositifs mobiles extérieurs passifs sont assez rares, pourtant ils possèdent des avantages non négligeables. Outre leur capacité à réduire l'inconfort lié

à la lumière, ils permettent un contrôle individuel. Comme l'explique Stevens (2001), les usagers d'un bâtiment tendent toujours à préférer les systèmes passifs aux systèmes actifs. Par conséquent, cette recherche se concentre sur les systèmes passifs d'ombrage ajustables, car l'efficacité de ces modèles d'ombrage a été prouvée dans un climat froid comme le Québec (Al-Masrani et al., 2018). Dans le chapitre suivant, le potentiel d'application de la verdure comme dispositif d'ombrage sera discuté.

CHAPITRE III

SYSTEMES DE VERDURE VERTICALE

L'architecture est un domaine complexe et pluridisciplinaire, qui englobe et intègre autant les aspects esthétiques qu'environnementaux, économiques, techniques et sociaux. Pour les architectes, l'intégration des éléments de la nature dans les pratiques de conception peut être une activité difficile à définir, mais elle joue un rôle important dans l'innovation de la pratique architecturale.

Dans le chapitre précédent, les dispositifs d'ombrage conventionnels, tels que les étagères de lumière (light shelf) et les stores vénitiens, ont été étudiés. Malgré les avantages mentionnés pour ces types de dispositifs, comme l'amélioration du confort visuel et du contrôle thermique, les "systèmes de verdure verticale" possèdent un potentiel et des avantages qui dépassent ceux des dispositifs traditionnels. Ces avantages sont expliqués dans le chapitre qui suit.

3.1 Définitions et historique de systèmes de verdure verticale

Les systèmes de verdure verticale (Vertical greenery system) comprennent tous les systèmes de végétation, naturelle ou artificielle, d'un plan vertical, extérieur ou intérieur. Ils sont aussi nommés verdure verticale, jardin vertical, mur végétalisé, mur vert, aménagement paysager vertical ou encore mur vivant (Safikhani et al., 2014). Ces installations possèdent de multiples fonctions bénéfiques pour l'environnement naturel, humain et urbain.

Le concept de végétation verticale est utilisé dans l'architecture et le design urbain depuis de nombreux siècles (Abdullahi et al., 2016). Les jardins suspendus de Babylone en sont l'un des exemples les plus légendaires (Fig 3.1). Ces jardins, situés en Mésopotamie entre les vallées du Tigre et de l'Euphrate, auraient été commandés par le roi Nebuchadnezzar II au VIe siècle av JC. Ces jardins auraient été construits pour son épouse Amytis afin de l'égayer en lui rappelant la végétation de sa terre natale, la Médie, située en Iran occidental (Dunnett et al., 2010; Bernier, 2011b). Plus tard, les oliviers et les vignes ont été cultivés à dessein pour escalader les murs des bâtiments dans les villes des empires grec et romain. Cette pratique a perduré dans de nombreuses régions du globe (Newton et al., 2004). Dans les années 1920, les pergolas, les structures en treillis et les plantes grimpantes ont été promus par les Britanniques et les États-Uniens. En 1988, le câble en acier inoxydable est introduit dans la réalisation de façades végétalisées (Abdullahi et al., 2016).

Figure 3.1 Les Jardins suspendus de Babylone, une des premières manifestations connues de végétation sur la façade. Knab,.F(1886) [peinture]. https://docs.google.com/document/d/1bdUZ6y5tuPGhwT5yKTMjyFDkBI9-lUY5/edit#

L'invention du VGS moderne peut être attribuée à Stanley Hart White. Celui-ci développe un prototype de « briques botaniques », des unités en forme de briques recouvertes de plantes dont il dépose le brevet en 1938 sous le nom de « Structure et système architecturaux porteurs de végétation » (Hindle, 2012; Besner, 2016). Ensuite,

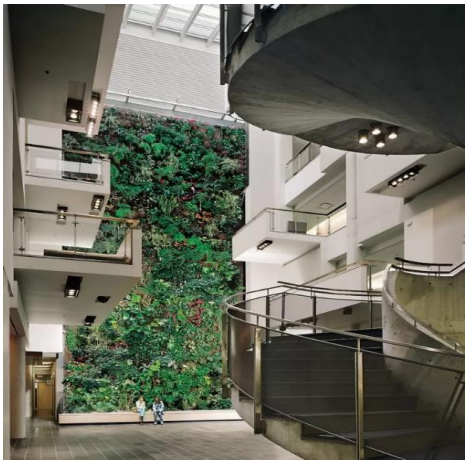
en 1988, le botaniste français Patrick Blanc dépose un brevet pour son « Mur Végétal » ou jardin vertical. Dans cette approche, le système est dissocié du bâtiment. Il se compose d'un cadre métallique autoportant ou chevillé à la façade qui maintient une feuille de pvc expansé à laquelle est agrafé un feutre synthétique dans lequel les plantes s'enracinent. L'irrigation est couplée à un distributeur de nutriments et s'effectue mécaniquement grâce à un tuyau régulièrement percé (Blanc, 2008; Agaajani, 2013). Patrick Blanc a réalisé, à ce jour, plus de 200 murs végétalisés. Parmi ses œuvres les plus célèbres, on peut citer le mur végétalisé du musée du Quai Branly réalisé en 2004, qui s'étend sur 1022 m2 et se compose de 376 espèces végétales (Fig 3.2). En 2013, il réalise l'oasis d'Aboukir, un mur végétal de 250 m2 qui se compose de 237 essences différentes et dont l'ensemble ressemble à des vagues vertes géantes (Fig 3.3).

Figure 3.2 À gauche: musée du Quai Branly à Paris par Patrick Blanc Halble, R. (s.d). Musée du quai Branly/Atelier Jean Nouvel [Photographie]. Archdaily. https://www.archdaily.com/914842/musee-du-quai-branly-ateliers-jean-nouvel

Figure 3.4 Mur vivant de L'oasis d'Aboukir à Paris par Patrick Blanc
Blanc, P. (s.d). L'oasis d'Aboukir Living Wall, Paris, by Patrick Blanc [Photographie]. Omrania. https://omrania.com/insights/green-walls-how-technology-brings-nature-into-architecture/

Au Canada, le premier mur vivant est conçu en 1994 dans le Life Building à Toronto (Fig 3.4). Ce mur intérieur, fruit de la collaboration entre l'Université de Guelph et CRESTech., utilise un système de biofiltration. Dans ce système, le biofiltre, intégré au système de ventilation, sert à décontaminer l'air ambiant. Ce système se combine à la fonction naturelle de purification de certaines plantes et espèces microbiennes (Bernier, 2011b). La présence de murs végétaux en Amérique du Nord reste très limitée, notamment à cause du climat hivernal (Dunnett et Kingsbury, 2008) et parce qu'on les accuse, souvent à tort, d'endommager le revêtement des bâtiments (CEUM, 2013). Cependant, les murs végétaux sont récemment devenus mieux intégrés et plus populaires dans le contexte nord-américain, grâce aux à l'amélioration des techniques horticoles (Laberge, 2012).

Figure 3.3 Living Wall Biofilter à Toronto par Diamond Schmitt Architects
Evans, S. (s.d). [Photographie]. E-architect. https://www.e-architect.com/toronto/living-wall-



Aujourd'hui, des architectes planifient, dès la conception de nouvelles structures, l'intégration de systèmes de verdure verticale. C'est, par exemple, le cas de la firme d'architecture Mario Cucinella Associates pour le projet Ex Ducati à Rimini, en Italie. Dans ce projet complété en 2008, Mario Cucinella Associates a utilisé du jasmin étoilé (Trachelospermum jasminoides) pour recouvrir les façades avant et latérales du nouveau complexe (Fig 3.5). Il conçoit alors une grille en acier inoxydable fixée en porte-à-faux à la structure pour supporter les plantes (Petty, 2008). La combinaison des grimpeurs organiques et du modèle de support en acier crée une vue accrocheuse et ajoute une valeur esthétique à ce bâtiment. Cette plante grimpante à feuilles persistantes est utilisée pour contrôler et filtrer l'excès de lumière du soleil typique de la région d'Émilie en Italie. La végétation peut agir comme un filtre naturel, augmenter le confort visuel et la lumière tachetée crée un environnement agréable pour les employés de bureau (Petty,2008). L'espacement de la grille de support, associé à un programme d'entretien régulier, est une bonne réponse pour dissimuler et obscurcir les fenêtres avec de la végétation dans un contexte climatique tempéré chaud (Petty, 2008).

Figure 3.5 Application de jasmin étoilé sur les façades avant et latérales du complexe Ex Ducati.Archdaily (2009, 27 mars). [Photographie]. Dans Ex Ducati/Mario Cucinella Architects. https://www.archdaily.com/16863/ex-ducati-mario-cucinella-architects

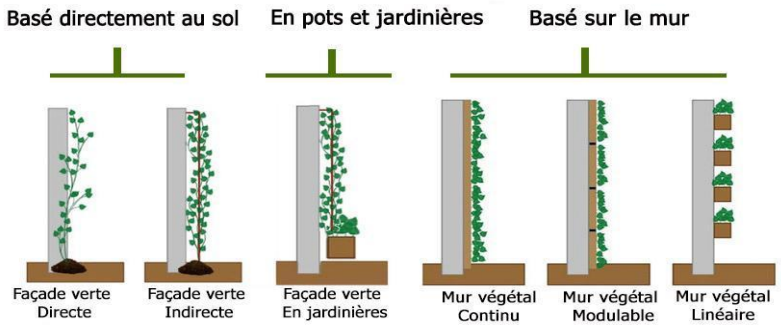
3.2 Classifications des systèmes de verdure verticaux

Les systèmes de verdure verticale peuvent être classés sous deux grandes catégories, qui dépendent de l'emplacement du milieu de culture: les façades vertes (plantes grimpantes) ou les murs vivants (Fig 3.6) (Safikhani et al., 2014). Le milieu de culture est l'endroit où les racines des plantes trouvent leur nutriment (Binabid, 2010). Une façade verte fait référence à une culture au sol. Les plantes enracinées dans le sol poussent verticalement sur ou contre le mur et recouvrent les surfaces verticales. Les murs vivants, quant à eux, font référence à une culture qui ne dépend pas d'un enracinement au sol. En fait, le substrat conventionnel est substitué par un système d'irrigation qui nourrit les plantes en leur distribuant, à travers les capillarités des membranes géotextiles, un liquide riche en éléments nutritifs (Bernier, 2011b). Quelle que soit leur catégorie, les SVV se composent traditionnellement de plantes qui grimpent le long de la façade. Afin d'éviter les problèmes potentiels liés à l'intégration d'organismes vivants à un bâtiment, ces systèmes ont tendance à séparer les plantes de la surface de la façade. Les structures de soutènement appliquées assurent l'ensemble du développement des végétaux sur toute la surface de la façade (Pérez et al., 2011).

Figure 3.6 Façade verte (à gauche) et mur vivant (à droite), inspiré de Safikhani et al. (2014).

Kromose et al (2020) classifient les murs verts verticaux en fonction du milieu d'enracinement. Cette classification différencie l'enracinement directement dans le sol de l'enracinement dans un pot ou une jardinière installée contre un mur (Fig 3.7). Manso et al. (2015) divisent la façade verte en systèmes directs et indirects. Les systèmes directs utilisent traditionnellement des plantes grimpantes auto-agrippantes alors que les systèmes indirects comprennent une structure de support verticale pour le développement des plantes grimpantes. Dans ce système, les plantes peuvent être enracinées directement dans le sol ou dans des jardinières et être guidées pour se développer le long de la structure de support. Les systèmes de végétalisation indirects sont classés en deux sous-catégories: les guides continus et les treillis modulaires (Manso et al., 2015).

Figure 3.7 Schéma des SVV selon le système d'enracinement, tiré de Kromoser et al. (2020).

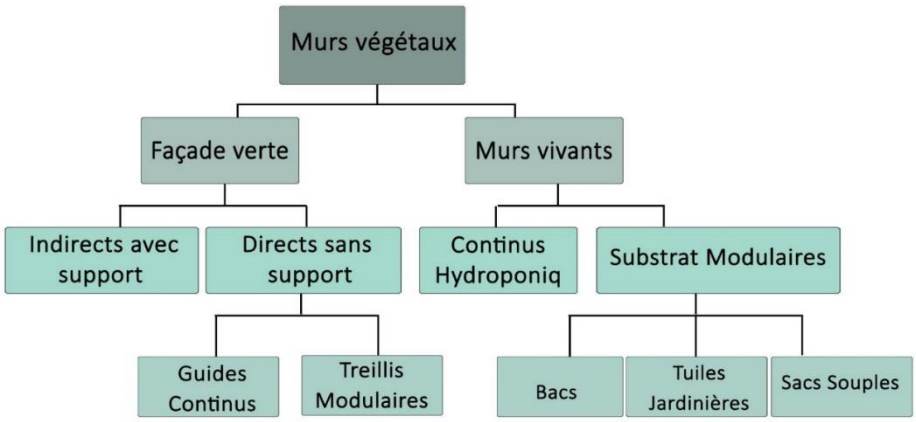


Les guides continus reposent sur une structure de support unique qui oriente le développement des plantes sur toute la surface. Les façades végétalisées avec des treillis modulaires sont des solutions similaires aux systèmes de guides continus, mais sont obtenues en installant plusieurs éléments modulaires le long de la surface. Les treillis modulaires ont des récipients pour l'enracinement des plantes et une structure de support individuelle pour guider le développement des plantes (Binabid, 2010).

La deuxième forme de murs vivants, plus sophistiquée, fait appel à la technique de l'hydroponie, où les plantes s'alimentent à partir d'un système d'irrigation d'eau en goutte à goutte ou en flux développé par Patrick Blanc. Dans ce « dispositif pour la culture sans sol des plantes sur une surface verticale » (Bernier, 2011b), le substrat conventionnel est substitué par un système d'irrigation qui nourrit les plantes en leur distribuant, à travers les capillarités des membranes géotextiles, un liquide riche en éléments nutritifs (Bernier, 2011b).

De leur côté, les systèmes de murs vivants peuvent être classés comme continus ou modulaires, selon leur méthode d'application. Les systèmes de murs vivants continus sont basés sur l'application d'écrans légers et perméables dans lesquels les plantes sont insérées individuellement (Corradi, 2010; Bribach et al.,2012). Les systèmes de murs vivants modulaires ont des différences dans leur composition, leur poids et leur assemblage. Ils peuvent se présenter sous forme de bacs, de tuiles jardinières ou de sacs souples. Les sacs souples comprennent un support de culture et des matériaux légers qui permettent l'application de végétation sur des surfaces de différentes formes, comme des surfaces courbes ou inclinées (Fig 3.8) (Manso et al., 2015).

Figure 3.8 Récapitulatif des catégories de murs végétaux, inspiré de Bernier (2011b) et Manso et al. (2015)



3.3 Avantages des systèmes de verdure verticale ou SVV

L'implantation de végétation sur les façades des bâtiments s'inscrit dans le principe de l'ingénierie écologique (Odum, 1995). Blouin (2014) traduit le concept d'ingénierie écologique d'Odum par « toutes les situations où l'énergie fournie par les humains est réduite par rapport aux sources naturelles d'énergie, cependant suffisante pour avoir des impacts forts sur les patrons et les processus qui en découlent » (Odum, 1995). Comme l'explique Blouin (2014), Odum proposait une nouvelle façon d'agir sur le monde par et pour la biodiversité. En ce sens, les systèmes de verdure verticale ou SVV peuvent être considérés comme des organismes ingénieurs dont l'objectif est de modifier l'environnement par la nature pour améliorer la disponibilité des ressources.

Toutes les façades végétalisées ne procurent pas les mêmes avantages. Les différents types de systèmes verts verticaux ont des coûts et des avantages différents. Les caractéristiques physiques des plantes et les feuilles des différentes espèces végétales varient en termes de surface, d'épaisseur, de densité du feuillage, des tailles, des feuilles de pores stomatiques et d'adaptation morphologique au climat actuel

En general,les avantages des systèmes de verdure verticale sont discutés dans la section qui suit. Ces avantages sont séparés en trois parties : environnementaux, économiques et sociaux (Safikhani et al., 2014) (Tableau 3.1).

3.3.1 Bénéfices environnementaux des systèmes de verdure verticale

Cette section aborde les principaux avantages environnementaux des systèmes de verdure verticale. Ces avantages sont regroupés sous quatre grands thèmes : la régulation de températures et l'isolation thermique, la qualité de l'air, l'acoustique et la biodiversité.

3.3.1.1 Régulation de températures et isolation thermique

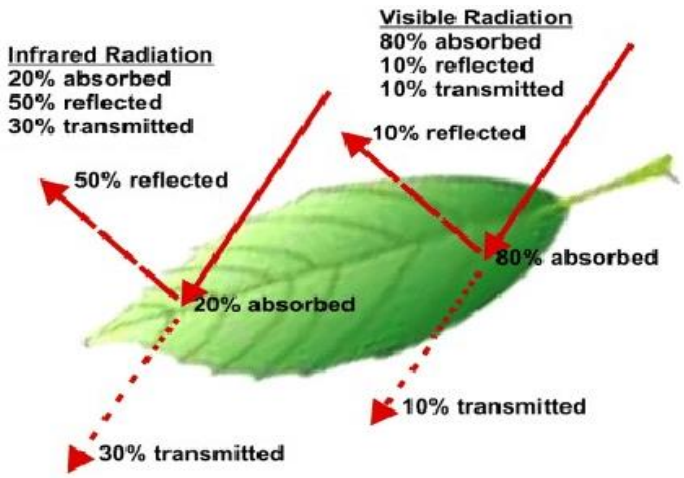
L'un des premiers avantages environnementaux des systèmes de verdure verticale est la régulation de la température en ville. Les zones urbaines sont composées de microclimats. Ces microclimats urbains ont tendance à être significativement plus chauds que les zones environnantes (Bernier, 2011; Akbari et al., 2001). Outre cet écart entre zones, la température dans les villes augmente aussi dans le temps. À titre d'exemple, Akbari et al. (2001) expliquent que la température du centre-ville de Los Angeles a augmenté de 2.5 degrés Celsius entre 1920 et le début des années 2000. Cette augmentation localisée de la température est connue sous le nom d'effet d'îlot de chaleur urbain. L'imperméabilisation des surfaces, la diminution des surfaces d'évaporation, le manque de couvert végétal, l'utilisation de matériaux de recouvrement sombres et minéralisés, l'activité anthropique, la forme urbaine et architecturale participent de l'augmentation des températures en ville (Bernier, 2011). La consommation excessive d'énergie, la pollution de l'air et les impacts négatifs sur la santé humaine sont les conséquences les plus importantes de ce réchauffement urbain. Pour réduire efficacement les effets d'îlot de chaleur, des chercheurs proposent l'implantation de plus de végétation et l'augmentation de l'albédo dans l'environnement urbain (Price et al., 2015; Bernier, 2011; Sheweka et al., 2001). L'albédo est la quantité de rayonnement solaire réfléchie par une surface. Plus l'albédo est faible, plus la surface absorbe les rayons et les transforme en chaleur, réchauffant ainsi l'atmosphère. C'est particulièrement le cas des surfaces sombres et minérales. Inversement, les surfaces blanches réfléchissent le rayonnement solaire et n'accumulent donc pas de chaleur. Pour augmenter l'albédo, il faudrait donc remplacer les revêtements sombres par des revêtements clairs, dits « froids » (surfaces avec un albédo ou un indice de réflexion élevé) (Abkari et al., 2001). Cependant, les surfaces plantées restent plus efficaces que les surfaces à albédo élevé. En effet, malgré leur albédo faible, l'eau et la végétation limitent les effets des radiations et de l'énergie solaires grâce à l'évaporation et l'évapotranspiration. Elles alimentent l'atmosphère en vapeur

d’eau, proportionnellement à l'énergie thermique envoyée par le rayonnement solaire, ce qui revient à dire que plus il y a de chaleur, plus la végétalisation va générer de vapeur d'eau. Cette vapeur d'eau se transforme en nuage et en pluie, rafraîchissant ainsi les sols (Louafi et Abdou, 2013). Contrairement aux surfaces claires, les végétaux ne font pas que limiter le réchauffement. Ils agissent aussi comme des climatiseurs naturels.

Les systèmes de verdure verticale extérieurs aident non seulement à modérer la température dans la zone dans laquelle ils sont implantés grâce à l'évapotranspiration, mais aussi la température dans le bâtiment, en empêchant les surfaces qu'ils recouvrent d'absorber de la chaleur. C'est pourquoi, ces solutions sont plus efficaces que les dispositifs d'ombrage conventionnels, tels que les stores, pare-soleil, persiennes et auvents (Stec et al., 2005). Comme l’explique Johnston et Newton (2004), de nombreuses espèces de plantes grimpantes lèvent leurs feuilles en réponse à l’angle élevé du soleil d’été, créant un effet de ventilation qui refroidit l'air. L'air frais est alors aspiré vers l'intérieur alors que l’air chaud est envoyé vers le haut. De plus, la végétation fournit de l'ombre et bloque le spectre du rayonnement solaire, ce qui améliore les performances thermiques à l'intérieur du bâtiment. Alors que 80% de la longueur d'onde visible de l'énergie solaire est absorbée par les feuilles des plantes pour la photosynthèse, 80% du rayonnement infrarouge solaire est réfléchi ou transmis à travers les feuilles (Fig 3.9) (Brown et Gillespie, 1995). La différence entre les températures intérieures et extérieures crée un besoin d'isolation pour minimiser cet échange thermique. L'effet d'isolation des plantes, en particulier des espèces à feuilles persistantes en hiver, se produit par l’emprisonnement d’une couche d'air devant la façade qui réduit les pertes de chaleur par convection. Les chercheurs ont enregistré un

effet isolant allant jusqu'à 30 % lorsque la température approche du point de congélation (Johnston et Newton, 2004; Bernier, 2011).

Figure 3.9 Absorption, transmission et réflexion des feuilles, tiré de Brown et Gillespie (1995).



3.3.1.2 Qualité de l'air

Un des autres bienfaits de la présence d'arbres en ville est lié à leur capacité à purifier l'air. En effet, ils produisent de l'oxygène tout en absorbant plusieurs polluants atmosphériques et métaux lourds. Dans ce cas, la végétation sert de filtre à poussière, d'humidificateur et génère de l'air froid (Sheweka et al., 2012; Bernier, 2011; Meas, 2016). Grâce à la photosynthèse, les plantes consomment du dioxyde de carbone, dont une grande partie de l'émission est liée à l'activité humaine, et libèrent de l'oxygène. Cela rafraîchit l'air tout en réduisant les effets des émissions de dioxyde de carbone sur la santé.

Tout comme la plantation d'arbres, la verdure verticale agit comme un filtre naturel. Elle empêche la pénétration de la pollution et de la poussière dans les bâtiments et purifie l'air intérieur (Wolverton et al., 1989). Lorsque le couvert végétal est élevé, elle peut même filtrer les virus (Wolverton et al., 1989). Les plantes grimpantes, telles que

la vigne vierge (Parthenocissus tricuspidata) et le lierre grimpant (Hedera helix) sont capables de capturer environ 4 à 6 g de particules par mètre carré en une seule saison de croissance, en raison de leur indice foliaire élevé (Johnston et Newton, 2004; Petty, 2008). De nombreuses expérimentations ont montré le potentiel de certaines plantes, telles que le lierre grimpant (Hedera helix), le lierre du diable (Epipremnum pinnatum), le pothos (Epipremnum aureum), le lys de la paix (Spathiphyllum 'mauna loa'), l'aglaonema (Aglaonema modestum) ou encore le palmier bambou (Chamaedorea seifrizii), pour la filtration de l'air et l'élimination de polluants organiques, tels que le benzène, le formaldéhyde ou le trichloroéthylène (Wolverton et al., 1989; Irga et al., 2018). Les efforts pour augmenter la capacité des systèmes de purification de l'air en utilisant des plantes en pot ont probablement inspiré le développement de systèmes de murs verts actifs ultérieurs (Wolverton et al., 1989 ; Irga et al., 2018).

3.3.1.3 Acoustique

L'utilisation de surfaces dures constituées de matériaux tels que le béton, la pierre et la brique, a tendance à refléter les sons. Au contraire, la végétation a la capacité d'absorber les sons et de réduire le bruit. Elle agit comme un système d'isolation acoustique naturel (Pérez et al., 2016). Selon Bernier (2011), plus les plantes ont un indice de surface foliaire élevé, plus l'isolation est efficace.

3.3.1.4 Biodiversité

Le développement urbain a des conséquences dévastatrices sur la faune urbaine, comme la fragmentation de l'habitat. La disparition de la flore ne laisse plus d'abris et de sites de nidification pour les animaux. L'utilisation de la végétation, en milieu urbain, sur les toits et les façades, peut créer des corridors écologiques. Ces corridors écologiques aident à relier les espèces animales à leurs habitats naturels et offrent un refuge à des espèces qui s'étaient éloignées de l'environnement hostile de la ville (Bernier, 2011; Petty, 2008). Elle fournit également des sites d'hibernation précieux,

du nectar et des graines pour les oiseaux et les insectes, tels que les papillons. Comme les bâtiments adaptés aux conditions climatiques locales représentent le caractère unique du lieu, le choix de végétaux indigènes prend encore plus de sens. D'une part, ils maximisent la survie et l'autonomie des végétaux et, d'autre part, ils honorent et donnent de la visibilité à la spécificité du lieu (Bernier, 2011). Les espèces indigènes améliorent également la biodiversité et créent un environnement dynamique qui attire la faune (Johnston et Newton, 2004).

3.3.2 Bénéfices sociaux des systèmes de verdure verticale

Cette section aborde les principaux bénéfices sociaux des systèmes de verdure verticale. Ces avantages sont regroupés sous trois grands thèmes : la santé, l'esthétique et l'identité.

3.3.2.1 Santé

La végétation dans les villes et, par prolongement, les jardins verticaux favorisent le contact visuel avec les éléments de la nature et renforcent le concept de biophilie. La biophilie est définie comme la prédisposition inhérente de l'humain à se connecter aux processus et systèmes naturels (Kellert et al., 2008). Dans cette perspective, l'exposition aux éléments de la nature est une condition au bon fonctionnement de l'humain (Soga et Gaston, 2016). Comme l'expliquent Sauzet et Younès (2003), le « désir de nature qui hante les urbains est bien autre chose qu'une nostalgie de la vie villageoise ou un refus de la ville. Il se développe en même temps que se généralise le monde urbain comme si les forces de la culture se devaient de se connecter à celles de la nature pour que le monde reste habitable » (traduction de l'auteure). Dans les villes, les éléments naturels sont engloutis par une mer de structures humaines. À cet égard, les pratiques de jardinage vertical imprègnent les domaines de l'artificiel à un degré d'unité qui avait été perdu, répondant ainsi aux réalités de la vie moderne et au désir initial de l'homme pour des paysages naturels. L'impact de la connexion avec les

éléments naturels et la biophilie ont fait l'objet de nombreuses recherches. Ces recherches indiquent que les expositions à des scènes et des environnements naturels ont de nombreux effets positifs, notamment sur la santé mentale et physique (Safikhani et al., 2014; Frumkin, 2001; Ulrich, 1981; Schiebel et al., 2022; Shibata et Suzuki, 2004; Wong et al., 2010). Par exemple, en 1991, Ulrich et al. ont mené une étude sur des étudiants. Ils ont constaté que le fait de voir la végétation à travers la fenêtre ou même de regarder de simples images avec une végétation dominante pouvait réduire les symptômes d'anxiété et de stress causés par les examens (Ulrich et al., 1991).

3.3.2.2 Esthétique

Les systèmes de verdure verticale augmentent la valeur ornementale des bâtiments. Les individus sont particulièrement sensibles aux effets visuels et sensoriels créés par la verdure verticale. D'ailleurs, de nombreuses recherches s'accordent sur le fait que les individus préfèrent les espaces naturels aux espaces construits (White et Gatersleben, 2010). Quelques-unes s'attardent sur la question de la végétation intégrée au bâtiment (White et Gatersleben, 2010). En 2010, White et Gatersleben conduisent une enquête exploratoire au Royaume-Unis auprès de près de 200 participants. Cette enquête vise à comparer le niveau de préférences et les perceptions des individus entre des bâtiments avec et sans végétation intégrée. Les résultats montrent que les bâtiments végétalisés viennent satisfaire des besoins humains d'esthétique, mais que l'attrait esthétique possède aussi des degrés de satisfaction différents selon le type de végétaux, la traditionnalité, la couleur, la texture, la hauteur, la condition, le niveau d'entretien, la naturalité et l'harmonie perçue de l'ensemble.

En 2014, Abdul-Rahman et al. mènent une enquête similaire en Malaisie auprès de 40 participants, pour mesurer leur degré de satisfaction des systèmes de verdure verticale intégrés à trois bâtiments existants dont ils sont les usagers. Bien que l'enquête mette en évidence une méconnaissance des bénéfices environnementaux des SVV, elle montre aussi l'attrait esthétique des SVV pour les usagers. Ces derniers considèrent

que, lorsque l'application est stratégique et mesurée, les SVV embellissent le bâtiment et le quartier, éveillent les sens et ramènent l'harmonie de la nature en ville.

3.3.2.3 Identité et communauté

Le sens de la communauté est un autre avantage du verdissement des villes. Des études ont démontré que l'exposition à un environnement naturel et le contact direct avec la nature favorisent une éthique environnementale et une volonté d'afficher un comportement pro-environnemental (Soga et Gaston, 2016). L'expérience de la nature, par la pratique individuelle du jardinage par exemple, améliore le lien émotionnel du citadin avec son environnement. L'individu envoie, non seulement, un message personnel de responsabilité sociale et environnementale (Bernier, 2011), mais participe aussi de l'augmentation de l'engagement de la communauté envers la nature (Soga et Gaston, 2016). Les projets de verdissement de bâtiments institutionnels, publics et privés deviennent aussi des moyens pour les entreprises privées et les institutions d'affirmer leur adhésion à des valeurs chères à la communauté (Trottier, 2008). L'aspect identitaire se manifeste alors à travers les valeurs écologiques affichées dans l'architecture (Robertson, 1991). Dans cette perspective, les façades végétalisées proposent une expérience biophilique qui ne nécessite pas ou peu de surface d'emprise au sol, ce qui constitue un avantage dans un contexte où les terrains vacants subissent une forte pression immobilière (Trottier, 2008). De plus, une ville qui démontre sa responsabilité et son respect de l'environnement par des incitations à rendre les bâtiments plus verts contribue également à créer un sentiment de fierté et un sens de la communauté chez les citoyens. De telles mesures, si elles sont mises en œuvre, peuvent même stimuler le tourisme (Bernier, 2011).

De plus, les fluctuations saisonnières et annuelles inhérentes à tous les jardins peuvent véhiculer un message profond sur le passage du temps. Selon Robertson (1991), les plantes, en influençant la perception humaine du temps, créent des expériences riches et complexes grâce à des mécanismes qui ne transmettent qu'une abstraction uniforme

du temps d'horloge. Les plantes rappellent trois conceptions distinctes du temps : linéaire, cyclique et immanent. D'abord, on prend conscience de la notion « linéaire » du temps à travers l'observation physique et les fonctions physiologiques des plantes. Cela démontre l'écoulement infini et linéaire du temps dans lequel nous sommes des passagers. De plus, les plantes ont le potentiel d'augmenter la conscience des saisons qui passent et donc de vivre le temps comme un phénomène « cyclique ». Enfin, l'observation des effets fugaces des plantes, comme la chute des pétales ou le jeu de la lumière du soleil sur les feuilles des plantes, favorise la sensibilité au moment présent ou à la notion « immanente » du temps (Robertson, 1991). Tout ce qui précède conduit à une plus grande harmonie, à la fois physique et mentale, avec la nature.

Les plantes et les arbres sont aussi chargés de sens et deviennent de véritables symboles culturels et identitaires. Bernier donne l'exemple de l'Ivy League, un groupe de huit universités du nord-est des États-Unis. Le lierre (ivy en anglais), qui orne les murs des bâtiments de pierre de ces universités, devient le symbole de leur ancienneté, leur origine britannique, leur renommée et leur prestige (Bernier, 2011a). Par son architecture et ses murs recouverts de vignes, l'Université McGill reprend la symbolique de l'Ivy League (Fig 3.10) (Bernier, 2011a), une manière de se positionner sur l'échiquier des universités les plus prestigieuses d'Amérique du Nord. Les plantes grimpantes sont des symboles de Montréal. Elles créent un sentiment d'appartenance, car elles recouvrent de nombreuses façades dans les quartiers centraux de Montréal.

Figure 3.10 Murs de l'Université McGill recouverts de plantes grimpantes, comme élément symbolique du bâtiment éducationnel à Montréal.

Par leur présence, elles valorisent l'identité du lieu, la culture et le patrimoine montréalais.

3.3.3 Bénéfices économiques des systèmes de verdure verticale

Les avantages de la façade verte ne se limitent pas aux aspects environnementaux et sociaux. L'implantation de systèmes de verdure verticales génère aussi des bénéfices économiques, non seulement pour les utilisateurs et les propriétaires de bâtiments, mais aussi pour les villes. D'une part, les systèmes de verdure verticale, qui entrent dans la catégorie des rénovations écologiques, sont plus économiques que la démolition et la reconstruction (Birkeland, 2009). Ils sont aussi plus économiques que les toits verts (Bernier, 2011a), particulièrement dans le cas des toits verts intensifs (Trottier, 2008). Ces derniers ne peuvent être implantés sans l'expertise de professionnels et sans avoir déterminé l'accessibilité et la capacité portante du bâtiment. Les coûts associés à la construction ou au renforcement d'un toit, afin que ce dernier soit capable de supporter la charge supplémentaire que constitue l'implantation d'un toit vert intensif, sont très importants et s'ajoutent aux coûts des matériaux, de l'installation, de l'aménagement et de l'irrigation (Trottier, 2008). La verdure verticale s'avère moins compliquée, moins chère, plus efficace en matière de bénéfices et plus accessible physiquement et visuellement que des projets de toit vert ou de toiture réfléchissante.

L'implantation de verdure verticale, en raison de l'attrait esthétique, permet aussi de bonifier la valeur foncière des bâtiments (Trottier, 2008). En effet, plusieurs études montrent que le verdissement, quelle que soit sa typologie, fait augmenter la valeur de vente des bâtiments alentour (Vachon, 2016). Elle génère aussi des retombées économiques pour les entreprises et la ville, en attirant la clientèle et les touristes (Trottier, 2008). Bernier (2011a) donne l'exemple du pub Sainte-Élizabeth (Fig 3.11) à Montréal, réputé pour sa terrasse cachée dans sa cour intérieure dont les murs sont recouverts de vigne vierge. Beaucoup de commerces ont depuis investi dans

l'aménagement de verdure dans les terrasses, sur les toits et les murs pour embellir leur espace de vente.

Figure 3.11 Les murs recouverts de vigne vierge dans la cour intérieure du pub Sainte-Elizabeth, Montréal

Enfin, la façade verte est avantageuse en termes d'économie d'énergie et d'eau. En effet, elle améliore l'efficacité énergétique du bâtiment, favorisant une réduction de la consommation, de la demande d'électricité et donc de la demande en énergie. Comme il a été souligné dans les bénéfices environnementaux, un système d'ombrage approprié permet de diminuer la température dans les bâtiments pendant les saisons chaudes et de retenir la chaleur pendant les saisons froides. Ceci conduit finalement à une réduction de la demande d'énergie de refroidissement et de chauffage (Shahidan et al., 2010; Schmidt, 1964; Trottier, 2008).

La façade verte réduit également les coûts liés à la gestion de l'eau pluviale. En augmentant la capacité d'infiltration et de rétention d'eau du sol, la façade verte permet de réduire le volume des eaux pluviales rejetées dans les égouts et ainsi, de réduire les coûts de la collecte et du traitement des eaux usées (Trottier, 2008).

La section suivante passe en revue les études sur les performances thermiques et le potentiel de réduction énergétique des systèmes de verdure verticale (Tableau 3.1).

Tableau 3-1 : Résumé des bénéfices des systèmes de verdure verticale.

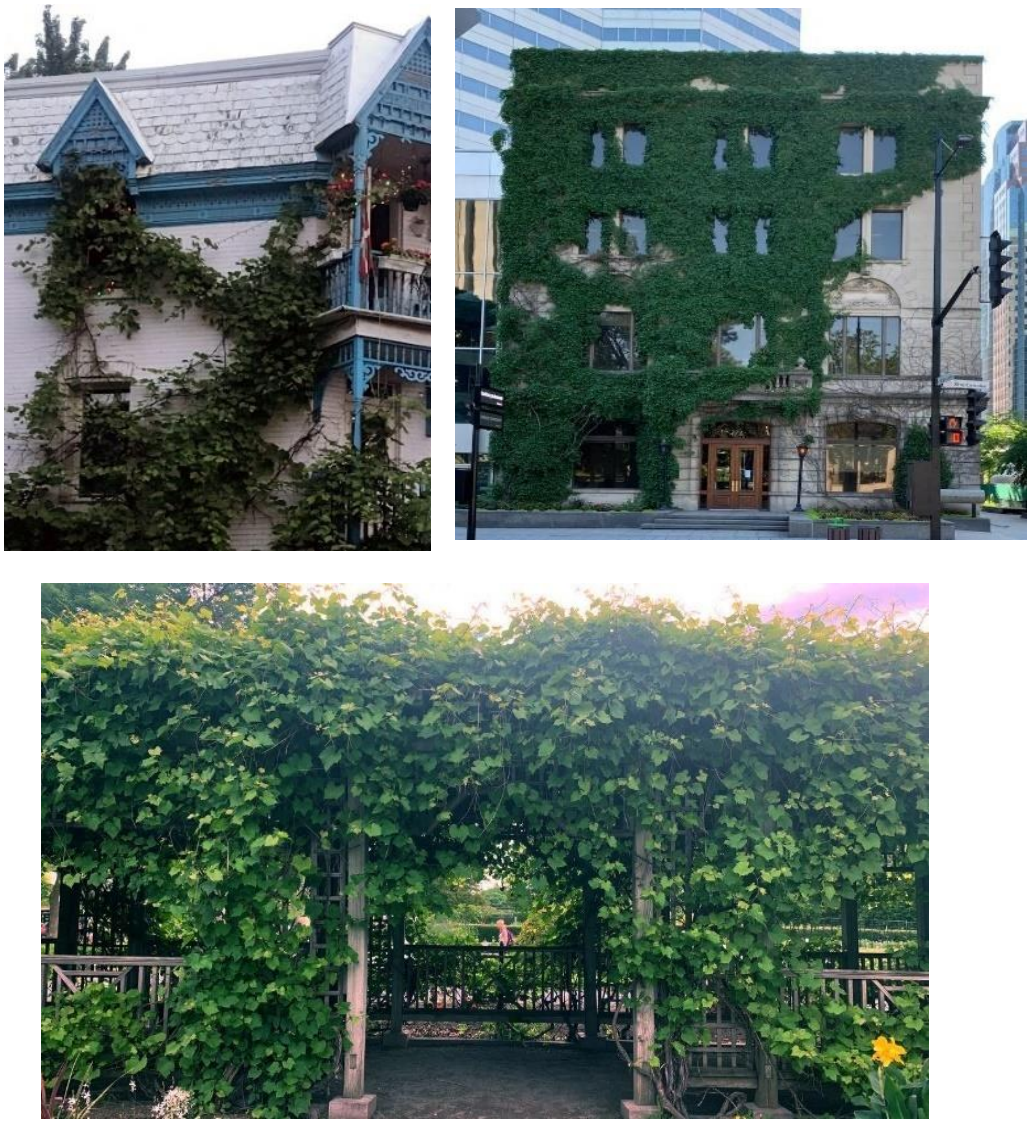
Avantages environnementaux	Avantages sociaux	Bénéfices économiques
-Réduction des effets d'îlot de chaleur (Akbari et al., 2001) -Régulation du microclimat (Johnston et Newton, 2004) -Régénération de l'habitat faunique et augmentation de la biodiversité (Johnston et Newton, 2004) -Filtration de l'air contre la poussière et les virus (Johnston et Newton, 2004; Wolverton et al., 1989) -Réduction du bruit par absorption, diffraction et réfléchissement du son (Pérez et al., 2016)	-Amélioration de la valeur esthétique et identitaire du bâti et de l'environnement urbain (Bernier, 2011; Johnston et Newton, 2004) - Amélioration de la santé physique et psychologique, des performances et réduction du stress et de l'anxiété (Ulrich, 1991; Shibata et Suzuki,2004; Wong et al.,2010) -Connexion avec la nature (impact biophilique) (Akbari et al., 2001) -Amélioration du rapport au temps (Robertson, 1991)	-Augmentation de la valeur des propriétés (Vachon, 2016; Trottier, 2008) -Réduction des charges de refroidissement grâce à l'ombrage et à une meilleure isolation (Shahidan et al., 2010; Schmidt, 1964; Trottier, 2008). -Réduction de la demande en électricité par l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments (Kim et al., 2012) - Prestations de rénovation sans coût de démolition et de reconstruction (Birkeland, 2009)

3.3.4 Bénéfices énergétiques et performance de la lumière des systèmes de verdure verticale

Des chercheurs ont étudié les effets des Systèmes de Verdure Verticale (SVV) sur la performance thermique, lumineuse et énergétique des bâtiments. Ces recherches

mentionnent que la variété, la croissance et la densité des plantes ainsi que le climat ont une incidence notoire sur l'efficacité des dispositifs. Bien qu'il soit possible de sélectionner une très grande variété de plantes dans la conception de SVV, les plantes ligneuses restent généralement les plus adaptées et utilisées pour couvrir une façade verte. Ces plantes sont généralement utilisées pour habiller trois éléments architecturaux: les façades, les espaces intermédiaires et la fenestration (Fig 3.12).

Figure 3.12 Application de la végétation au Québec dans trois espaces différents : en haut à gauche, sur les fenêtres; en haut à droite, sur les façades et, en bas, comme espaces intermédiaires.



3.3.4.1 Application de végétation sur les façades

3.3.4.1.1 Climat méditerranéen

De 2014 à 2015, une étude a été menée par le département des sciences de l'architecture de l'Université de Gênes et le RSE SpA sur les effets positifs d'une enveloppe verte dans un contexte méditerranéen densément urbanisé. Pour l'étude, une façade verte a été installée sur un immeuble à bureaux appartenant à L'Institut national d'assurance sociale et situé en plein centre-ville de Gênes, en Italie. L'étude comprenait une évaluation en matière de refroidissement en été, de chauffage en hiver, d'amélioration de la qualité de l'air et de durabilité économique et environnementale et une enquête auprès des travailleurs et du voisinage. Cette étude comprenait des inspections avant et après l'installation pour évaluer si l'entrée d'éléments externes avait des effets déstabilisants sur l'environnement intérieur. Des questions sur les effets positifs et négatifs de l'enquête ont été incluses. Bien que la plupart des personnes interrogées aient déploré l'augmentation de la présence d'insectes, ils ont noté une amélioration substantielle de la qualité de l'air (Magliocco et al., 2015).

En 2011, Pérez et al. ont étudié la croissance sur treillis d'espèces telles que le lierre, le chèvrefeuille, la vigne vierge et la clématite et comparé leur capacité à fournir de l'ombre dans un climat continental méditerranéen sec. L'objectif de cette recherche était de déterminer la réduction de température selon le type de plante et les différentes densités de feuillage. Le lierre et le chèvrefeuille avaient la meilleure croissance en hauteur, mais la densité du feuillage du chèvrefeuille dépendait fortement de la région. La vigne vierge avait une meilleure densité de feuillage, mais la première année, ce type de plante pousse lentement sur un treillis. De son côté, la clématite ne paraissait pas être adaptée au climat méditerranéen continental et avait la pire croissance (Pérez et al., 2011).

3.3.4.1.2 Climat subtropical

Pendant l'été 2016, Lee et Jim (2019) ont analysé les performances du chèvrefeuille du Japon (Lonicera japonica) pour comprendre les régimes thermiques et radiatifs des murs végétaux grimpants, dans un climat subtropical. Les données ont été recueillies à partir de positions extérieures et intérieures à un bâtiment servant de sous-station électrique, à Hong Kong. Pour la conception du mur vert, un système de jardinière rotative a été proposé avec une protection végétale réglable pour optimiser les effets thermiques diurnes et nocturnes. Le résultat de l'expérience montre que le plus grand avantage thermique du mur vert est réalisé sur la surface extérieure du mur en béton derrière la végétation grimpante avec un refroidissement maximal de 6,6 K par temps ensoleillé. Ils concluent qu'en ajustant l'alignement de la canopée grimpante, le système fournit de l'ombrage pendant la journée et augmente le refroidissement radiatif et convectif pendant la nuit pour optimiser les avantages thermiques dans un cycle diurne.

3.3.4.1.3 Climat tropical

Sunakorna et Yimprayoona (2011) ont étudié l'utilisation de plantes grimpantes comme dispositifs d'ombrage verticaux pour un bâtiment à ventilation naturelle. Le système était installé sur une façade de la résidence sur le toit de la Faculté d'architecture de Bangkok. Pour ce faire, ils ont installé deux bacs à plantes construits avec des cadres verticaux et un filet pour permettre aux plantes de grimper. Leurs expérimentations sur le processus de croissance et la densité des plantes a montré que la thunbergie à grandes fleurs (Thunbergia grandiflora) était plus avantageuse que la courge écarlate (Coccinia grandis) ou la liane corail (Antigonon leptotus). La thunbergie à grandes fleurs poussait très rapidement, offrait une densité de feuillage conséquente et recouvrait complètement le système grâce à une taille minimale. Les résultats montrent que la température de l'air intérieur de la salle avec façade verte reste inférieure à celle de la salle de contrôle pendant la journée. La façade verte améliore également la ventilation pour une pièce ventilée naturellement. Les auteurs recommandent, cependant, une

combinaison de systèmes de climatisation pour aider à réduire efficacement la charge de refroidissement (Fig 3.13).

Figure 3.13 Salles d'essais sans façade verte à gauche et avec façade verte à droite, tiré de Sunakorna et Yimprayoona (2011).

Pour des performances thermiques maximisées, il est aussi possible de combiner plusieurs systèmes, comme des systèmes sur façade avec des espaces intermédiaires ou avec façade double peau (Annex 3.1).

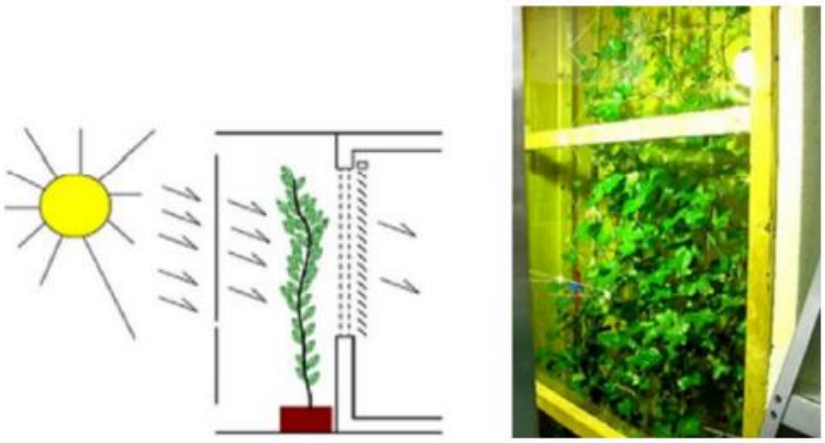
3.3.4.2 Application de végétation sur les espaces intermédiaires

3.3.4.2.1 Climat maritime modéré ou océanique

En 2005, Stec et al. ont réalisé une expérience aux Pays-Bas. Ils ont comparé les performances du lierre (Hedera helix) comme système de verdure verticale, qu'ils ont installé dans la lame d'air de la façade à double peau, à celles de stores installés devant les fenêtres. Les résultats montrent que, globalement, les plantes créent un système d'ombrage plus efficace que les stores. Elles ont la capacité de dissiper le rayonnement solaire, absorbé en chaleur sensible et latente. Surtout en raison du transfert de chaleur latente, la température des feuilles est bien inférieure à celle des stores. La figure 3.14 montre le schéma d'installation des végétaux dans la façade double peau. Les résultats

révèlent également que le mur vivant et la façade verte améliorent le confort thermique bien au-delà de leur proximité. En effet, leurs effets se font sentir dans l'environnement intérieur et extérieur du bâtiment, grâce à la réduction du transfert de chaleur vers et depuis l'enveloppe du bâtiment. Lors de cette expérience, la température de chaque couche de la façade double peau était beaucoup plus basse avec des végétaux qu'avec des stores. Pour le même rayonnement solaire, l'élévation de température de la plante était environ deux fois plus faible que pour les stores. Tout au long de l'expérience, la température de la plante n'a jamais dépassé la température de 35,8°C alors que les stores ont dépassé les 55°C. Selon les calculs de Stec et al. (2005), la quantité d'énergie nécessaire à la climatisation pourrait être réduite jusqu'à 20% grâce à l'utilisation de végétaux dans une façade intérieure double peau.

Figure 3.14 Schéma d'installation des végétaux dans la lame d'air de la façade double peau, tiré de Stec et al. (2005).



3.3.4.2.2 Climat tempéré

Poddar et al. (2017) ont testé l'efficacité du mur végétal comme stratégie d'économie d'énergie de refroidissement et de chauffage en se basant sur trois bâtiments installés sur le campus du KAIST, à Daejeon, en Corée du Sud. Les murs vivants ont été simulés par ordinateur. Pour la simulation, les auteurs ont sélectionné le lierre (Hedera helix) qui est déjà très présent sur le campus. Ils ont évalué le rôle de la couverture du feuillage sur les mouvements de température à l'intérieur des bâtiments et leur incidence sur les coûts énergétiques. Les paramètres ont été mesurés en fonction du calendrier d'occupation, du modèle opérationnel et des caractéristiques physiques des bâtiments tout au long de l'année. Les simulations montrent que l'efficacité thermique et énergétique du mur vivant dépend de plusieurs facteurs. Les auteurs expliquent qu'une trop grande proportion de vitrage sur les façades orientées au sud, à l'est et à l'ouest réduit les avantages de protection des murs vivants contre le rayonnement solaire, en été. Toujours en période estivale, le feuillage, qui protège du vent et limite ainsi l'infiltration d'air, provoque un gain de chaleur. En ce sens, ils font un constat assez similaire à celui de Sunakorna et Yimprayoona, qui expliquaient que la salle avec façade verte se refroidissait plus lentement les soirées d'été, comparativement à la salle de contrôle. À l'opposé, l'effet coupe-vent des façades réduit substantiellement la consommation de chauffage pendant les périodes de chauffage, particulièrement lors de journées venteuses et dont la température est nulle ou inférieure à zéro. La végétation limite alors l'infiltration d'air pendant la nuit et piège l'air chaud dans l'espace créé entre le système et la façade pendant la journée, maintenant ainsi une température plus élevée que la température ambiante. Les auteurs expliquent que les résultats dépendent aussi de la fonction et du mode d'occupation du bâtiment, qui ont une incidence sur les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation. Ainsi, les murs végétaux des dortoirs, comparativement aux bâtiments dédiés à la recherche et à l'administration, obtiennent les meilleurs résultats les nuits en période de chauffage et les journées en période de refroidissement. Tout comme Sunakorna et Yimprayoona,

Poddar et al. (2017) proposent de cumuler les mesures d'économie d'énergie pour améliorer l'efficacité des murs végétalisés. Ils proposent aussi de recouvrir de verdure les ouvertures pour limiter le gain de chaleur en été et la perte de chaleur en hiver.

3.3.4.2.3 Climat méditerranéen (continental)

Pérez et al. (2017) ont étudié l'influence de la densité foliaire et de l'orientation sur les performances thermiques d'un système de végétation verticale. De 2012 à 2015, ils ont mené des expérimentations sur un site pilote appartenant à l'Université de Lleida et situé dans le village de Puigverd de Lleida (Espagne). Les mesures d'efficacité n'ont été réalisées qu'en période estivale en raison de la sélection de la plante, le lierre de Boston (Parthenocissus tricuspidata), qui est une plante au feuillage caduc. Pour l'occasion, ils ont créé deux cubicules identiques, mais dont l'un d'eux possédait un système de façade verte à double peau sur les façades Est, Sud et Ouest. L'autre cubicule servait de modèle de contrôle. Le système à double peau se différencie des façades vertes traditionnelles par l'installation de structures de support légères qui permettent le développement d'une plante sans contact direct avec l'architecture. Dans ce cas-ci, ils ont ancré une maille d'acier légère à 20cm du bâtiment sur laquelle ils ont fait pousser le lierre. Pour mesurer l'efficacité thermique selon la densité foliaire, ils ont calculé l'indice de surface foliaire (LAI), qui est une quantité sans dimension qui caractérise les structures des canopées. Cette quantité est établie par la mesure de la superficie totale des feuilles par unité de surface de mur. D'après les résultats obtenus, les auteurs concluent que la façade à double peau possédait des valeurs de facteur d'ombre comparables aux systèmes créés artificiellement par l'architecture. Cependant, ils remarquent que plus la canopée est importante, plus la température des murs chute. L'installation des façades à double peau sur les orientations Est, Ouest et Sud a permis des économies d'énergie cumulées qui ont atteint jusqu'à 34% sur toute la période estivale, avec un LAI de 3,5 à 4. Pour les auteurs, les SVV contribuent aux économies

d'énergie grâce à l'ombre, à l'évapotranspiration, à la capacité d'isolation des plantes et à son effet coupe-vent.

3.3.4.3 Application de végétation sur les fenestrations

La plupart des recherches ont étudié les systèmes verts verticaux pour les surfaces extérieures telles que les murs extérieurs, les façades à double peau et les balcons. Les façades vertes ont la capacité de couvrir non seulement la zone opaque, mais également les fenêtres et les ouvertures. Peu d'études ont examiné cette option. Pourtant, cette perspective offre une multitude de possibilités pour améliorer les performances thermiques et lumineuses à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment.

3.3.4.3.1 Climat subtropical

Zheng et al (2020) ont imaginé deux systèmes d'ombrage de fenêtres verts mobiles pour contrôler le rayonnement solaire tout en offrant un éclairage doux de jour. Ces systèmes, fixés au mur à l'aide d'un cadre de soutien en alliage d'aluminium, peuvent coulisser, l'un horizontalement et l'autre verticalement, grâce à des rails. Chaque module comprend un bac de plantation léger contenant des substrats et un filet métallique pour soutenir la croissance de la plante. Un système d'irrigation est relié à la jardinière. Afin d'évaluer les performances de ce type de système, des expériences ont été menées, avec des modèles simplifiés fixés sur deux modules identiques situées sur le toit de la faculté d'architecture et d'urbanisme de l'Université de Chongqing, en Chine. Les expérimentations ont été menées sur les fenêtres orientées à l'ouest. Les chercheurs ont relevé la consommation d'énergie de refroidissement et le flux de chaleur selon quatre scénarios : ombrage complet avec persiennes, sans ombrage, ombrage vert avec la courge éponge (Luffa cylindrica) et ombrage vert avec l'épinard de Malabar (Basella Alba). La courge éponge (Luffa cylindrica) est une espèce répandue dans la localité et l'épinard de Malabar (Basella Alba) est une espèce très répandue en Chine. Les plantes ont été transplantées dans les bacs en juillet pour

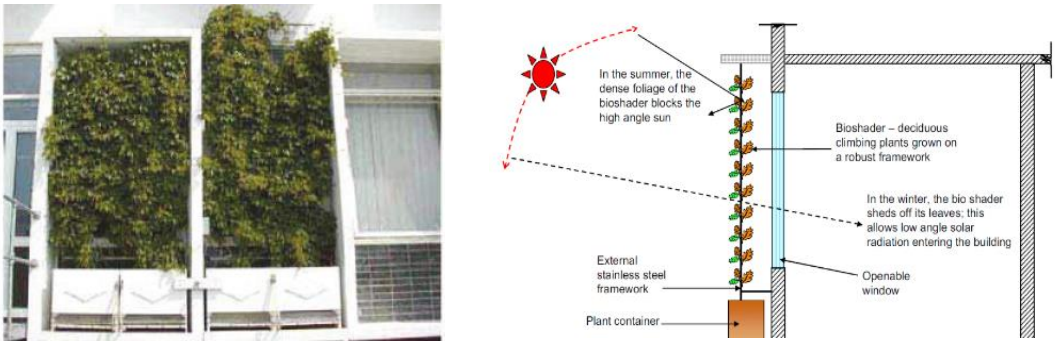
devenir des matériaux d'ombrage verts en août. Les performances d'ombrage ont été mesurées grâce à des panneaux photovoltaïques spécialement conçus pour cette recherche. Les résultats indiquent que la présence d'ombrages verts a réduit l'impact du rayonnement solaire et la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. La consommation d'énergie de refroidissement avec un écran vert était toujours inférieure à celle de la pièce sans ombrage ou avec persiennes. Les auteurs ont constaté que lorsque la position du soleil était la plus haute, la protection solaire des écrans verts était plus faible que lorsque le soleil était plus bas dans le ciel. Cette constatation les a poussés à corréler le positionnement des écrans vert avec celui du soleil, de manière à améliorer leur performance. Ils ont également pu noter que les performances des écrans verts augmentaient avec le rayonnement solaire. Plus le soleil était fort, plus la protection des écrans était grande.

3.3.4.3.2 Climat tempéré océanique

De leur côté, Ip et al. (2020) ont mené une étude pilote pour mesurer les performances d'ombrage d'un couvert vert vertical et les transmissions solaires selon l'épaisseur de la couverture de différentes plantes grimpantes à feuilles caduques. Le dispositif d'ombrage a été conçu à l'Université de Brighton, au Royaume-Uni, et les mesures se sont étalées sur 2 ans (Figures 3.15). Le dispositif se composait de deux plantes grimpantes plantées dans un bac drainé remplie de compost organique et d'une ossature métallique fixée à distance du mur. Sur l'ossature étaient fixées des cordes et des tiges pour permettre la croissance verticale des plantes. Le dispositif a été installé à deux fenêtres d'un bureau de l'université, orienté sud-ouest. La vigne vierge (Parthenocissus quinquefolia) a été sélectionnée en raison de sa croissance vigoureuse et rapide, ses grandes feuilles, sa rusticité et son peu d'entretien. Les observations ont montré une diminution moyenne de la température interne de 3,5 °C, avec des pics allant jusqu'à 5,6 °C, par rapport au bureau voisin. Ceci s'explique non seulement par la protection solaire qu'offre le dispositif végétal, mais aussi par le fait que la plante se maintient et

se régule dans une certaine fourchette de température, ce qui en fait un dispositif plus performant que les dispositifs architecturaux. La transmission solaire variait considérablement selon la densité du feuillage. Une trop grande densité peut bloquer la vue et empêcher la pénétration de la lumière. Pour réduire les effets négatifs, ils proposent, tout comme Zheng et al., des systèmes modulaires qui pourraient suivre le mouvement du soleil et être déplacés selon les besoins (IP et al., 2020).

Figure 3.15 Expérimentation Bioshade dans la salle de test (à gauche) et vue en coupe du Bioshader (à droite) tiré de de IP et al. (2020)



3.3.4.3.3 Climat subtropical

Satumane et Suk (2018) ont expérimenté physiquement les avantages potentiels du système de verdure verticale sur la quantité et la qualité de la lumière du jour à l'intérieur des bâtiments. L'expérience s'est déroulée à San Antonio, au Texas, en novembre 2017. Ils ont construit un module de bois pour simuler l'espace intérieur d'un bâtiment, avec une ouverture en acrylique pour simuler une fenêtre à haute transmittance. L'ouverture était orientée au sud. Le jasmin de Caroline (Gelsemium sempervirens), le jasmin étoilé (Trachelospermum jasminoides) et le badamier sauvage (Combretum indicum) ont été sélectionnés sur la base de trois caractéristiques : ils sont disponibles localement, ce sont des plantes grimpantes et ils offrent une diversité de densité de feuillage. Les plantes ont été montées sur un treillis métallique pour imiter leur croissance naturelle puis placées à 15 cm de la fenêtre. Le modèle a ensuite été

placé sur héliodon pour tester le dispositif selon la position du soleil à différents moments de l'année. Les caractéristiques d'éclairage telles que l'éclairement, la luminance, l'éblouissement d'inconfort et la température de couleur de la lumière ont été mesurées et analysées. La température de couleur correspond à la température du corps noir qui produit la couleur visuelle la plus proche de la source lumineuse.

La majorité des recherches se sont concentrées sur les aspects énergétiques des systèmes de verdure verticaux. D'autres chercheurs se sont particulièrement intéressés aux performances des systèmes de végétation verticale à la lumière du jour. Les résultats montrent que les caractéristiques physiques des plantes telles que la densité du feuillage, la taille des feuilles et la distribution ont un impact significatif sur la qualité et la quantité de lumière du jour dans le bâtiment. De plus, les niveaux d'éblouissement d'inconfort ont été considérablement réduits à l'aide des vignes, car les niveaux d'éclairement vertical ont été abaissés et les distributions de luminance sont devenues plus uniformes en réfléchissant et en diffusant les pénétrations directes du soleil. Tout comme dans les recherches précédentes, les auteurs notent que le niveau d'éclairage et la réduction de l'éblouissement dépendent aussi de l'intensité de la lumière et de la position du soleil (altitude et angles d'azimut) à différentes périodes de la journée et de l'année (Saturne et Suk, 2018; Reinhart, 2014).

Hunter et al. (2014) ont passé en revue 28 études (expérimentale, observationnelle ou de modélisation) portant sur les performances des SVV afin de développer une méthodologie adaptable à n'importe quelle autre étude. Selon leur analyse, de nombreuses recherches ne tiennent pas compte de nombreux aspects. C'est le cas, par exemple, de la forme urbaine et architecturale qui ont une incidence sur la croissance optimale des plantes et donc sur les performances thermiques des façades vertes. Par exemple, la hauteur d'un bâtiment influence l'ombrage, la température et la vitesse des vents (micro-climats), ce qui a des effets sur la croissance localisée des plantes. Les auteurs rappellent que les façades vertes sont des systèmes d'ombrage dynamiques dont

les performances dépendent de nombreux autres facteurs, dont la plasticité, la physiologie, la diversité des espèces, la saisonnalité, l'heure de la journée, la température, l'ensoleillement, l'orientation du bâtiment et du soleil, etc. Pour les auteurs, l'objectif premier des recherches sur les performances thermiques est de déterminer les espèces, les configurations des structures de support, les systèmes de plantation et d'irrigation qui sont les plus efficaces pour un contexte climatique, architectural et urbanistique donné afin de réduire au mieux les demandes en énergie de refroidissement et de chauffage. Jusqu'à présent, beaucoup de recherches se sont concentrées sur les climats chauds et secs, sur la période estivale et sur les façades orientées à l'ouest. Dans les climats aux hivers froids, il y a très probablement des compromis à faire entre l'utilisation de plantes à feuilles caduques, semi-caduques et persistantes afin que la façade verte puisse réduire autant le coût du refroidissement en été que le coût de chauffage en hiver (Hunter et al., 2014).

Le potentiel des systèmes de verdure verticale en termes d'économie d'énergie et de performances thermiques tout au long de l'année restent encore à prouver dans des conditions climatiques extrêmes, comme c'est le cas à Montréal avec ses hivers longs et très froids et ses étés chauds et humides. De plus, la position basse du soleil dans le ciel hivernal québécois constitue un autre paramètre à considérer et à évaluer dans les questions liées aux performances de la lumière et au problème de l'éblouissement (Annex 3.1).

3.4 Paramètres régissant les performances du système de verdure verticale

Les conditions météorologiques ont un impact important sur les performances thermiques et de la lumière des systèmes de verdure verticale. Comme l'explique Pérez (2014), « le climat dépendra également des conditions météorologiques, qui par conséquent affecteront les résultats de la croissance des plantes (densité du feuillage, hauteur des plantes, etc.) et leurs réponses physiologiques (transpiration, position des

feuilles, etc.) » (Traduction de l'auteure). En dehors des conditions météorologiques, la conception de l'espace de verdure verticale à l'intérieur ou à l'extérieur de bâtiments doit tenir compte de divers autres paramètres. Ces paramètres incluent le type d'espèces et leurs propriétés physiques, les comportements de la végétation et le modèle de croissance dans le temps, l'espace et les différents types de climat (Hunter et al., 2014). En outre, des inconvénients tels qu'un investissement initial plus élevé, des coûts d'entretien et des dommages potentiels au bâtiment doivent également être pris en compte lors de la phase de conception initiale.

La capacité à réfléchir et absorber le rayonnement solaire dépend d'un certain nombre de facteurs tels que l'épaisseur de la feuille, son âge, sa teneur en eau, sa structure physiologique et son orientation par rapport au soleil (Jones, 2013). Les recherches menées par Holm (1989) montrent que, pour obtenir des résultats plus précis, il est essentiel de mesurer la pénétration de la lumière et la qualité de l'ombre à travers une canopée. Par conséquent, la détermination de la densité de la canopée et une simple mesure de sa profondeur peuvent être adéquates pour recueillir des mesures de la pénétration de la lumière solaire et de la qualité de l'ombre.

L'indice de surface foliaire (en anglais, Leaf area index ou LAI) est également important pour estimer la réduction de température et la transmission du rayonnement solaire. L'indice de surface foliaire affecte tout particulièrement les performances des VSS. L'indice de surface foliaire est un indicateur biologique commun qui est défini comme la surface foliaire d'un seul côté par unité de sol (Ong, 2003). En d'autres termes, cet indice mesure l'étendue du couvert végétal. Dans le cas d'une façade verte verticale, le LAI mesure la surface projetée des feuilles par unité de surface verticale. La superficie du feuillage est un paramètre important pour la performance de l'ombrage vert (Pérez et al., 2014).

Les avantages de l'utilisation de la végétation dans les bâtiments sont classés en quatre aspects : l'isolation thermique, l'interaction avec la lumière du soleil et l'ombre, l'évaporation et la variation du refroidissement et du vent dans le bâtiment. Les paramètres qui affectent les performances d'un SVV, en tant que système passif d'économie d'énergie, sont résumés dans le tableau 3.2 (Sheweka et Mohamed, 2012).

Tableau 3-2 : Paramètres qui affectent les performances thermiques et de la lumière naturelle d'un système de verdure verticale, tiré de Sheweka et Mohamed (2012).

	Réduction de la température	Ombrage et isolation	Refroidissement par évaporation
Couverture	LAI : Indice de surface foliaire Angle du feuillage Substrat : épaisseur, densité apparente, teneur en humidité et couleur Type d'isolation du bâtiment	LAI : Indice de surface foliaire	Type de plante Exposition Climat (sec/humide) Vitesse du vent Humidité du substrat
Façades	Densité du feuillage Effet barrière du vent Modification de l'air dans l'espace intermédiaire Substrat : épaisseur, densité apparente, teneur en humidité et couleur	Densité du feuillage Nombre de couches	Type de plante Exposition Climat (sec/humide) Vitesse du vent Humidité du substrat.

3.5 Sélection de la végétation et orientation des bâtiments

Johnston et Newton (2004) proposent des plantes à feuilles caduques, avec leurs boucliers de feuillage dense, sur le côté sud du bâtiment. En été, elles peuvent protéger les bâtiments de la lumière du soleil et l'évaporation peut créer un effet de refroidissement. En hiver, la lumière du soleil peut pénétrer la surface du mur puisque les plantes perdent leurs feuilles. Sur les murs ouest, les plantes à feuilles persistantes peuvent protéger le bâtiment de la pluie et créer un coussin d'air pour aider à isoler. Les plantes à feuilles persistantes, en particulier le lierre, sont certainement les espèces grimpantes les plus adaptées aux murs exposés au nord, qui reçoivent peu de lumière

directe du soleil et bénéficient donc le plus de l'isolation des plantes. Les murs orientés au nord sont aussi mieux adaptés pour soutenir les plantes indigènes et un plus large éventail de plantes (Tableau 3.3).

Tableau 3-3 : Plantes appropriées selon l'orientation de la façade, inspiré de Johnston et Newton (2004), Huang et al. (2019) et Ip et al. (2010).

Espèces	Espèces	Requièrent un support (treillis)	Croissance	Zone de rusticité pour le Québec	Niveau d'ombrage 1-Léger 2-moyen 3-dense
Grimpeurs auto-agrippants plants à ventouses et à racine-crampons	Lierre anglais *(Hedera helix)*	Non	Lent	6 ou 5b	1-2
	Vigne vierge *(Parthenocissus quinquefolia)*	Non	Moyen	zone 3	1-3 mi-ombre ou ombre
	Lierre de Boston *(Parthenocissus tricuspidata)*	Non	Rapide	zone 3	1-3 mi-ombre ou ombre
	Hortensia grimpant *(Hydrangea petiolaris)*	Non	Moyen	zone 5	Mi-ombre ou ombre
	Fusain de fortune *(Euonymus fortunei)*	Non	Lent	5a	(1-2)
Espèces grimpantes volubiles, à pétioles ou à vrilles.	Vrillée du Turkestan (Fallopia baldschuanica)	Oui	Rapide	zone 4	Mi-ombre ou ombre
	Chèvrefeuille des bois *(Lonicera periclymenum)*	Oui	Moyen	3a	soleil ou Mi-ombre
	Houblon *(Humulus lupulus)*	Oui	Rapide	zone 5	Mi-ombre ou ombre
	Clématite (Clematis)	Oui	Rapide	5, 6	Soleil ou Mi-ombre
Arbustes rampants	Ronce commune (Rubus fruticosus)	Oui	Moyen	4 ou 5	Soleil ou Mi-ombre
	Rosier de France (Rosa gallica)	Oui	Moyen	3 ou 4	Soleil ou Mi-ombre

Pour Huang et al. (2019), les façades est et ouest sont les plus favorables aux installations de SVV externes. Le gain en énergie solaire thermique est réduit par les

SVV externes dans la direction du lever et du coucher du soleil. Dans un climat tropical, ils recommandent des espèces telles que le bois de chandelle (Dracaena Reflexa), l'arbre-parapluie (Schefflera Arboricola), l'asperge à fleurs denses (Asparagus densiflorus) ou encore la fougère à feuille de chêne (Drynaria quercifolia) pour les murs qui reçoivent le plus de lumière. Dans des zones qui ne reçoivent pas autant de lumière solaire, le philodendron grimpant (Philodendron hederaceum), le philodendron xanadu (Thaumatophyllum Xanadu), le pellionia (Pellionia repens) ou la sélaginelle (Selaginella willdenowii) sont considérés comme plus appropriés (Huang et al., 2019).

Ip et al. (2010) ont mené des recherches pour un climat océanique tempéré (au Royaume-Uni) sur cinq couverts de plantes grimpantes à feuilles caduques pour comprendre leurs performances d'ombrage. Parmi les cinq plantes grimpantes potentielles (la vigne russe, la vigne grimpante, la vigne vierge, la glycine et le lierre de Boston), la vigne vierge est considérée comme la plus appropriée pour la façade verte. Ses grandes folioles à cinq ovales offrent un meilleur ombrage. Cependant, comme son feuillage est dense, elle nécessite une taille. Un façade verte installée face à l'est devrait avoir un coefficient de façade verte plus élevé (moins d'ombrage) car la croissance des plantes sera moins vigoureuse. La courbe du coefficient de bio-ombrage sera similaire pour les orientations sud et ouest, car les différences de croissance des plantes ne sont pas significativement différentes pour une plante vigoureuse comme la vigne vierge. Ils ont également mentionné que les résultats de leurs expérimentations ne pouvaient s'appliquer qu'à un climat et à un type de plantes comparables (Ip et al., 2010).

Hydro-Québec explique que, pour autant que l'espace soit suffisant, la plantation d'une ceinture verte sur le pourtour de l'habitation assure une forme de climatisation biologique. Dans le contexte québécois, des feuillus à grand déploiement orientés au sud de la maison abriteront des rayons du soleil et apporteront ombrage et fraîcheur durant l'été. En hiver, alors que les feuillus auront perdu leurs feuilles et permettront

au soleil de réchauffer les murs, les conifères, ou n'importe quel arbuste gardant son feuillage toute l'année, abriteront des vents froids s'ils sont plantés à l'est, au nord et à l'ouest. L'atténuation des vents est sensible à une distance équivalente à environ onze fois la hauteur des arbres. Cependant, il est préférable de ne pas avoir un écran trop compact et hermétique afin d'éviter des tourbillons (Hydro-Québec, 2010).

En 2010, Kontoleon et Eumorfopoulos ont étudié les effets de l'orientation sur le système de verdure verticale en Grèce, dans un climat méditerranéen. Les résultats montrent qu'un système de verdure verticale est plus performant, en termes de réduction de température, lorsqu'il est installé à l'ouest. Sa performance diminue progressivement lorsqu'il est installé à l'est puis au sud et enfin au nord. Au fur et à mesure que la couverture du feuillage augmente, ses effets positifs s'accroissent. Un système de verdure verticale peut réduire la charge de refroidissement d'un bâtiment sans fenêtres jusqu'à 20 %, 18 %, 8 % et 5 % s'il est installé respectivement sur l'orientation ouest, est, sud et nord (Kontoleon et Eumorfopoulos, 2010).

L'orientation du bâtiment a un effet important sur le taux et le schéma de croissance des plantes. Le choix de la plante appropriée et sa relation avec l'orientation du bâtiment et de la fenêtre dépendent de divers facteurs et paramètres tels que les propriétés des plantes, les conditions climatiques et météorologiques et le type de plante grimpante. Pour obtenir une orientation maximale et optimale pour l'installation de systèmes de verdure verticale, chaque condition climatique et météorologique doit être testée (Hunter et al., 2014).

3.6 Sélection des plantes et leur effet sur les systèmes de verdure verticaux

Pour la conception de façades vertes, Perez et al. (2017) conseillent l'implantation de plantes grimpantes à feuilles caduques ou persistantes tandis que, pour les murs verts, les arbustes et des plantes herbacées au feuillage persistant leur semble préférable.

Cependant, l'impact des plantes persistantes et caduques sur les performances de la lumière à l'intérieur de bâtiments et le problème de l'éblouissement de ces systèmes a rarement fait l'objet de recherches.

Julinova et Beckovsky (2019) divisent les plantes en deux autres catégories : les plantes vasculaires ou non vasculaires. Les plantes vasculaires, telles que les arbres et les plantes à fleurs ou grimpantes, sont composées d'une structure de racines, de tiges et de feuilles. Ces végétaux possèdent un système racinaire profond et des tissus vasculaires spécialisés, le Xylène et le Phloème, dont la fonction est de transporter les fluides et les nutriments. Bien que les plantes vasculaires puissent survivre dans une grande variété d'habitats et que leur système racinaire soit spécialisé pour réguler la teneur en eau des tissus, elles tolèrent peu la dessiccation (Julinova et Beckovsky, 2019). De leur côté, les plantes non vasculaires, telles que les mousses, sont dépourvues de tissus vasculaires, ce qui explique leur petite taille et l'absence de véritables feuilles, de graines ou de fleurs. En guise de racines, elles possèdent des rhizoïdes, sorte de poil qui leur permet de se fixer et d'absorber eau et minéraux. Bien qu'elles ne possèdent pas de vaisseaux conducteurs, ni de racines ou d'organes de stockage, elles ont la capacité de supporter la sécheresse par le ralentissement de leur métabolisme. Pendant les périodes prolongées de sécheresse, ces plantes perdent la majeure partie de leur teneur en eau. Elles entrent alors en anhydrobiose, un état de vie ralenti qui se caractérise par un arrêt de la croissance et de la photosynthèse et une réduction de la transpiration. Elles prennent alors un aspect rabougri et brunâtre (réduction et protection de la surface transpirante) (Colin, 2001). Cet état de dormance les rend très résistantes à la dessiccation et aux périodes d'enneigement. Au retour de meilleures conditions, ces végétaux reprennent vie, sans aucunes lésions tissulaires. On nomme ce phénomène la reviviscence. Malgré leur grande capacité régénérative, ce type de végétaux doit être planté dans un environnement ombragé et humide (Julinova et Beckovsky, 2019).

3.6.1 Plantes vasculaires: les plantes grimpantes

Parmi les plantes vasculaires, on retrouve toutes sortes de végétaux, dont les plantes grimpantes. Dans les études mesurant les effets des systèmes de verdure verticale (SVV), la plupart des plantes grimpantes sélectionnées sont auto-agrippantes telles que le lierre (Hedera helix), la vigne vierge (Parthenocissus tricuspidata) ou la vigne vierge vraie (Parthenocissus quinquefolia). Comme l'expliquent Hunter et al. (2014), ces plantes peuvent « (i) couvrir rapidement de vastes zones, (ii) atteindre une hauteur maximale de 20 à 25 m, (iii) persister pendant des décennies à des centaines d'années, (iv) tolèrent une taille importante et (v) supportent un volume d'espace racinaire limité » (traduction de l'auteure). Selon Dunnett et Kingsbury (2008), le lierre anglais (Hedera helix) peut s'étendre jusqu'à 30 m de hauteur et recouvrir une surface de près de 6500 pieds carrés dans des conditions de croissance appropriées. Pour toutes ces raisons, ces essences conviennent à la végétalisation des façades et à l'application de SVV en Europe et en Amérique du Nord (Petty, 2008; Hunter et al., 2014).

Les plantes grimpantes sont considérées comme une solution abordable pour le verdissement vertical et créent des images dynamiques. Elles offrent un bon potentiel de plantation et apportent un vrai sens de la nature, surtout au Québec avec son climat humide en été. Les plantes grimpantes sont également un bon moyen de laisser pénétrer la lumière du jour, tout en générant une certaine intimité à l'intérieur des bâtiments (Fig 3.16). Ces plantes valorisent l'identité d'un lieu, la culture, le patrimoine et le sentiment d'appartenance à un bâtiment, un quartier ou même à toute la ville (Bernier, 2011a).

Figure 3.16 Création d'un paysage dynamique montréalais grâce à l'implantation de plantes grimpantes.

Selon Petty (2008), une sélection avisée de l'espèce est primordiale, non seulement pour contrôler sa croissance et l'entretenir à bon escient, mais aussi parce qu'une méconnaissance peut conduire à des coûts d'entretien et d'irrigation supplémentaires. Elle peut également nuire à la qualité et au confort visuel des résidents et de leur environnement (Fig 3.17).

Figure 3.17 Application de la vigne vierge (Parthenocissus quinquefolia) dans un espace intermédiaire d'un bâtiment résidentiel de l'Université technique de Munich en Allemagne, tiré de EuroInox et diamant building (n.d.).

Les plantes grimpantes sont peut-être les plantes les plus faciles à cultiver en façade, car elles nécessitent peu de soutien pour assurer leur propagation. À l'aide de radicelles aériennes, de ventouses, d'adhésifs ou de sécrétions ressemblant à de la colle (Fig 3.18), les grimpeurs sont capables de se fixer à une grande variété de surfaces à condition qu'il y ait un certain degré de rugosité ou d'irrégularités pour décourager le glissement au fur et à mesure que la plante se développe (Petty, 2008).

Le volubilisme est un autre moyen courant qu'utilisent les plantes pour grimper. Les plantes grimpantes volubiles enroulent leurs tiges autour de supports naturels ou artificiels (Fig 3.19). Dépendamment de l'espèce, l'enroulement est senestre (de droite à gauche) ou dextre (de gauche à droite), comme c'est le cas pour le chèvrefeuille (Lonicera), mais elles doivent être entraînées par le support pour pousser verticalement (Petty, 2008). Les plantes grimpantes volubiles constituent le plus grand nombre d'espèces présentes dans la nature.

Figure 3.18 Illustration de radicelles aériennes sur plantes grimpantes, tiré de Petty (2008).

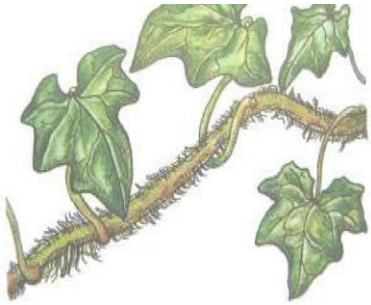


Figure 3.19 Illustration de tiges volubiles, tiré de Petty (2008).

De même que toute autre plante grimpante, les plantes volubiles ont besoin de suffisamment de frottement de surface pour éviter le glissement de la plante lors de son développement. Les grimpeurs volubiles peuvent varier considérablement en hauteur et en modèle de croissance. Certains grands volubiles, tels que la glycine de Chine (Wisteria sinensis), peuvent devenir ligneux avec l'âge et générer un degré de stress énorme sur les systèmes de support à mesure qu'ils mûrissent. De ce fait, les structures destinées à supporter des plantes volubiles - ou toute autre plante grimpante - doivent être conçues et installées en tenant compte des caractéristiques individuelles des plantes, de leur croissance et vieillissement. De plus, considérant leur tendance à la croissance verticale, plusieurs plantations espacées à une distance adéquate les unes des autres peuvent être nécessaires pour couvrir horizontalement la surface sans efforts importants de liage et d'élagage (Petty, 2008).

Certaines plantes volubiles nécessitent des radicelles ou des vrilles supplémentaires pour la fixation et le soutien. Les plantes à vrilles utilisent des pétioles, d'autres peuvent apparaître comme des extensions de feuilles ou dans le cadre de la pulvérisation de fleurs (Fig 3.20). En général, les vrilles contiennent de petites tiges filiformes qui ont des habitudes grimpantes de torsion autour des objets. Cependant, pour les espèces à radicelles, l'application d'éléments de support horizontaux et verticaux peut être obligatoire tandis que les vrilles se fixent solidement à une structure donnée (Petty,2008).

Figure 3.20 Illustration de plantes à vrille, tiré de Petty (2008).

Johnston et Newton (2004) classent en trois groupes les végétaux convenant aux murs :
“Les grimpeurs autonomes qui n'ont généralement pas besoin de soutien”
“Les grimpeurs jumeaux qui nécessitent un support. Le support vertical est constitué de fils d'acier minces, de lignes en plastique rugueux ou de bâtons de bois en cours d'exécution”
“les arbustes rampants qui ne sont de vrais grimpeurs, mais ils peuvent être entraînés sur des structures à mailles larges ou en les attachant au mur” (Traduction de l’auteure) (Johnston et Newton, 2004)
Les arbustes rampants tels que les mousses, les lichens et les graminées ne sont pas de véritables grimpeurs. Ils ont la capacité de croître sur des structures en treillis ou attachées à un mur. Cependant, les grimpeurs et les volubiles sont plus aptes à escalader des obstacles tels que des rochers, des arbres et des arbustes (Johnston et Newton, 2004).

Bernier (2011b) catégorise les plantes grimpantes en fonction de la façon dont elles s'accrochent pour grimper. Elle différencie les espèces qui n'ont pas besoin de support, comme les plantes à ventouses ou à racine-crampons, des espèces qui nécessitent un support pour grimper en hauteur, comme les espèces à tiges ou à pétioles volubiles et les espèces à vrilles (Tableau 3-4) (Bernier, 2011b).

Tableau 3-4 : Plantes grimpantes avec le niveau d'ensoleillement requis et la zone de rusticité compatible au climat du Québec, adapté de Johnston et Newton (2004) et Bernier (2011b).

	Espèces	Requièrent un support (Treillis)	Croissance	Zone de rusticité pour le Québec	Niveau d'ombrage 1-Léger, 2-moyen,3-dense
Grimpeurs auto-agrippants Plants à ventouses et à racine-crampons	Lierre anglais (Hedera helix)	Non	Lent	6 ou 5b	1-2
	Vigne vierge (Parthenocissus quinquefolia)	Non	Moyen	Zone 3	1-3 Mi-ombre ou ombre
	Lierre de Boston (Parthenocissus tricuspidata)	Non	Rapide	Zone 3	1-3 Mi-ombre ou ombre
	Hortensia grimpant (Hydrangea petiolaris)	Non	Moyen	Zone 5	Mi-ombre ou ombre
	Fusain de fortune (Euonymus fortunei)	Non	Lent	5a	(1-2)
Espèces grimpantes volubiles, à pétioles ou à vrilles.	Vrillée du Turkestan (Fallopia baldschuanica)	Oui	Rapide	Zone 4	Mi-ombre ou ombre
	Chèvrefeuille des bois (Lonicera periclymenum)	Oui	Moyen	3a	Soleil ou Mi-ombre
	Houblon (Humulus lupulus)	Oui	Rapide	Zone 5	Mi-ombre ou ombre
	Clématite (Clematis)	Oui	Rapide	5, 6	Soleil ou Mi-ombre
Arbustes rampants	Ronce commune (Rubus fruticosus)	Oui	Moyen	4 ou 5	Soleil ou Mi-ombre
	Rosier de France (Rosa gallica)	Oui	Moyen	3 ou 4	Soleil ou Mi-ombre

3.6.2 Plantes vasculaires : les succulents

Depuis peu, les concepteurs de murs verts envisagent l'utilisation de plantes grasses tapissantes ou couvre-sol (succulentes) au lieu de plantes vivaces et d'arbustes, en raison de leur tolérance à la sécheresse (Fig 3.21) (Lundholm, 2006). Le fait qu'elles diminuent le poids des systèmes de verdure verticale modulaires est également un autre avantage important des tapis de succulentes. En raison de leur aspect plat et sans inégalités, elles sont aussi plus adaptées aux petits murs. La variété de couleurs et de textures des succulentes permet la création de paysages décoratifs à plus grande échelle (Manso et Castro-Gomes, 2015).

Figure 3.21 Application de tapis succulents (à gauche), tiré de Kelaidis (2012); les succulentes appropriées en extérieur (à droite), tiré de Baldwin (2013).

Certaines plantes succulentes, comme le sedum et la plupart des joubarbes (Sempervivum), peuvent tolérer le froid, la sécheresse et pousser dans tous les climats. Les succulentes rustiques peuvent survivre pendant l'hiver, à des températures inférieures à zéro, tant que le sol reste bien drainé et qu'elles sont protégées des intempéries et des baisses de températures extrêmes (Baldwin, 2013; Bagnasco et Riedmuller, 2019; Kelaidis, 2012). C'est particulièrement le cas du genre sedum, qui regroupe un très grand nombre d'espèces dont certaines sont très résistantes au froid et sont adaptées au gel et à la neige. Par contre, les petits sedums ne supportent pas des chaleurs pouvant dépasser les 26°C. En été, elles doivent être gardées à l'abri du soleil.

Les plantes cailloux (Lithops) ont également le potentiel d'être utilisées pour les jardins verticaux extérieurs, à condition qu'elles reçoivent plusieurs heures de soleil par jour (Baldwin, 2013; Bagnasco et Riedmuller, 2019; Kelaidis, 2012). Toutes ces considérations sont importantes pour concevoir un SVV dans le contexte montréalais.

Reyes-González et al. (2018) ont étudié les plantes succulentes indigènes pour mesurer leur potentiel dans la conception d'un SVV extérieur au Mexique. Les résultats montrent que les genre Gemme, Graptosedum, Kanlanchoe, ainsi que le sedum cuivré (Sedum nussbaumerianum), la plante fantôme (Monotrope uniforme) et le sedum à feuilles teintées (Sedum rubrotinctum) sont les plus adaptées. Non seulement elles poussent sous une toile d'ombrage, à haute irradiance sans système d'irrigation et pendant la saison sèche, elles sont capables de conserver leur forme et leur beauté caractéristiques (Reyes-González et al., 2018).

3.6.3 Plantes non vasculaires : les mousses

Comme l'expliquent Julinova et Beckovsky (2019), les mousses sont des plantes non vasculaires à part. « Elles représentent la partie la plus ancienne et la plus importante de la biomasse végétale mondiale et sont présentes sur tous les continents, dans tous les types d'environnement et de terrain, avec des habitats allant des montagnes au niveau de la mer » (Traduction de l'auteure) (Julinova et Beckovsky, 2019). Pour leur croissance, les mousses ont besoin d'un ombrage moyen à dense, d'humidité et de nutriments similaires à ceux de leur habitat d'origine (Julinova et Beckovsky, 2019), mais certaines espèces supportent assez bien les zones ensoleillées, en montagne ou sur des dunes de sable stabilisées (Wang et al., 2019). Dans la conception de SVV, les façades nord ou est resteront tout de même les plus appropriées pour la plantation de mousses (Julinova et Beckovsky, 2019) (Fig.3.22).

Les particularités biologiques des mousses les rendent non seulement très résistantes à une large gamme de températures, mais aussi à la dessiccation, au gel, à la pollution de

l’air et de l’eau et aux maladies. De plus, leur goût spécial repousse animaux et insectes nuisibles (Julinova et Beckovsky, 2019). Grâce à leur capacité à résister, elles croissent naturellement dans les milieux urbains et deviennent des plantes de choix pour la conception de murs ou de façades verts en ville.

Figure 3.22 Utilisation de mousse dans un SVV intérieur. Archdaily (s.d). [Photographie]. https://www.archdaily.com/926367/why-incorporate-moss-walls-into-architecture/5da0986a3312fd25b1000030-why-incorporate-moss-walls-into-architecture-photo.

Les mousses demandent peu d’entretien : elles n’ont pas besoin d’être tondues ou désherbées, mais nécessitent un arrosage par brumisation qui les maintient humide sans excès (Julinova et Beckovsky, 2019; Wang et al., 2019). Au Japon, ces petites plantes sans fleurs sont le symbole de "l'immobilité" et du "calme". Leur valeur symbolique et esthétique est illustrée par leur usage dans les temples et l'art botanique du bonsaï (Wang et al., 2019).

3.7 Plantes adaptées et populaires au climat du grand Montréal

Le choix des plantes appropriées pour un mur végétal extérieur ou un système de verdure verticale dépend de divers facteurs et paramètres tels que le climat, l'orientation du bâtiment, l'exposition au soleil, le type de plante, le type de support, le type de substrat, etc. (Pérez et al., 2014; Safikhani et al., 2014; Hunter et al., 2014). La plupart des études citées dans les sections précédentes se déroulaient dans des climats chauds et tempérés. Beaucoup de plantes sélectionnées dans le cadre de ces expérimentations ne sont donc pas recommandées pour le climat Montréalais. Comme il a été souligné plus haut, l'adaptation des plantes au climat est très importante. Dans cette section, les plantes les plus appropriées pour l'extérieur du bâtiment sont proposées compte tenu du climat rigoureux de Montréal.

L'installation de plantes sur les façades et les fenêtres limite la construction du dispositif d'ombrage. Les principales limitations sont l'entretien et le danger de chute de glace en hiver, ainsi que l'obstruction de la vue et la réduction de la disponibilité de la lumière du jour à l'intérieur des bâtiments. Les plantes auront besoin d'un arrosage suffisant et également d'une taille régulière pour prévenir les dangers. Cependant, pour atteindre les objectifs de durabilité, la végétation devrait nécessiter une faible irrigation, particulièrement adaptée à l'exposition locale à la lumière et aux conditions climatiques. Dans le cas de Montréal, elle doit être adaptée aux conditions climatiques extrêmes, au vent, aux hivers froids, aux étés chauds et humides (Bernier, 2011a; Pérez et al., 2014).

Selon Bernier (2011a), le remplacement régulier des plantes mortes devient fastidieux et peu rentable à long terme, en raison de la courte saison de croissance et des hivers rigoureux. La principale raison de ces remplacements est le gel des racines lors des journées particulièrement froides et la dessiccation qui se produit vers la fin de l'hiver et le début du printemps. À cette période, lors des journées plus douces et venteuses,

une forte évaporation se produit dans la partie de la plante qui n'est pas protégée par la neige. L'évaporation augmente le besoin d'hydratation, mais les racines ne peuvent pas absorber l'eau dans le sol qui est gelé, provoquant ainsi le dessèchement de la plante. Ce phénomène est assez fréquent au Québec, même pour les plantes les plus rustiques. Pour pallier ces problèmes, Bernier (2011a) suggère de choisir des plantes résistantes aux éléments (sécheresse, vent, froid) et de trouver un moyen de protéger leurs racines. Comme elle le rappelle, les murs végétaux représentent aussi des milieux atypiques, même si l'on favorise l'implantation de plantes indigènes, ce qui complique davantage la sélection. Cependant, différentes avenues restent encore à expérimenter, comme c'est le cas des espèces qui croissent dans des conditions arides et montagneuses (tableau 3.5) (Bernier, 2011a). Les plantes de montagne tolèrent une diminution de jusqu'à 50% de la teneur en eau dans leurs tissus grâce à leur port en forme de coussin. Les vieilles tiges et les feuilles mortes de ce coussin retiennent l'humidité et sont capables de les protéger de la dessiccation (Fig 3.23).

Tableau 3-5:Avantages et désavantages des plantes de montagne selon les espèces, d'après Bernier (2011a).

Espèce	Avantages	Désavantages
Succulentes	- Adaptées aux conditions arides	Manque de résistance aux bourrasques de vent et la turbulence
Herbacées, Mousses, Lichens, Espèces semi-désertiques et Lichens	-Adaptées aux conditions arides -Poussent dans une épaisseur de substrat minime - coloniser la toundra	Freinage de la production d'auxine due aux vents forts, à la courte saison de croissance, aux basses températures et aux rayons UV intenses

Certaines espèces sont adaptées au climat Montréalais. C’est le cas de certains végétaux à feuillage persistant (sempervirente) qui, « avec leurs poils fins et serrés et leurs tiges ligneuses, raides et coriaces, résistent à l'évaporation. Elles prolongent leurs activités photosynthétiques tard à l'automne, grâce à leur feuillage qui reste vert toute l'année, et les reprennent tôt au printemps. L'eau à l'intérieur de leurs cellules, en gelant, se dilate et fait éclater les parois cellulaires. La présence de sucre et de sels minéraux et la limitation de la teneur en eau en hiver abaissent le point de gel de l’eau dans les tissus, causant moins de dégâts. » (Bernier, 2011a)

Figure 3.23 Végétation de montagne. Le Jardin alpin au Jardin Botanique de Montréal.

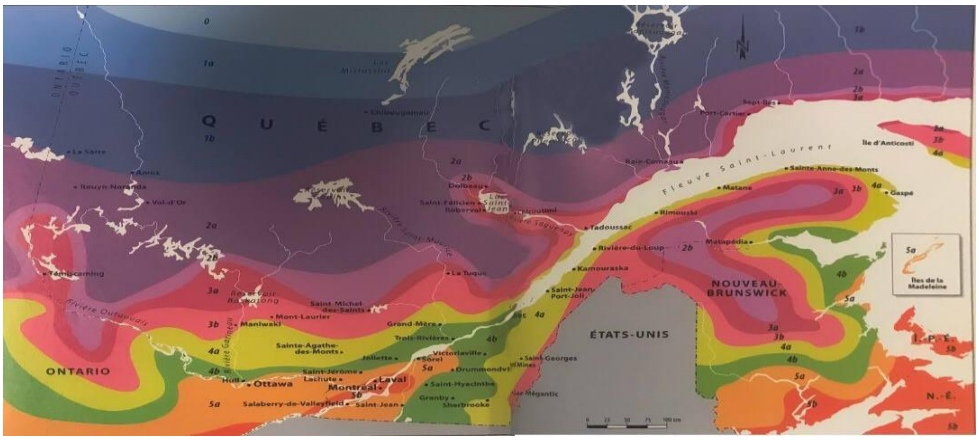
Selon Bernier, l'utilisation de plantes grimpantes est appropriée pour le revêtement des murs extérieurs, non seulement en raison de sa simplicité, mais aussi parce qu'il n'existe actuellement aucune plante cultivée en hydroponie qui puisse tolérer le climat rigoureux du Québec. Certaines plantes sélectionnées par Patrick Blanc pour ses murs hydroponiques sont capables de résister au climat continental, mais il n'a encore jamais, à ce jour, réalisé de projet qui pourrait démontrer la capacité de ses jardins verticaux à supporter le froid hivernal québécois (Bernier, 2011b; Bernier, 2011a).

De 2001 à 2007, l'organisme à but non lucratif Vivre en Ville a réalisé un projet pilote à Québec. Diverses espèces de plantes grimpantes, à savoir la vigne vierge (Parthenocissus quinquefolia), l'hydrangée grimpante (Hydrangea petiolaris) ainsi qu'une espèce populaire en France, la bignone commune (Campsis radicans), ont été plantées. Les résultats montrent que la vigne vierge est plus résistante aux températures froides, possède le taux de croissance et le taux de déploiement de recouvrement de la surface du mur les plus élevés (Bernier, 2011a).

Hydro-Québec a proposé une liste qui décrit près de 1 200 espèces et variétés horticoles, permettant de déterminer les essences arbustives et arborescentes à privilégier ou à éviter. L'information comprend les caractéristiques propres à chaque espèce (taille, tolérance au verglas et à la lumière, exposition au soleil, etc.) ainsi qu'un ensemble de conditions favorables à leur croissance (l'espacement requis, le type de sol, distance des lignes électriques, etc.). Les plantes sont classées selon leur résistance au froid et la zone de rusticité (Fig 3.24) (Hydro-Québec, 2010). Les zones de rusticité sont des régions géographiques établies à partir des températures minimales annuelles moyennes. Elles permettent de classer les plantes selon leur niveau de résistance aux froids de l'hiver. Les chiffres les plus élevés correspondent aux zones où l'hiver est le plus doux. De plus, chaque zone est divisée en deux classes, soit a et b, a décrivant des températures légèrement plus froides que b. Au Québec, les zones de rusticité ont été établies par Agriculture Canada. Par exemple, la zone 1a est la limite nordique pour les

plantes d'horticulture, alors que la zone 5b est la plus favorable au Québec (Hydro-Québec, 2010).

Figure 3.24 Zones de rusticité au Canada tiré de Hydro-Québec (2010)



3.7.1 Bénéfices de l'implantation des arbres en milieu urbain et adaptation au climat du grand Montréal

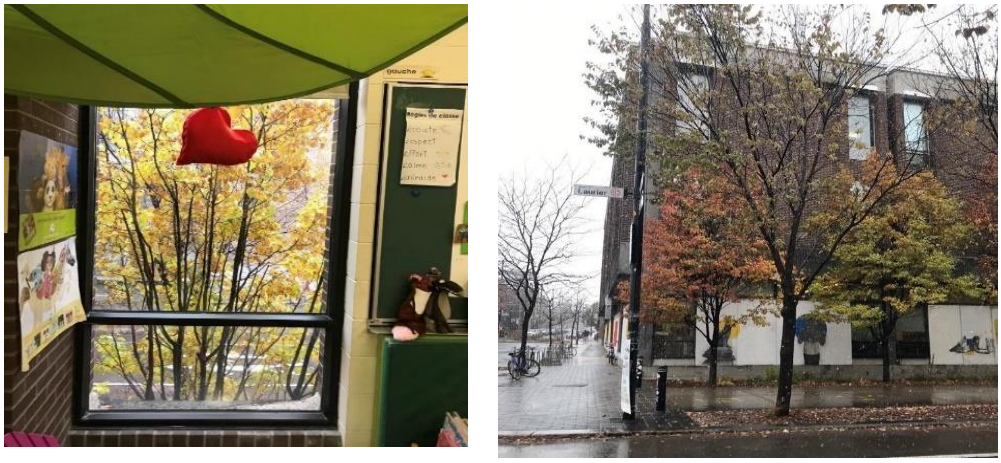
La plantation d'arbres procure de nombreux bienfaits, améliorant la vie urbaine au quotidien. En premier lieu, les arbres diminuent l'éblouissement causé par le soleil (Fig 3.25). Des recherches antérieures montrent l'importance de l'application de systèmes appropriés pour diminuer l'éblouissement et filtrer la lumière du jour provenant d'ouvertures, telles que les fenêtres. De plus, elle impacte la diffusion et la distribution de la lumière réfléchie par le ciel et les surfaces environnantes (Khalid et Ahmed, 2007). Les arbres et les arbustes offrent également des avantages esthétiques et réduisent la pollution sonore et l'apport thermique par rayonnement solaire (Khalid et Ahmed, 2012). Outre le rafraîchissement offert par l'ombrage, les arbres agissent aussi comme des climatiseurs naturels. En effet, ils libèrent de l'eau dans l'air par les feuilles pour en puiser de nouveau à travers les racines dans le sol. Ce phénomène, que l'on nomme évapotranspiration, leur permet de faire circuler la sève et les sels minéraux ainsi que de les rafraîchir. L'évapotranspiration, par la création d'humidité, permet un refroidissement de l'air ambiant. Selon Meas (2016), un arbre mature peut évaporer

jusqu'à 450 litres d'eau par jour et, ainsi, convertir en humidité entre 70 et 80% de l'énergie de l'irradiation solaire.

Enfin, les arbres conservent la biodiversité dans l'environnement urbain, en maintenant l'habitat de différentes espèces d'oiseaux et autres petits animaux. Ils permettent l'exploration et le développement de toute une panoplie d'activités ludiques, sensorielles et pédagogiques, offrant ainsi une ambiance et dynamique dans le quartier (Lessard et Boulfroy, 2008).

Selon le Centre d'écologie urbaine de Montréal ou CEUM (2013), il est préférable de planter des feuillus de grande taille dans les côtés est, sud et ouest du bâtiment, pour maximiser les bénéfices. Lorsque ces arbres perdent leurs feuilles en automne, la lumière du soleil peut pénétrer et réchauffer l'intérieur (Meas, 2016). En conséquence, il est recommandé de planter des conifères indigènes devant les fenêtres sud pour un confort visuel (Bhalla et Manu, 2014). La plantation doit aussi tenir compte de la quantité de lumière, d'humidité et d'eau nécessaire à la bonne croissance de l'arbre sélectionné (Meas, 2016).

Figure 3.25 Implantation des arbres et leur impact sur les ouvertures et les bâtiments, École Laurier à Montréal.



Un des autres bienfaits de la présence d'arbres en ville est lié à leur capacité à purifier l'air. En effet, ils produisent de l'oxygène tout absorbant plusieurs polluants atmosphériques et métaux lourds (Meas, 2016). Le long des rives, ils agissent comme des filtres de rétention d'azote, permettant de limiter la contamination des eaux (Meas, 2016). Selon Meas (2016), pour maximiser leur fonction purificatrice, il est important de sélectionner une espèce adaptée à la zone de rusticité, qui a une croissance rapide et qui résiste au milieu urbain, comme c'est le cas de l'érable argenté, de l'érable freemanii, de l'épinette de Norvège, de l'orme « Triumph » et du pin blanc pour le Québec. Bien que les arbres indigènes restent les plus adaptés, certaines espèces exotiques ou horticoles s'adaptent aussi très bien au climat rigoureux du Québec (Meas, 2016). Très peu de ressources proposent des recommandations pour sélectionner les plantes les mieux adaptées à la végétalisation intégrée aux bâtiments, à Montréal (Hydro-Québec, 2010).

3.7.2 Les systèmes de support pour SVV en détail

Comme le soutient Bernier (2011 b), "les plantes grimpantes sont la façon la plus simple, efficace et accessible de verdir une surface verticale". Il existe deux méthodes pour implanter des plantes grimpantes dans un SVV : la méthode directe sans support ou la méthode indirecte avec support. Bien que certaines plantes grimpantes n'en aient pas besoin, un système de support externe possède des avantages, tels que la réduction des risques de chute des plantes, l'attachement obstiné et l'uniformisation de la lumière. L'espace d'air qui se crée entre la surface du bâtiment et la végétation apporte une protection supplémentaire. Ainsi, le SVV peut fournir une isolation de chauffage ou de refroidissement selon les conditions saisonnières et mieux performer (Petty, 2008; Nori et al., 2013; Manso et Castro-Gomes, 2015). Les détails mécaniques du support et de la fixation ainsi que l'importance écologique du comportement du support sont des facteurs qui influencent le comportement de croissance des plantes grimpantes (Nori

et al., 2013). Les exigences en matière de conception de systèmes pour façade verte et pour mur vivant sont expliquées en détails dans les sections qui suivent.

3.7.2.1 Les systèmes pour façades vertes

Petty (2008) explique que les câbles d'acier de traction, les treillis, les entretoises et d'autres matériaux spécialement conçus à cet effet sont généralement utilisés comme systèmes de support pour la conception de façades vertes. Le bois est aussi un système de support couramment utilisé, surtout par le passé. Il est apprécié pour ses valeurs d'ancienneté, de durabilité et esthétiques mais, en raison de sa faible performance face aux intempéries, il est plus approprié pour les projets domestiques et à petite échelle (Petty, 2008).

Aujourd'hui, le métal est devenu le matériau le plus populaire. Il convient aux grandes hauteurs et aux projets à grande échelle, en particulier grâce à son transport facile, sa résistance et sa standardisation (Petty, 2008). Il a aussi une durée de vie plus longue que le bois. En raison de sa grande flexibilité, il ouvre le champ des possibles aux concepteurs. L'acier galvanisé ou inoxydable est utilisé pour les systèmes de câbles de traction, les systèmes de fils ou treillis et les treillis modulaires à 3 dimensions qui comprennent des pots remplis de substrat (Petty, 2008; Manso et Castro-Gomes, 2015).

Les systèmes de câble de traction en acier et leur cousin, les systèmes de maille en acier, sont un bon choix pour les plantes grimpantes plus lourdes avec des feuillages plus denses. Pour atteindre le niveau de couverture souhaité, les systèmes doivent être composés de supports horizontaux et verticaux (Pretty, 2008). La rugosité du câble permet aussi aux plantes auto-agrippantes et volubiles de s'accrocher et d'escalader (Petty, 2008). La flexibilité et la légèreté du câble d'acier permet aux concepteurs de concevoir des systèmes adaptés à l'espèce sélectionnée (Pretty, 2008). Dunnett et Kingsbury conseillent cependant des câbles ronds d'un diamètre de 4 à 30 mm pour supporter les grands grimpeurs (Petty, 2008). Pour prévenir les problèmes liés au stress

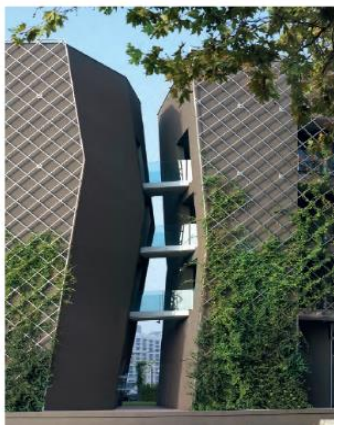
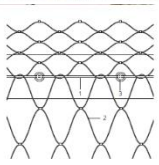
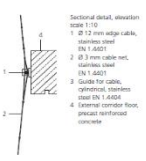
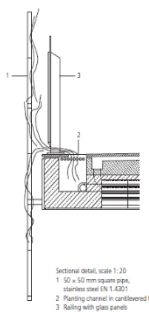
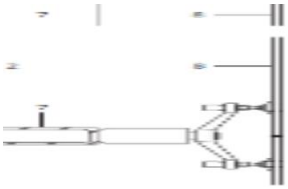
potentiel, qui entraînent une déformation ou une défaillance, des mécanismes de sécurité et de réglage fins, tels que des tendeurs et des pinces de surcharge, sont à prévoir (Petty, 2008). Certains facteurs, tels que le poids des plantes sélectionnées, la pression induite par la croissance des plantes, l'envergure du projet, sa hauteur et les intempéries (vent, pluie, neige, etc.) doivent être pris en compte. Par conséquent, pour éviter les soucis et les éventuels problèmes mentionnés ci-dessus et éviter la pression sur les câbles d'ancrage, Petty (2008) recommande une zone tampon d'au moins 7,5 à 15 cm entre le système et le mur.

De leur côté, les systèmes de fils ou treillis sont beaucoup moins flexibles que les câbles d'acier. Ils sont soit préfabriqués, soit transportés et érigés en chantier (Petty, 2008). De ce fait, ils nécessitent plus d'éléments d'ancrages, de connexion et de tension. La standardisation du système permet cependant une grande variété d'applications. Grâce à leurs grilles et intervalles plus petites, ils conviennent aux plantes grimpantes à croissance lente. Les plantes sont encouragées à se propager à travers la barrière ainsi formée (Petty, 2008; Manso et Castro-Gomes, 2015). Comme les systèmes à câble, les systèmes à treillis doivent respecter une distance de la façade.

Les systèmes de treillis modulaires (planter box) possèdent des compartiments qui doivent être préférablement remplis d'agrégat et de substrat, une matière organique chargée d'éléments nutritifs moins lourde que le terreau traditionnel (Petty, 2008; Manso et Castro-Gomes, 2015; Bernier, 2011a). Ces systèmes offrent non seulement un support horizontal et vertical, mais aussi une profondeur structurelle qui permet une meilleure prise pour les racines (Petty, 2008). Ce système autoportant offre une grande diversité de configurations, cependant, dans le cas où le système est apposé à un mur, il doit respecter une certaine distance (Petty, 2008). Selon Petty (2008), les jardinières préfabriquées en fibre de verre sont particulièrement adaptées à ce type de systèmes, en raison de leur légèreté et la possibilité de les personnaliser. Certaines de ces jardinières préfabriquées sont équipées de drainage pour le contrôle de l'irrigation.

Outre le poids, les concepteurs doivent aussi tenir compte d'autres facteurs, tels que les problèmes de capacité de rétention des nutriments et de l'eau, le drainage, l'aération et la stabilité (Petty, 2008; Manso et Castro-Gomes, 2015) (Tableau. 3.6).

Tableau 3-6 : Les différents types de systèmes de soutènement en acier pour façades vertes (végétalisées), les images tirées de EuroInox et diamant building (n.d.).

Systèmes de câble de traction	**Systèmes de fils ou treillis**	**Systèmes de treillis modulaires à 3 dimensions (planter box)**
		
 		

Petty (2008) présente également le système de treillis modulaires Conteneur de vigne G-Sky conçu par Gsky (Fig 3.26), une entreprise canadienne spécialisée dans la conception standardisée de systèmes de verdure verticale. Ce système est une alternative aux systèmes de treillis modulaires. Le Conteneur de vigne est une série d'unités de plantation de petite taille. Chaque unité comprend un contenant de tôle perforée en acier inoxydable doublé par un sac de polypropylène. Le contenant est maintenu dans un cadre en acier équipé d'un treillis individuel en acier. Les unités peuvent être alignées à volonté ou suivre un programme de plantation spécifique. Chaque unité accueille une plante, ce qui permet la culture en mosaïque. Le système réduit considérablement le risque de concurrence, de transmission des maladies et de propagation des ravageurs. De plus, cette méthode facilite l'élimination des plantes et des espèces inadaptées, inappropriées, flétries ou malades et le remplacement des

contenants (Petty, 2008). L'irrigation est assurée par un système de goutte-à-goutte, régulée par un contrôleur automatique (Tableau 3-7).

Figure 3.26 Schéma du système G-Sky Vine Container, tiré de Petty (2008)

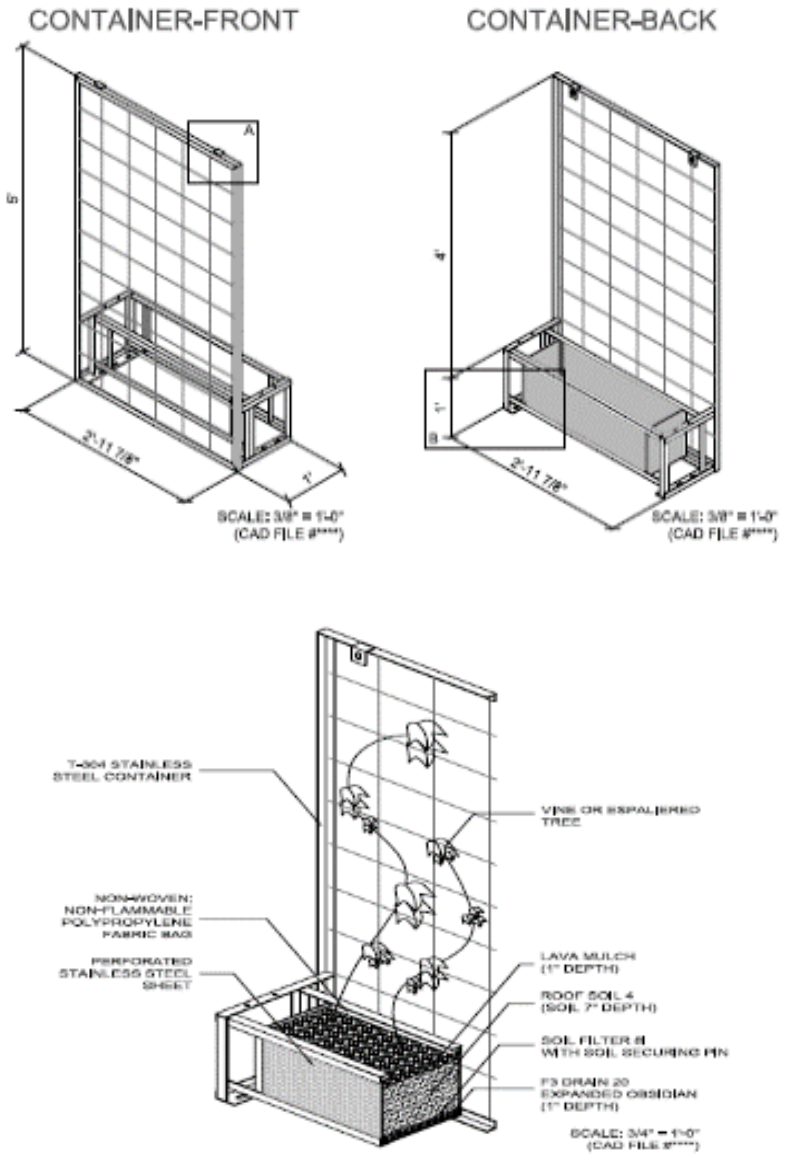


Tableau 3-7 : Caractéristiques des modes de plantation, tiré de Petty (2008).

Structure de pot à fleurs et treillis	**Structure de sol**	**Caractéristique de pot à fleurs, treillis et espèces**
-cadre en acier, tôles d'acier inoxydable perforées et doublées. - sac en tissu polypropylène à l'intérieur du pot à fleurs.	-La première couche de 2,5 cm de paillis de lave. -La seconde couche de 18 cm de sol de toit (roof soil), - La couche finale en bas de 2,5 cm d'obsidienne expansée.	-Pot à fleurs: 30,5 x 30,5 cm x 75 cm. -Treillis :120 x 90 cm. -Peut accueillir 13 - 25 plantes différentes.

3.7.2.2 Les systèmes pour murs vivants (Mur végétal de Patrick Blanc)

Le concept de “Mur végétal” de Patrick Blanc repose sur la mise en place d'un support composé d'une membrane imperméable de PVC expansé et d'une nappe d'irrigation formée de deux toiles géotextiles (Bernier, 2001a; Kmieć, 2014). Ce support est fixé à une armature métallique chevillée à quelques centimètres d'une façade existante. Le vide ainsi créé assure l'isolation contre le froid et la chaleur et protège la façade des intempéries. La couche de PVC expansée de 10 mm d'épaisseur assure l'étanchéité, la rigidité et l'homogénéité de la surface à végétaliser. La nappe d'irrigation est composée de deux feutres horticoles imputrescibles en polyamide qui peuvent absorber, faire circuler par capillarité et retenir l'eau (Bernier, 2011a). Le feutre est percé pour former des « poches» qui contiennent les végétaux qui se développent et s'enracinent dans la surface plane du feutre (Kmieć, 2014). Pour éviter que les plantes tombent en début de processus, des attaches en acier et des fibres les retiennent (Kmieć, 2014). La face exposée est recouverte de mousses et d'une microflore qui aident à garder l'humidité et à retenir l'eau pour qu’elle ne s’écoule pas trop rapidement au sol (Bernier, 2011a). Blanc développe ce concept autour du principe d'hydroponie: les plantes croissent dans un substrat inerte (les feutres) irrigué par une solution nutritive. Un système automatisé

d'irrigation au goutte-à-goutte distribue eau et substances nutritives. Le système automatisé est réglé selon les exigences des plantes et les conditions climatiques et environnementales du milieu (Bernier, 2011a). L'eau voyage par capillarité dans le feutre géotextile. À la base du mur, un bassin collecte la solution nutritive (eau et engrais biologique) en excès pour la retourner dans le système de drainage après filtration (Bernier, 2011a).

Ce type d'installation possède plusieurs avantages. Il isole du froid, de la chaleur et du son. Il nécessite peu d'espace. Il diminue la pollution de l'air et augmente la rétention d'eau. La variété de plantes utilisables est très intéressante du point de vue esthétique. Par contre, il a besoin d'une pompe et de tuyauterie pour l'irrigation de la surface verticale, donc d'un certain entretien, en grande partie sous les toiles géotextiles. Il s'agit également d'un concept encore expérimental et très coûteux (Bernier, 2011a). En raison des coûts et de l'entretien, les projets de Blanc sont généralement institutionnels ou commerciaux (Bernier, 2011a).

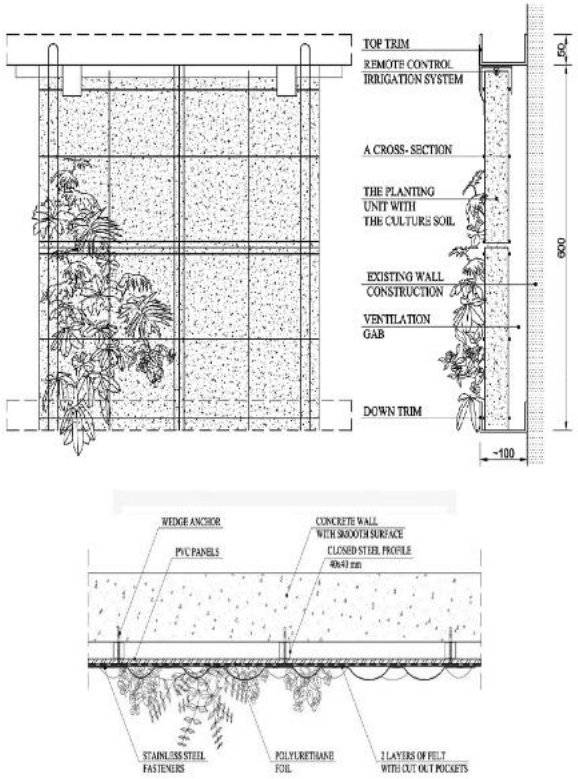
Aujourd'hui, des concepteurs de murs végétaux intègrent, au concept de Blanc, le principe de modularité. C'est le cas du système Wonderwall développé par le studio d'architecture du paysage Copijn à Utrecht, aux Pays-Bas. Leur mur est fait d'éléments modulaires composés chacun de trois couches: un treillis d'acier ancré au bâtiment, une plaque de protection attachée à l'intérieur du treillis et une couche externe comprenant une structure de métal et une membrane de plastique recouverte d'un feutre percé de trous réguliers dans lesquels les contenants de plantes sont insérés (Bernier, 2011a).

Selon Sharp (2007), les "murs vivants (également appelés bio murs, murs végétaux ou jardins verticaux) sont composés de panneaux pré-végétalisés ou de systèmes de tissus intégrés qui sont fixés à un mur structurel ou à une paroi. Les panneaux modulaires peuvent être constitués de contenants en plastique polypropylène, de géotextiles, d’un système d’irrigation, de substrat et de végétation. Ce système supporte une grande

diversité d'espèces végétales, y compris un mélange de plantes couvre-sol, de fougères, d'arbustes bas, de plantes vivaces et de plantes comestibles. Les murs vivants fonctionnent bien en plein soleil, à l'ombre et à l'intérieur, et peuvent être utilisés dans des régions tropicales et tempérées. En raison de la diversité et de la densité de la végétation, les murs vivants nécessitent un entretien plus intensif (arrosage régulier, nutriments, engrais) que les façades végétalisées" (traduction de l'auteure) (Sharp, 2007 cités dans Perry, 2008).

Ce système est conçu pour tirer parti du potentiel des racines à pousser sur des surfaces planes. Les racines des espèces plantées dans des "récipients spéciaux" faits du même matériau que la "mousse de jardin" sont fixées à la structure de base (Kmieć, 2014). La sélection des plantes et des espèces se fait en fonction des conditions climatiques et des différentes expositions à la lumière. Ce système est équipé d'un dispositif d'irrigation et d'un câble chauffant en fonction des différentes conditions météorologiques (Kmieć, 2014). Le système de mur vivant Parabienta est un type de "mur vivant" qui se compose d'unités de panneaux suspendus. Ces panneaux portables permettent de retirer et de remplacer facilement les plantes inadaptées, flétries ou malades (Fig. 3.27) (Kmieć, 2014).

Figure 3.27 Systèmes de mur vivant de Parabienta avec panneaux portables (à gauche). Coupe du concept de mur vert de Patrick Blanc (à droite), tiré de Kmieć (2014).



3.7.2.3 Les systèmes pour murs de mousse

Julinova et Beckovsky (2019) expliquent que des recherches sur les murs de mousse sont actuellement en cours. À ce jour, les compagnies fabriquent deux types de systèmes: le mur de mousse conservée (ou préservée) et le mur de mousse vivante. Dans le premier cas, la mousse est stabilisée et conservée dans de la glycérine ou de la paraffine pour garder son aspect naturel. En d'autres termes, la croissance de la plante est arrêtée en cours de développement. Le procédé permet cependant de garder l'aspect et la souplesse de la plante. Pour cette raison, le tapis de mousse ne nécessite ni sol ou substrat ni entretien. Il doit cependant être installé dans un espace protégé de la lumière directe du soleil, du chauffage, de la ventilation et de la climatisation pour maintenir

l'humidité. Ce type de mur est conçu pour des projets intérieurs et a une durée de vie limitée (des mois à des années dans des conditions idéales). On retrouve sur le marché des modèles standardisés ou personnalisables (pictogrammes, logos, cadres, cloisons, etc.). Le mur de mousse vivante, de son côté, se compose de tapis de mousse vivante. La mousse continue donc à pousser et nécessite un entretien approprié. Certains modèles sont conçus à partir d'un cadre en acier inoxydable standardisé alors que d'autres sont fabriqués à partir de formes personnalisables ou de matériaux souples qui permettent une découpe décorative (Julinova et Beckovsky, 2019). Des modèles sont vendus avec leurs accessoires : pompes, lumière intégrée et brumisateur. Le mur de mousse vivante est autant approprié pour les projets intérieurs qu'extérieurs, à condition de respecter les caractéristiques propres à l'espèce (Julinova et Beckovsky, 2019). L'entreprise allemande Green City Solutions a même conçu des panneaux de mousse intelligents contrôlés à distance. Lorsque les capteurs intégrés au panneau captent un niveau de pollution trop élevés, le flux d'air qui passe à travers le panneau augmente grâce à un système de ventilation pour que la mousse puisse absorber les particules fines et le dioxyde d'azote de l'air (United Nation Environment Programme, 2019).

3.8 Conclusion

Ces dernières années, le concept d'architecture végétale a énormément évolué, essentiellement d'un point de vue esthétique, paysager et, à plus grande échelle, urbain. La végétation est, aujourd'hui, un élément supplémentaire à considérer lors de la conception d'un bâtiment et dans sa relation avec son environnement. Comme mentionné dans ce chapitre, une application de végétation bien conçue et gérée génère de nombreux bienfaits pour l'humain, l'environnement urbain et naturel. Les murs végétalisés sont aussi une bonne façon de rénover des bâtiments existants à moindre frais (retrofit). Très peu de sources offrent des conseils sur le choix des bonnes plantes pour la végétalisation intégrée des bâtiments, à Montréal. De plus, la plupart des études

dans ce domaine sont qualitatives ; Le manque d'expérimentations locales et l'absence de données quantitatives probantes pour le climat montréalais sont des obstacles (Bernier, 2011a). La conception d'un système vert vertical de fenêtres, qui améliore le confort visuel et thermique à l'intérieur des bâtiments, demande une sélection avisée des plantes et des structures de support. Elle doit aussi tenir compte de l'après conception, c'est-à-dire l'entretien et la croissance des plantes, afin que le système produise des effets maximisés.

Le chapitre qui suit présente les méthodes qui ont été développées pour concevoir un système de verdure verticale de fenêtre dans le contexte montréalais.

CHAPITRE IV

CONCEPTION ET SIMULATION DE DISPOSITIFS D'OMBRAGE ET LEUR POTENTIEL

4.1 Étude de cas : l'école primaire Laurier

L'école primaire Laurier est située à Montréal, du côté est de l'intersection entre l'avenue Laurier et la rue Berri, en plein cœur du quartier Plateau-Mont-Royal. Elle accueille chaque année plus de 500 élèves du préscolaire et du primaire. Construite en 1970, l'école fait, depuis plusieurs années, l'objet de rénovations temporaires, mais des rénovations majeures sont prévues pour l'année scolaire 2022-2023, forçant l'administration à délocaliser les élèves. Cette situation n'est pas exceptionnelle. En effet, beaucoup d'écoles au Québec, et particulièrement à Montréal, nécessitent des rénovations et des réparations de grande et moyenne envergure. Le projet de rénovation comprend la réfection complète de l'enveloppe, en raison du mauvais état de la maçonnerie en brique et panneau de béton (Centre de service scolaire de Montréal, 2021). Cette réfection permet le remplacement des portes extérieures et des fenêtres, arrivées à leur fin de vie utile (Centre de service scolaire de Montréal, 2021). L'arrondissement ayant refusé l'agrandissement des ouvertures, les travaux prévoient aussi une mise à niveau de la ventilation mécanique pour améliorer l'apport d'air frais (Fig 4.1) (Centre de service scolaire de Montréal, 2021).

Figure 4.1 École Laurier et salle de classe sélectionnée encerclée en rouge(a), Église catholique Saint-Denis, située au sud-est de la salle de classe, qui fait partie d'un réseau de milieux naturels protégés et qui représente un monument important dans le quartier (b)

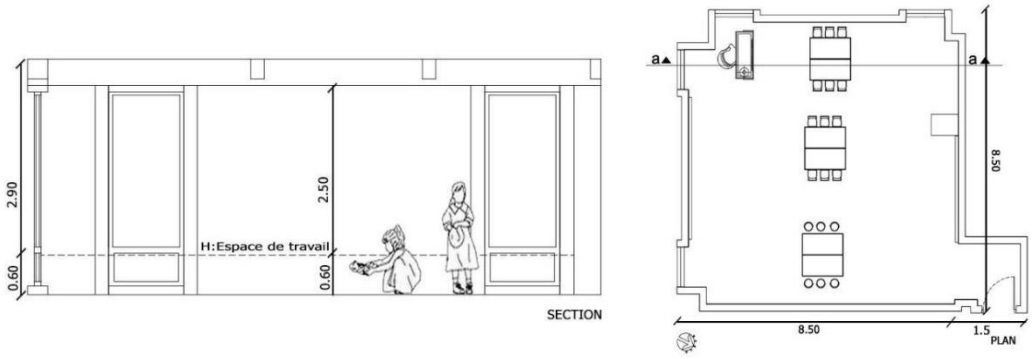
La salle de classe sélectionnée est située au deuxième étage, dans l'angle sud du bâtiment scolaire (Fig 4.1). Cette position lui permet d'être équipée de quatre fenêtres. Deux d'entre elles sont dirigées sud-est et les deux autres sont dirigées sud-ouest. Les quatre fenêtres mesurent 1,10 x 3,15 m (Fig 4.1a). Elles donnent sur la rue et particulièrement sur l'église Saint-Denis, située au sud-ouest de l'intersection (Fig 4.1b- 4.2).

Figure 4.3 (a) Localisation de l'école Laurier (b) Localisation des arbres à proximité de l'école

a **b**

Figure 4.2 Intérieur de la salle de classe

Figure 4.4 Plan et coupe de la salle de classe



Les observations préliminaires et les commentaires des usagers ont permis de dégager plusieurs problématiques en lien avec la lumière du jour (Fig 4.3-4.4) :

- La répartition de la lumière du jour n'est pas uniforme dans toute la classe.
- La lumière du jour n’éclaire pas suffisamment les zones opposées aux fenêtres (fond de l’espace).
- La lumière du jour est très intense autour du bureau de l’enseignant, provoquant de l’éblouissement. Ceci s’explique par le fait que cette zone se situe à l’intersection de deux fenêtres.
- L'éblouissement créé sur les bureaux, sur le tableau noir / tableau blanc est gênant.
- Des rideaux sont utilisés pour éviter les gains de chaleur et/ou l'éblouissement. La lumière du jour étant ainsi limitée, des lumières artificielles sont nécessaires.
-Bien qu'il y ait des fenêtres orientées au sud, un éclairage artificiel est nécessaire pendant les heures de travail, en particulier les jours de neige et nuageux.

Selon Reinhart et LoVerso (2010), les usagers d’un espace se déclarent majoritairement satisfaits de l’ambiance lumineuse lorsque le ratio fenêtre/mur est compris entre 0,2 et 0,3. En deçà, leur satisfaction diminue drastiquement. Ils expliquent que des recherches antérieures indiquent qu’un ratio inférieur à 0,2 créait des contrastes lumineux et des zones de faible intensité lumineuse dans les espaces opposés aux fenêtres et que le ratio

minimal acceptable pour les usagers se situait à 0,25. Cependant, ces analyses étaient centrées sur le confort thermique et l'efficacité énergétique et non sur l'humain et ses perceptions (Reinhart et LoVerso, 2010). Parce que l'environnement lumineux affecte particulièrement les performances physiques et intellectuelles des élèves et leur humeur, la qualité des ambiances lumineuses est aussi un paramètre important dont les architectes et designers doivent tenir compte dans la conception d'espaces éducatifs confortables. Dans la salle de classe étudiée, le ratio fenêtre/mur est de 0,25. Compte tenu du contexte et des pratiques d'enseignement et d'apprentissage (activités de précision et de concentration), ce ratio est probablement insuffisant.

Reinhart et LoVerso (2010) ont développé une équation qui détermine la profondeur de pénétration de la lumière naturelle selon la hauteur du linteau. Selon cette équation (Fig 4.5), dans "un espace éclairé latéralement avec une fenêtre standard et des stores vénitiens, la profondeur de la zone éclairée par le jour est généralement comprise entre 1 et 2 fois la hauteur du linteau. Le nombre exact pour un espace particulier est largement influencé par le type de vitrage et le niveau d'éclairement cible dans l'espace. Si un espace ne nécessite pas l'utilisation d'un dispositif d'ombrage, le rapport peut augmenter jusqu'à 2,5 fois" (traduction de l'auteure) (Reinhart et LoVerso, 2010). Les auteurs définissent la "zone éclairée par le jour" comme "la zone dans laquelle un éclairement minimal spécifique à la tâche est maintenu à la lumière du jour" (traduction de l'auteure) (Reinhart et LoVerso, 2010). Selon cette équation, la zone d'éclairement de la salle de classe sélectionnée représente 1,5 fois la hauteur du linteau. Cette

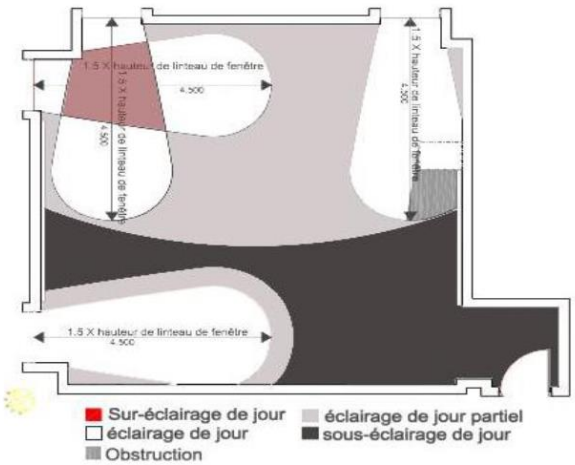
équation permet d'identifier 4 zones d'éclairement dans la classe : Sur-éclairage de jour, éclairage de jour, éclairage de jour partiel, sous-éclairage de jour (Fig 4.6).

Figure 4.5 Rapport entre pénétration de la lumière et hauteur du linteau de fenêtre, tiré de Reinhart et LoVerso (2010).

$$D_{\substack{daylight \\ penetration}} < \begin{cases} 2 \cdot h_{window\text{-}head\text{-}height} \\ \text{if a shading device is required} \\ \\ 2.5 \cdot h_{window\text{-}head\text{-}height} \\ \text{if no shading device is required} \end{cases}$$

En suivant les principes énoncés par Reinhart et LoVerso (2010), la pénétration de la lumière du jour dans cette salle de classe est minimale alors que des zones d'éblouissement se créent à proximité des fenêtres, particulièrement à l'intersection des deux fenêtres situées dans l'angle du bâtiment. Cette mesure quantitative rejoint les commentaires des usagers qui mettaient de l'avant un problème d'éblouissement et de disparité de la distribution de la lumière du jour provoquant une gêne visuelle qui nuit aux élèves.

Figure 4.6 Zones d'éclairement dans la salle de classe sélectionnée



4.2 Analyse climatique

Cette étude a pour objectif d'évaluer plusieurs systèmes d'ombrage pour la création d'un confort visuel à l'intérieur d'une salle de classe de l'école Laurier, à Montréal (Fig 4.7).

Figure 4.7 Vue extérieure de la salle de classe sans dispositifs d'ombrage

À cet égard, la simulation par ordinateur est une façon appropriée qui permet d'intégrer une diversité de variables et de paramètres affectant les conditions à l'intérieur des bâtiments, telles que l'emplacement, l'orientation, le rayonnement solaire, la température ambiante, l'humidité ou la protection solaire (Carlander et al., 2020; Lee et al., 2015). Certains paramètres sont propres à un certain type de dispositifs, comme c'est le cas pour les systèmes de verdure verticale. Comme le stipulent Manso et Gomes (2015), le climat affecte particulièrement les plantes dans leur croissance (densité du feuillage, hauteur des plantes, etc.) et leurs réponses physiologiques (transpiration, position des feuilles, etc.). Ainsi, la performance du SVV dépend autant des conditions matérielles, architecturales et urbanistiques que des conditions climatiques et météorologiques (Manso et Gomes, 2015). Cette étude de cas tient compte du rayonnement et de la trajectoire du soleil, de l'humidité absolue et des moyennes de températures diurnes. Tous les graphiques et diagrammes sont réalisés avec le logiciel

ClimateStudio, un plugin de Rhinoceros qui aide les concepteurs à évaluer et optimiser la performance environnementale d'une conception, en utilisant les données météorologiques du logiciel (Climate.OneBuilding. Org, n.d). Les simulations de la lumière du jour sont basées sur les résultats de ces données, qui sont représentées dans les figures 4.8 à 4.12.

La trajectoire du soleil est un autre paramètre dont il faut tenir compte dans la conception de systèmes d'ombrage performants. En effet, le confort visuel et thermique à l'intérieur d'un bâtiment dépend tout particulièrement de la course du soleil, de son rayonnement, de son intensité, de sa transmission et de son incidence. Conséquemment, cet élément est pris en considération pour cette étude (Fig 4.8).

Dans la figure 4.8, les positions du soleil dans le ciel (courbe des analemmes) sont représentées par les arcs bleu, chaque arc représentant la course du soleil tout au long de la journée à une période de l'année. Le tracé orange représente la position du soleil et sa direction aux solstices d'été et d'hiver à midi. Selon Yeow (2002), « La courbe de l'analemme montre les positions du vrai Soleil dans le ciel, à la même heure (qui peut être choisie arbitrairement) tout au long de l'année. L'axe des ordonnées du graphique représente la déclinaison du Soleil dans le ciel pendant un an, allant de -23,45° en hiver à +23,45° en été » (traduction de l'auteure). Pendant l'hiver, le soleil est placé à basse altitude, ce qui augmente le rayonnement direct sur les fenêtres de la classe et, de ce fait, la possibilité d'éblouissement et de gêne visuelle. Le positionnement au sud de la classe permet une meilleure luminosité et plus de confort thermique pendant les journées froides, mais tend aussi à créer de la gêne pendant toute la journée. Le soleil se déplaçant de l'est vers l'ouest au cours de la journée, la gêne se ressent à proximité des fenêtres placées sud-est le matin pour être ressentie à proximité des fenêtres situées au sud-ouest, l'après-midi. Ceci explique pourquoi des rideaux sont souvent utilisés.

Pour simuler la trajectoire du soleil, deux périodes ont été considérées : le solstice d'été et le solstice d'hiver. Le solstice d'été (20 ou 21 juin) correspond au jour le plus long de l'année et à la position du soleil la plus haute dans le ciel dans l'hémisphère nord. Cette période constitue la période la plus chaude de l'année à Montréal, avec des températures moyennes dépassant les 22°C (Gouvernement du Canada, n.d). Selon les données climatiques de ClimateStudio, la quantité de rayonnement solaire global maximum est de 650 W/m2 (Fig 4.9) alors que la température sèche moyenne est de 23°C (Fig 4.9). Le solstice d'hiver (21 ou 22 décembre) correspond au jour le plus court de l'hémisphère nord alors que le soleil est à son plus bas dans le ciel. À cette période, les températures moyennes sont très basses, se situant en dessous des -6°C. Selon les données climatiques de ClimateStudio, le rayonnement solaire global maximum est de 200 W/m2 (Fig 4.9) alors que la température sèche moyenne est de -5°C (Fig 4.9). Ces périodes représentent les positions maximales et minimales du soleil dans le ciel, ce qui signifie que le soleil se situe entre ces positions le reste de l'année.

Figure 4.8 Position du soleil à midi et trajectoire du soleil au-dessus de l'école Laurier au solstice d'été (à gauche) et d'hiver (à droite).

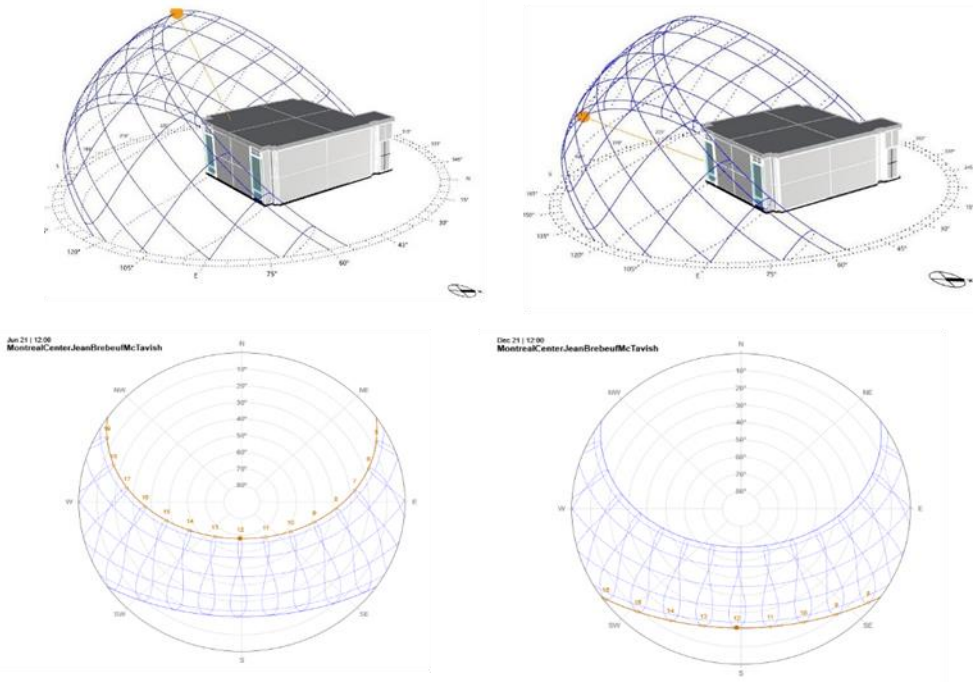


Figure 4.9 Températures, humidité et rayonnement solaire moyens sur une année

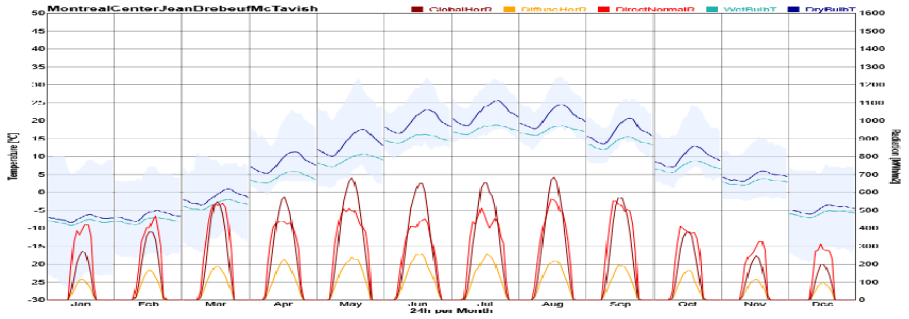


Figure 4.10 Direction, fréquence et intensité du vent à Montréal

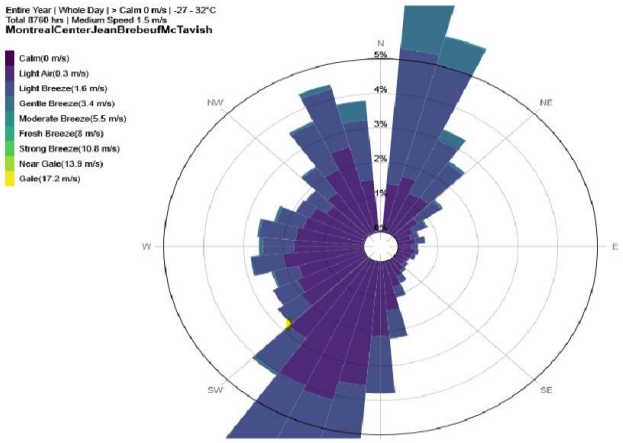


Figure 4.11 Humidité moyenne de l'air à Montréal sur une année.

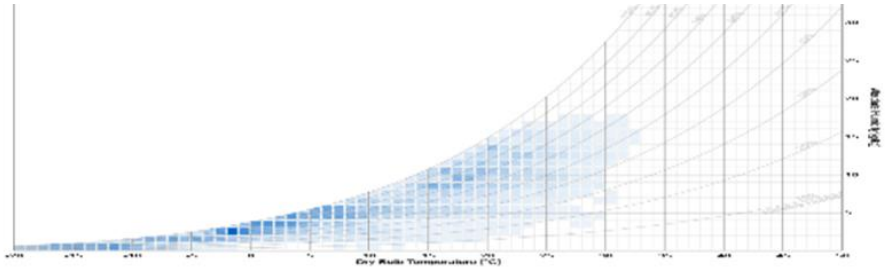
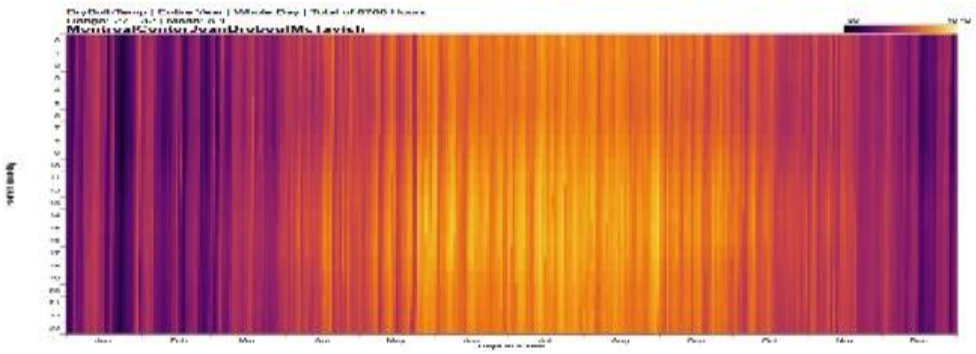


Figure 4.12 : Température moyenne de l'air à Montréal sur une journée et tout au long de l'année



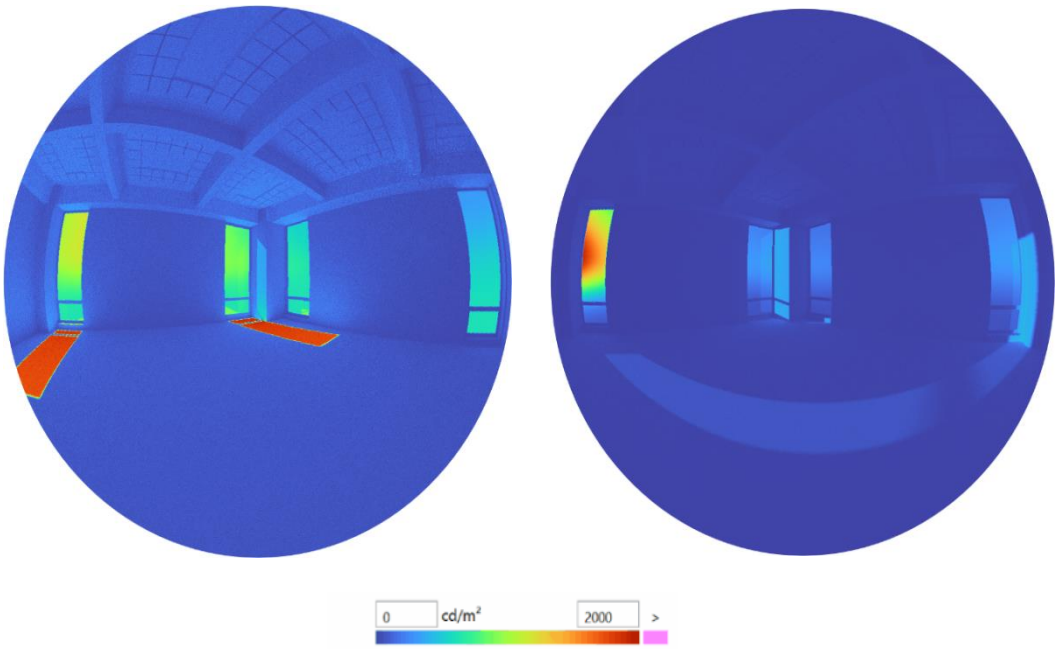
4.3 Simulation de la situation existante

Afin de confirmer les observations, des simulations de l'existant ont été réalisées en termes de confort visuel et d'éblouissement. Le processus de simulation a débuté par l'assignation de matériaux généralement utilisés dans les salles de classe au Québec. Leur réflectance et leur transmittance sont basées sur les standards de la bibliothèque de ClimateStudio (Tableau 4.1). Les résultats de ces simulations sont illustrés dans les figures qui suivent.

Tableau 4-1Matériaux sélectionnés pour la simulation et leurs caractéristiques, en se basant sur le standard de la bibliothèque Climate studio.:

Composantes	Matériaux	Réflectance	Spéculaire	Diffusion	Transmission visible (Tvis)
Plafond	Gypse synthétique	80.60%	3.65%	76.96%	
Vitrage	Atlantica sungate 400 Double				57.1%
Étagère lumineuse	Métallique	73.1%	43.4%	23.6%	
Panneau d'ombrage externe	Métallique	49.81%	2.54%	47.27%	

Figure 4.13 Rendu HDR de l'intensité lumineuse à 15h00 lors du solstice d'été (21 juin 2022) (à gauche) et solstice d'hiver (21 décembre 2022) (à droite).



La Fig 4.13 présente une simulation photométrique de la luminance à 15h30 dans la salle de classe lors des solstices d'été et d'hiver. La luminance est l'intensité de lumière réfléchie ou émise par mètre carré dans une direction donnée, dont dépend la sensation visuelle de luminosité. La mesure de luminance permet, entre autres, de mesurer la perception d'éblouissement. À partir de cette mesure, il est aussi possible de calculer les unités de mesure liées à l'éblouissement, telle que la DGP. Cette simulation met donc en évidence les risques, l'intensité et les zones potentielles d'éblouissement. Pour réaliser l'expérience, les points de lecture ont été placés au fond de la classe. Outre le fait que cette position permet de mesurer la luminance de toutes les fenêtres au même moment, elle n'est pas soumise au rayon direct du soleil et donc aux changements radicaux de l'éclairement naturel. Comme la luminance n'est pas affectée par la distance, la position la plus éloignée des fenêtres et la plus profonde dans la pièce donne

une vue d'ensemble sans que les données soient affectées. Les mesures ont été prises grâce à un appareil photo numérique étalonné. Les images en HDR sont obtenues grâce au logiciel ClimateStudio de Solemma. Les rendus HDR contiennent des canaux de couleur rouge (intolérable), jaune (dérangeant), vert (perceptible) et bleu (imperceptible) qui sont associés à une intensité lumineuse et indiquent la luminosité absolue du pixel. La luminance maximale est définie à 2000 cd/m2, ce qui constitue la limite de confort d'une source lumineuse (ICEB, 2014). L'imagerie est en HDR (High Dynamic Range) ou à plage dynamique pour générer une image plus proche de celle vue par l'œil. Cette technologie offre une gamme de couleur et un contraste plus large que l'imagerie traditionnelle. De son côté, la photométrie mesure l'intensité lumineuse telle qu'elle est perçue par l'œil. On peut voir dans la figure 4.13 que les fenêtres situées au sud-ouest génèrent de l'éblouissement quelle que soit la saison et bien plus que les fenêtres situées au sud-est. Elles sont donc à privilégier dans la conception et la mise en place de dispositifs d'ombrage.

Grâce à la mesure de luminance, plusieurs autres paramètres reliés à l'éblouissement peuvent être calculés. Ces paramètres, qui intègrent des mesures basées sur des données climatiques annuelles, sont comparés entre eux et associés aux observations afin d'évaluer les conditions réelles, leur impact et le potentiel de transformations (LM, 2013). Cette expérimentation s'appuie particulièrement sur quatre paramètres : l'autonomie spatiale de la lumière du jour, l'exposition annuelle à la lumière du soleil, l'éclairement diurne utile et la probabilité d'éblouissement de la lumière du jour. La figure 4.13 expose les résultats obtenus suite aux calculs.

L'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) et l'exposition annuelle à la lumière du soleil (ASE) sont deux indicateurs qui mesurent la performance de la lumière, le niveau d'éclairement et le potentiel d'éblouissement (LM, 2013). L'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) évalue si un espace reçoit suffisamment de lumière. Pour qu'un espace soit considéré comme autonome, la lumière naturelle doit être d'au moins

300 lux pour au moins 50 % des heures d'occupation annuelles (8:00-18:00) (Nabil et Mardaljevic, 2006). De son côté, l'exposition annuelle au soleil (ASE) identifie les zones qui reçoivent trop de lumière solaire directe, causant de l'éblouissement et une charge de refroidissement supplémentaire. L'ASE mesure le pourcentage de surface au sol qui reçoit plus de 1 000 lux pendant au moins 250 heures d'occupation par an (Nabil et Mardaljevic, 2006).

L'éclairement diurne utile (UDI) définit le pourcentage de la surface au sol qui respecte une plage d'éclairement de 100 et 2000 lux pendant au moins 50 % des heures d'occupation (Nabil et Mardaljevic, 2006). Dans la présente recherche, la plage horaire est définie entre 8:00 et 18:00.

La probabilité d'éblouissement à la lumière du jour (DGP) se base sur le climat pour évaluer l'éblouissement de la lumière du jour. Elle calcule l'éclairement vertical au niveau des yeux. Ce paramètre a un impact sur la luminosité et la qualité de la lumière du jour dans un espace (Konstantzos et al., 2015; Konstantzos et Tzempelikos, 2015).

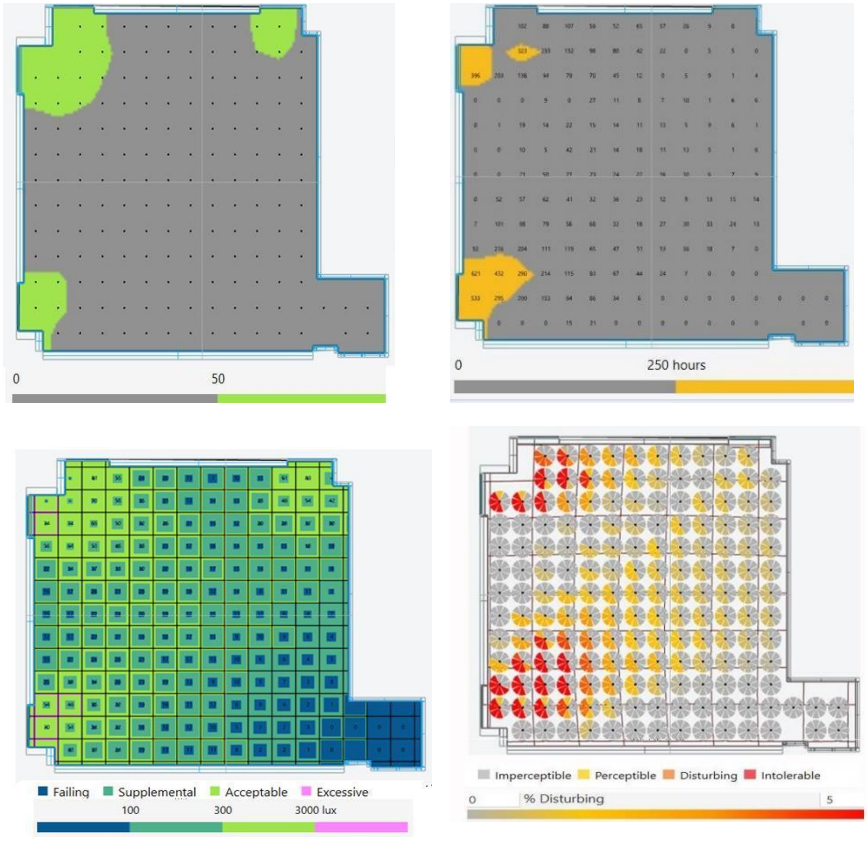
Comme le montre l'image en haut à gauche de la figure 4.13, les zones en vert sont les surfaces au sol qui reçoivent suffisamment de lumière, avec un sDA qui s'élève à 23.2%. Tout le reste de la classe est en gris, ce qui signifie qu'en dehors d'espaces restreints localisés à proximité des fenêtres presque toute la classe est sous-éclairée pendant les heures d'apprentissage. L'image en haut à droite de la figure 4.13 montre en orange les zones qui reçoivent au moins 1000 lux pendant au moins 250 heures d'occupation par an. Sans surprise, elles sont très rapprochées des fenêtres. Ces résultats montrent une nouvelle fois une insuffisance lumineuse dans la majorité de l'espace de la classe et conséquemment le besoin en lumière artificielle.

En bas à gauche de la figure 4.13, l'image basée sur le calcul de l'UDI montre le manque d'uniformité de la lumière du jour dans la classe. Alors que l'éclairement est considéré comme acceptable à proximité des fenêtres pendant au moins 50% des heures d'occupation, la zone la plus éloignée des fenêtres (en bleu foncé) reçoit un éclairement inférieur à 100 lux, ce qui est largement insuffisant pour les tâches pratiquées en classe. L'UDI met aussi en évidence deux zones où l'éclairement est excessif dans plus de 50% du temps. Ces zones, délimitées par le tracé en rose, se situent au niveau des fenêtres sud-est, à l'emplacement du bureau de l'enseignante.

L'image en bas à droite représente la probabilité d'éblouissement. Elle confirme les résultats des trois analyses précédentes. Les zones à proximité des fenêtres sud-ouest, représentées en orange foncé et rouge, ont plus de probabilité d'être visuellement inconfortables. Le calcul de la DGP place ces zones dans la catégorie d'éblouissement intolérable et gênant. Pour le reste de l'espace, l'éblouissement est perceptible, mais non gênant voire imperceptible.

Ces résultats confirment les observations préliminaires in situ. Comme il a été mentionné dans les chapitres précédents, le manque de lumière du jour dans les salles de classe a un impact sur la santé mentale et physique des élèves ainsi que sur leurs performances scolaires. Pour cette raison, dans l'étape suivante, un premier scénario sera développé autour de la révision à la hausse des dimensions des ouvertures afin d'optimiser l'éclairage naturel tout en améliorant le confort visuel dans la classe étudiée (Fig 4.14).

Figure 4.14 Lumière du jour et éblouissement dans la salle de classe (en haut à gauche sDA, en haut à droite ASE, en bas à gauche UDI et en bas à droite DGP).



4.4 Modification des dimensions des ouvertures pour améliorer le confort visuel

L'école Laurier prévoyait l'agrandissement des fenêtres, mais la demande a été refusée par la Ville de Montréal. Cette section simule donc l'agrandissement des fenêtres pour représenter les impacts possibles de ce changement. Les scénarios qui suivent se construisent autour de cette modification des ouvertures. En toute logique, l'augmentation des dimensions des ouvertures risque de faire pénétrer plus de lumière du jour dans la classe. Il se pourrait donc que les espaces sous-éclairés puissent être mieux éclairés, mais que l'éblouissement se fasse plus ressentir à proximité des ouvertures, ce qui rend les dispositifs d'ombrage particulièrement nécessaires. Dans la phase de simulation, diverses alternatives ont été examinées et analysées, et finalement

seule l'orientation sud-est a été envisagée. Les fenêtres orientées sud-ouest restent inchangées car, en cas d'ouvertures excessives, elles provoqueraient des éblouissements et également une surchauffe pendant les saisons chaudes. Finalement, la surface des fenêtres sud-est a doublé par rapport à l'existant.

Figure 4.15 : Modification des dimensions des ouvertures pour améliorer le confort visuel.

Comme le montre les images de la figure 4.15, il existe bien une incidence entre les dimensions des fenêtres et la pénétration de la lumière du jour à l'intérieur de l'espace. En d'autres termes, lorsque les fenêtres sont plus grandes, la quantité de lumière entrant dans la salle de classe augmente et s'uniformise, ce qui conduit aussi à intensifier l'éblouissement.

Dans l'image en haut à gauche, les zones en vert sont les surfaces au sol qui reçoivent une lumière du jour d'au moins 300 lux pendant au moins 50 % des heures d'occupation annuelles, avec un sDA qui s'élève à 74% comparativement au 23,2% de l'existant. Seul un espace restreint localisé à proximité de la sortie de classe est sous-éclairé pendant les heures d'apprentissage. Cet espace n'ayant d'autre fonction que de permettre l'entrée ou la sortie de classe, le sous-éclairement n'a que peu d'incidence sur les activités d'apprentissage et donc sur les élèves.

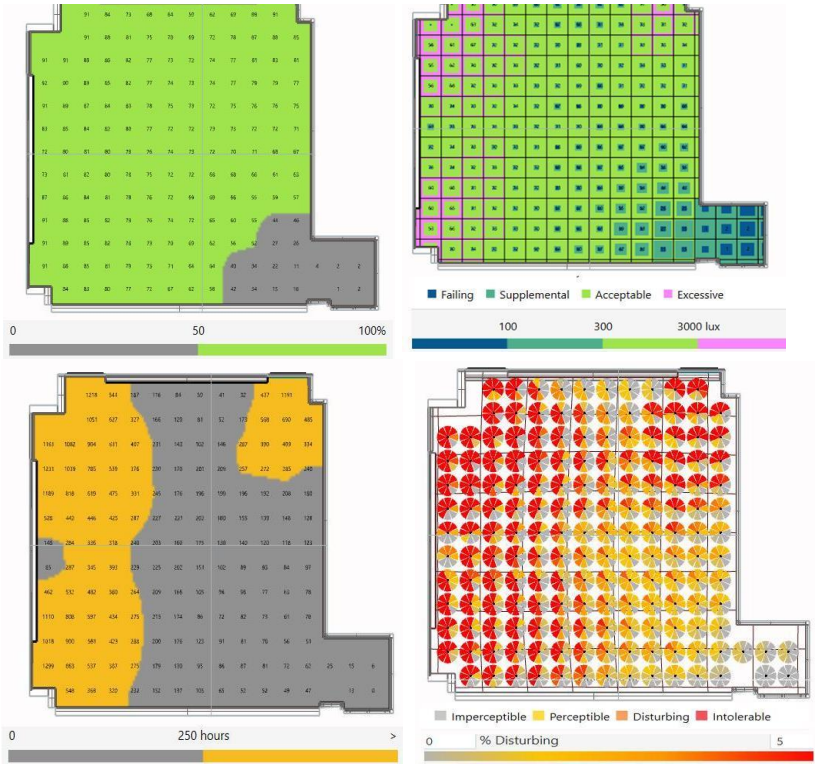
L'image en haut à droite montre en orange les zones qui reçoivent au moins 1000 lux pendant au moins 250 heures d'occupation par an. Avec la modification des fenêtres, l'ASE atteint 156%. Comme pour les résultats précédents, les zones en orange sont très proches des fenêtres, mais la surface s'étend avec l'augmentation des dimensions des fenêtres, ce qui ’signifie qu’il y a une amélioration de la distribution de la lumière avec l’agrandissement des fenêtres. Que ce soit dans les précédentes analyses ou la présente analyse, la zone en gris représente tout de même plus de la moitié de la surface de la classe, ce qui signifie qu’une grande partie de la classe reste sous-éclairée et que la lumière artificielle sera encore nécessaire pour répondre aux besoins visuels des élèves.

L’image en bas à gauche est basée sur le calcul de l’UDI, c'est-à-dire le pourcentage de la surface au sol qui respecte une plage d'éclairement de 100 et 2000 lux pendant au moins 50 % des heures d'occupation. Le résultat de l'UDI s’élève ici à 56%. Grâce à l'image, on peut remarquer une plus forte présence d'extrêmes, de contrastes et, en conséquence, un manque d'uniformité dans la répartition de la lumière du jour. Alors que l’éclairement est considéré comme acceptable (en vert) dans une large partie de la classe, la zone menant vers le couloir et, à moindre mesure, la zone entre les fenêtres sud-est (en bleu foncé) reçoivent un éclairement inférieur à 100 lux, ce qui est largement insuffisant pour les tâches pratiquées en classe. L’UDI met aussi en évidence trois zones où l’éclairement est excessif dans plus de 50% du temps. Ces zones, délimitées par le tracé en rose, se situent au niveau des fenêtres (particulièrement au niveau de celles qui ont été agrandies) et à leur intersection, c'est-à-dire à l’emplacement du bureau de l’enseignante. L'image en bas à droite représente la valeur d'éblouissement (DGP), qui s'élève dans ce scénario à 45%. Comme on peut l'observer dans l'image, la probabilité d'un éblouissement intolérable touche une grande partie de la classe alors que, dans les espaces restants, la probabilité est perceptible voire gênante. Au vu de ces résultats, l'agrandissement des fenêtres n'est probablement pas la meilleure option à adopter pour améliorer le confort dans la salle de classe puisque ce scénario empire les problèmes de contraste et d'éblouissement sans totalement réduire

le besoin en lumière artificielle. De plus, l'augmentation des dimensions des fenêtres sous-entend une augmentation de la chaleur en été et du froid en hiver. Dans la section qui suit, le scénario de l'étagère lumineuse est présenté afin de résoudre ces problèmes.

Figure 4.16 : Scénario 1: l'étagère lumineuse

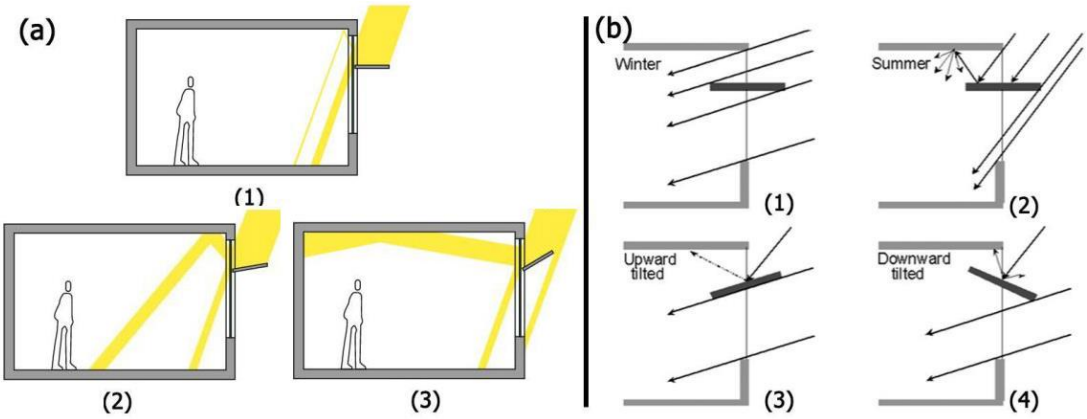
Figure 4.17 : Lumière du jour et éblouissement avec l'agrandissement des fenêtres (en haut à gauche : sDA; en haut à droite : ASE; en bas à gauche : UDI et en bas à droite : DGP).



4.5 Scénario 1: l'étagère lumineuse

L'étagère lumineuse possède de nombreux avantages. Elle permet à la lumière du jour de pénétrer plus profondément et plus uniformément dans la pièce. Elle crée de l'ombre à proximité des fenêtres et réduit l'éblouissement. Elle améliore aussi le comportement thermique du bâtiment, par la réduction de la chaleur dans les espaces intérieurs. Selon Moazzeni et Ghiabaklou (2016), les dimensions, l'angle de rotation et l'orientation de la tablette ont un impact sur la performance de l'étagère lumineuse et la répartition de la lumière naturelle (Fig 4.18).

Figure 4.18:(a) Flux de lumière avec un angle nul (1), 10 ° (2) et de de 30 ° (3), tiré de Lee et al. (2018) (b) impact de la saison et de l'inclination sur la pénétration de la lumière, tiré de Ruck et al. (2000).



Pour ce scénario, les performances de l'étagère lumineuse en matière de confort visuel ont été analysées selon trois paramètres différents (Tableau 4.2-Fig 4.13) : la profondeur, l'angle et l'emplacement. Tout d'abord, les performances sont analysées selon des profondeurs de tablette de 30, 40, 50 et 60 cm. Ensuite, les performances sont analysées selon un angle nul et des inclinaisons vers le bas et vers le haut selon des angles de 7,5°, 15°, 22,5° et 30°. Enfin, les performances sont analysées lorsque la tablette est positionnée à 30 cm en dessous du linteau. De cette manière, l'étagère lumineuse est placée bien au-dessus de la ligne du regard pour ne pas bloquer la vue sur l'extérieur.

Tableau 4-2**:**Mesures de la lumière du jour et de l'éblouissement avec implantation d'une étagère lumineuse et selon ses différentes caractéristiques

Paramètres	**DGP**	**UDI**	**sDA**	**ASE**
Profondeur (cm)				
30	27.7	63.5	90.5	39.3
40	24.6	62.5	88.1	35.7
50	24	62.9	87.9	34.5
60	23.5	62.0	86.9	33.9
Incliné vers le bas				
7.5°	22.5	61.1	85.1	33.3
15°	21.4	60.3	83.3	31.0
22.5°	21	59.9	84.5	29.8
30°	20.2	58.9	80.4	29.2
Incliné vers le haut				
7.5°	24.3	62.6	87.5	34.5
15°	25.2	67.1	97.6	37.1
22.5°	26.8	63.5	88.1	38.7
30°	27.1	63.5	89.3	38.7
Emplacement				
30 cm en dessous du linteau	25.4	64.0	88.7	35.7

Comme on peut l'observer dans la figure 4.18 (a), plus l'angle de l'étagère lumineuse se rapproche du zéro, plus l'étagère fait de l'ombre au niveau des fenêtres. Cependant, elle réduit la quantité de lumière réfléchie au plafond, ce qui empêche une pénétration profonde de la lumière. À l'opposé, plus l'angle est aigu, plus la lumière du jour pénètre profondément dans l'espace intérieur grâce à la réflexion sur le plafond, mais les effets d'ombrage sont considérablement réduits. Outre l'ombrage et la répartition de la lumière du jour, l'étagère doit aussi tenir compte des conditions climatiques de Montréal et des charges de neige et de vent qui occasionnent un poids supplémentaire sur la surface de l'étagère lumineuse ainsi que des risques de chute de glace durant l'hiver.

Suite à l'analyse des mesures de luminance et d'éblouissement (tableau 4.2), il semble qu'une étagère lumineuse inclinée de 15° vers le haut et d'une profondeur de 60 cm soit la meilleure alternative. Cette profondeur permet de maximiser l'effet d'ombre. Lorsque l'on passe d'un angle zéro à un léger angle aigu, il n'existe pas de différence significative en termes de pénétration de la lumière du jour et d'éblouissement. Par contre, en augmentant l'angle d'inclinaison de l'étagère lumineuse vers le bas, les risques de chutes de neige sont accrus. Par conséquent, l'inclinaison de 15° semble la plus adaptée au contexte. Cependant, même avec un léger angle aigu, les risques d'accumulation de neige et d'eau sont encore présents, c'est pourquoi un système de récupération de l'eau (neige et pluie) et de redirection vers un pot installé au bas de la fenêtre doit être intégré au dispositif. Ce système doit diriger l'eau vers le bas des fenêtres, sans que l'eau n'entre en contact avec le bâtiment ou les fenêtres afin de ne pas créer de l'humidité supplémentaire. Dans le cas d'une association avec un dispositif de verdure verticale, l'étagère lumineuse permettrait d'ombrager les plantes et de leur fournir l'eau dont elles ont besoin.

4.6 Scénario 2: panneau d'ombrage conventionnel

Le biomimétisme est l'art de résoudre des problèmes en s'inspirant de la nature. En se basant sur cette idée, cette section présente un scénario de panneau d'ombrage qui s'inspire des plantes pour optimiser le confort visuel des élèves et résoudre les problèmes d'éblouissement, de radiation solaire et de luminance dans la salle de classe. Ce scénario se base sur l'hypothèse que les géométries des plantes ou leurs motifs de croissance ont le potentiel d'optimiser les performances d'un dispositif d'ombrage(fig 4.19). Au cours de leur croissance, de nombreuses plantes suivent la lumière du soleil (positif) ou s'en détournent (négatif). C'est ce que l'on nomme l'héliotropisme. Dans le cas d'un héliotropisme positif, le mécanisme vise à optimiser l'énergie issue des rayons solaires pour maximiser la photosynthèse. Dans ce cas-ci, la plante se tourne, dans un mouvement réversible, vers la lumière tout au long de la journée pour se fermer la nuit tombée afin de ne pas perdre les ressources acquises en journée (Futura, n.d.). L'héliotropisme est une forme de phototropisme. Ce dernier décrit la corrélation entre orientation de la croissance des plantes et lumière (Futura, n.d.). On parle de phototropisme positif quand le mouvement touche les tiges et de phototropisme négatif quand il touche les racines (Daugey, 2018; Futura, n.d.). En effet, alors que les feuilles cherchent la lumière, les racines cherchent l'ombre (Andréanne, 27 juillet 2021). Une fois arrivée à maturité, la plante se fige en étant généralement orientée vers l'est (Futura, n.d.; Andréanne, 27 juillet 2021). Contrairement à l'héliotropisme, ce mouvement est irréversible.

La vigne vierge est sélectionnée pour la conception de ce dispositif. Cette plante grimpante supporte très bien le climat rigoureux local. Elle est d'ailleurs le symbole des rues et ruelles montréalaises. Les tiges de la vigne vierge fuient la lumière

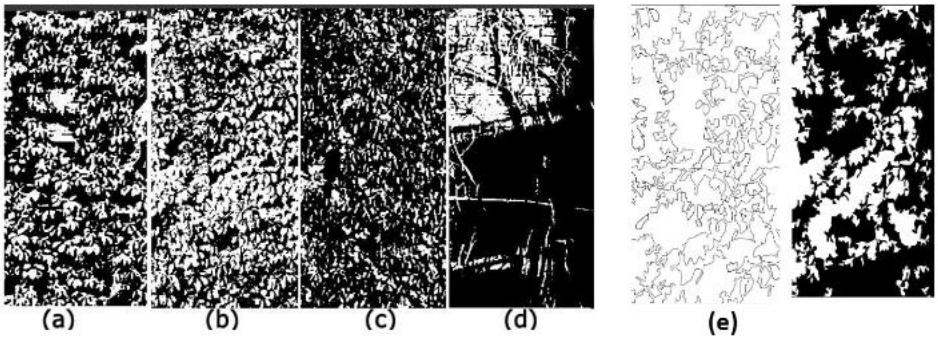
(héliotropisme négatif) (Bernier, 2011; Baillaid, 2007), alors que les feuilles se tournent vers le soleil (héliotropisme positif) (Baillaid, 2007).

Figure 4.19 : scénario 2: Panneau d'ombrage conventionnel

La conception s'appuie sur la croissance d'une vigne vierge (parthenocissus quinquefolia) existante qui recouvre le mur d'un bâtiment situé à Montréal et orienté sud-ouest (Fig 4.20), tout comme l'école Laurier. Des photographies de ce mur ont été prises au cours des quatre saisons, lors de journées choisies aléatoirement. Les photographies prises au printemps, en été et en automne ont été utilisées pour déterminer et simuler le motif résultant de la couverture foliaire. Le motif ainsi dégagé détermine les perforations du panneau d'ombrage (Fig 4.20 (e)). La croissance de la plante étudiée et le pourcentage de la couverture ont été estimés en fonction de la surface prévue des feuilles sur le mur (c'est-à-dire le pourcentage de couverture foliaire par rapport à l'espace vide) (Fig 4.21).

Figure 4.20Mur végétal et changements de feuillage selon les saisons (respectivement printemps, été, automne et hiver).

Figure 4.21 Photographies négatives du feuillage. (e) : modélisation de photographie négative.



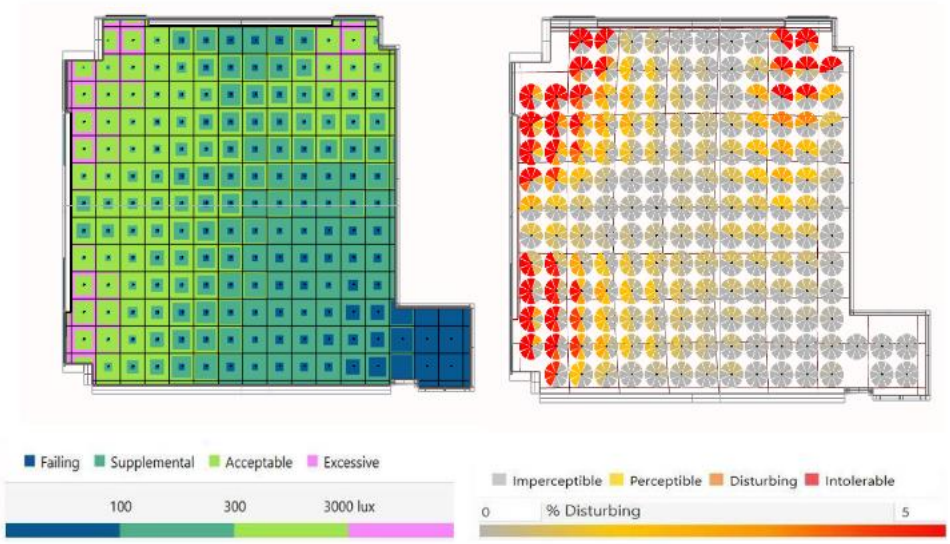
Environ 35 configurations différentes ont été simulées. Toutes ces configurations prévoient l'installation du dispositif à toutes les fenêtres de la salle de classe. Ces configurations incluent des variables telles que l'orientation (SE-SW) et la proportion de couverture (30%, 40%, 50% et 60%). Chaque scénario a été examiné et analysé dans une optique de performance en matière de qualité visuelle et de contrôle de l'éblouissement. Les analyses de performances se sont appuyées, tout comme les analyses précédentes, sur les mesures du sDA, ASE, UDI et DGP.

Parmi tous les scénarios considérés, les résultats montrent qu'une couverture de 30% atteint le double objectif d'améliorer l'uniformité de la lumière du jour et contrôler l'éblouissement (Fig 4.22). Bien que ce niveau de couverture ne permette pas la pénétration de la lumière du jour la plus optimale par rapport aux autres configurations,

elle génère le plus d'impacts dans l'orientation sud-est, dans laquelle les effets négatifs de la lumière du jour se font le plus ressentir.

Dans le cas où seuls deux panneaux d'ombrage sont installés au niveau des fenêtres orientées sud-ouest, la DGP et l'UDI diminuent respectivement de 20% et 12%. Avec un dispositif à toutes les fenêtres, la DGP et l'UDI sont réduits de 49,1 % et 26 %. Avec des panneaux d'ombrage installées sur les fenêtres orientées en sud-est, la DGP et l'UDI diminuent respectivement de 36 % et 15,9 %. En outre, à couverture foliaire égale, la DGP diminue de 70% dans l'orientation sud-est alors que le dispositif n'a pas d'effet significatif sur le contrôle de l'éblouissement dans l'orientation sud-ouest.

Figure 4.22 À gauche UDI et à droite DGP pour une couverture foliaire de 30%.



4.7 Scénario 3: panneau de verdure verticale réglable

Les plantes utilisées pour le SVV doivent pouvoir tolérer et s'adapter aux conditions climatiques extrêmes de Montréal (forte irradiation, écarts considérables de température, humidité, chutes de neige et gel). D'autres recherches ont émis l'hypothèse que la vigne vierge est tout particulièrement adaptée aux températures froides et humides de Montréal (Mårtensson et al., 2014), c'est pourquoi cette plante a été sélectionnée pour cette expérimentation. Tel qu'expliqué au chapitre 3, les plantes possèdent de nombreux avantages. Elles favorisent une bonne santé mentale et physique et leur présence participe à la sensibilisation sur l'environnement. De leur côté, les plantes grimpantes créent de l'ombrage sur les murs, ce qui permet de diminuer la charge de refroidissement dans les espaces intérieurs. De son côté, la vigne vierge est un symbole de la ville de Montréal et, de ce fait, participe au sentiment d'appartenance à une communauté. De plus, la vigne vierge représente les changements saisonniers. Le changement de couleur et la disparition des feuilles en hiver harmonisent les individus au rythme de la nature (Bernier, 2011; Robertson, 1991; Stec et al, 2005; Ulrich, 1991; Newton, 2004; Satumane et Suk, 2018).

Selon Satumane et Suk (2018), les plantes grimpantes caduques créent un système d'ombrage auto-réglable. En hiver, au moment où le besoin en lumière naturelle se fait le plus sentir, les plantes ne possèdent plus de feuilles, ce qui permet au soleil de traverser la façade et de la réchauffer. En été, la couverture foliaire bloque la majorité du rayonnement solaire, ce qui limite le réchauffement des espaces intérieurs et l'éblouissement (Satumane et Suk, 2018). Cette opinion est partagée par Ip et al (2010) pour qui les verrières végétales à feuillage caduque qui sont « stratégiquement intégrées aux façades des bâtiments peuvent agir comme des brise-soleils dynamiques réactifs » (traduction de l'auteure).

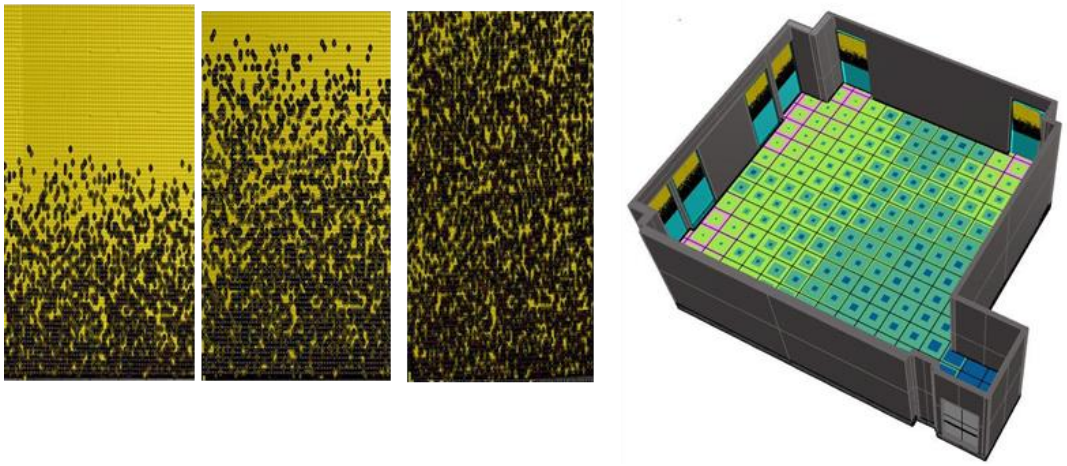
Figure 4.23 Scénario 3: panneau de verdure verticale (ou SVV) réglable

L'objectif de cette section est de présenter les résultats des diverses simulations de panneaux de verdure verticale selon l'intensité de la couverture foliaire. Ce scénario ne tient pas compte du nombre de couches de feuilles (Fig 4.23). Il est possible de simuler la couverture (pourcentage de recouvrement de la surface), sans connaître le nombre de couches. La croissance moyenne de la plante a été étudiée pour la simulation, ce qui a permis d'estimer le pourcentage approximatif de couverture selon la saison, soit environ 40 % de la surface au printemps, 65 % en été et 20 % en automne (Fig 4.24). Les paramètres lumineux ont pu être calculés sur la base de cette estimation. Pour la simulation du panneau de verdure verticale, les couvertures foliaires de 20%, 40% et 65% sont considérées ainsi qu'un coulissement vertical de 15, 30, 45 et 60 cm. Parmi toutes ces alternatives, trois modèles sont finalement sélectionnés pour la simulation finale (Fig 4.24).

Parmi tous les scénarios considérés, la couverture de 20 % semble la plus performante, puisqu'elle laisse plus de lumière du jour pénétrer à l'intérieur du bâtiment. Les résultats montrent que les panneaux de verdure verticale possédant une couverture de

20% avaient plus d'impact par rapport aux autres pourcentages de couverture. Lorsque toutes les fenêtres sont munies de panneaux de verdure verticale, la DGP et l'UDI sont respectivement réduits de 70.6 % et 54.2%. Lorsque seules les fenêtres orientées sud-ouest sont munies de panneaux, la DGP et l'UDI diminuent respectivement de 49.5% et 27.7%. Lorsque le dispositif est installé sur les deux fenêtres au sud-est, la DGP et l'UDI diminuent respectivement à 21.7 % et 27.6 %. On voit donc que l'orientation sud-est est plus performante que l'orientation sud-ouest. À couverture égale, la DGP de l'orientation sud-est diminue de 70% alors que l'installation du dispositif dans l'orientation sud-ouest n'a pas d'effet significatif sur le contrôle de l'éblouissement.

Figure 4.24 À gauche : modèles de panneaux de verdure verticale avec 20%, 40% et 65% de couverture sélectionnés pour la simulation finale; À droite : simulation finale de l'espace intérieur de la classe et UDI avec panneau de verdure verticale d'une couverture de 20%.



Étant donné que le feuillage est caduc et que le taux de couverture dépend de la croissance de la plante et du climat, les calculs et, de ce fait, les résultats restent approximatifs. Pour atteindre des objectifs précis et ancrés dans la réalité, il faudrait recueillir d'autres données pertinentes concernant le taux de couverture, le rapport solide sur vide et la disponibilité de la lumière du jour selon la saison. Cependant, les résultats de cette expérimentation mettent en évidence un gain solaire indésirable en été et un problème d'éblouissement qui s'amplifie en hiver.

Parmi les scénarios considérés et les paramètres différents de coulissement vertical du panneau (15-30-45-60 cm) le coulissement de 60cm semble le plus prometteur. Même si les résultats montrent une augmentation de la pénétration de la lumière du jour et une augmentation de l'éblouissement, le dispositif répond aux besoins des usagers et aux conditions climatiques puisqu'il est réglable.

4.8 Modèle final de SVV

Le modèle final combine un système de verdure verticale réglable et une étagère lumineuse. La conception de ce modèle se base sur les résultats des analyses précédentes. Le système de verdure verticale est composé d'une jardinière en fibre de verre, d'un treillis et d'un filet de support en acier inoxydable. La taille du filet de support est de 120 cm × 100 cm. Les dimensions du SVV sont égales à celles des fenêtres, soit 100cm × 120cm. Il est conçu pour coulisser verticalement le long de la fenêtre et du bâtiment. Le treillis métallique de 15.2 cm x 15.2 cm doit permettre la croissance verticale de la plante. Ces dimensions ont été choisies en tenant compte de la croissance naturelle de vigne (Fig 4.25) (Satumane et Suk, 2018). Le treillis est installé à 8,5 cm de la fenêtre pour fournir suffisamment d'espace pour la croissance des plantes. Les plantes grimpantes, via les supports, sont guidées et peuvent se propager pour atteindre le niveau de couverture souhaité sur la structure allouée au fil du temps.

Afin que les utilisateurs puissent ajuster le panneau selon les différentes heures de la journée et les conditions climatiques, deux conteneurs sont installés sur un rail en acier inoxydable. Ce rail en U est conçu pour faire glisser le panneau d'ombrage verticalement. La jardinière, dont les dimensions font 20×25×80 cm, est similaire au système de treillis modulaire G-sky mentionné dans le troisième chapitre (Fig 4.25). Avant de planter les espèces dans la jardinière, plusieurs couches d'isolant sont d'abord appliquées pour recouvrir complètement tous les interstices et maintenir l'humidité

dans le sol (Fig 4.26). Les systèmes de treillis modulaires (planter box) qui possèdent des compartiments doivent être préférablement remplis d'agrégat et de substrat, une matière organique chargée d'éléments nutritifs moins lourde que le terreau traditionnel (Petty, 2008; Manso et Castro-Gomes, 2015; Bernier, 2011). Les supports de culture sont généralement constitués de composants organiques et inorganiques (par exemple, de la mousse, pour réduire son poids). Dans ce cas-ci, le support de culture est composé d'un mélange de substrat léger et d'un matériau granulaire expansé ou poreux (par exemple, de la mousse, des granulés minéraux à particules moyennes à fines, des fibres de coco ou du tissu recyclé), afin d'obtenir une bonne capacité de rétention d'eau. Le sol est composé d'une première couche de 2,5 cm de paillis de lave, d'une deuxième couche de 18 cm de matière organique et une dernière couche de 2,5 cm d'obsidienne expansée avec nappe drainante (Manso et Castro-Gomes, 2015; Petty, 2008).

Pour ombrager les plantes dans la jardinière et également améliorer la qualité de l'éclairage naturel, l'étagère lumineuse est installée sur le dessus du panneau de verdure. Pour empêcher les chutes de neige pendant l'hiver, recueillir et rediriger l'excès de neige et d'eau de pluie vers le pot installé dans le bas de la fenêtre, l'étagère de 60cm de profondeur est inclinée de 15° vers le haut. Un tuyau fixé à l'étagère redirige l'eau vers la jardinière.

Figure 4.25 Combinaison du panneau de verdure verticale réglable avec l'étagère lumineuse. (a) étagère lumineuse avec pente de 15° (b) espace d'évacuation de l'eau vers la jardinière (c) voie d'eau (d) Squelette et cadre en acier inoxydable (e) Cadre en acier inoxydable pour régler le panneau d'ombrage.

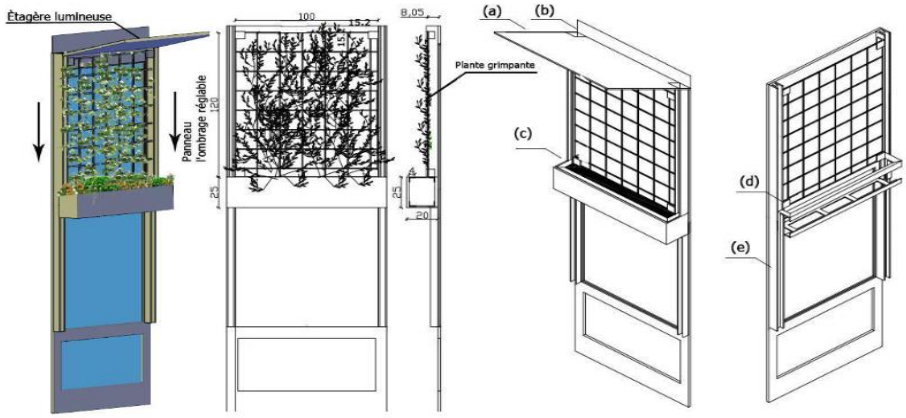


Figure 4.26 Schéma de plantation

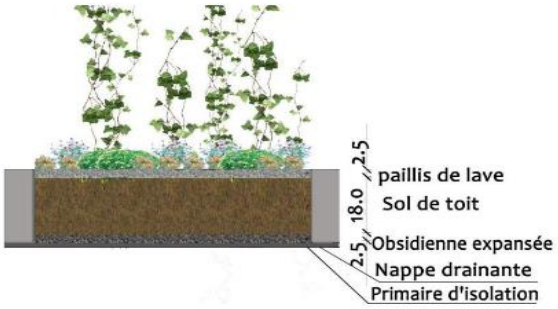


Figure 4.27 Plantes proposées pour le SVV et le jardin de fenêtre respectivement; lierre grimpant (hedera helix), lierre de boston (parthenocissus tricuspidata), vigne vierge (parthenocissus quinquefolia), lysimaque nummulaire (Lysimachia nummularia) et arnica des montagnes (arnica montana).:

Comme il est déjà mentionné dans le chapitre 3, très peu de ressources proposent des recommandations pour sélectionner les plantes les mieux adaptées à la végétalisation intégrée aux bâtiments, à Montréal. Pour minimiser et optimiser les conditions d'éclairage et le contrôle de l'éblouissement dans la salle de classe sélectionnée, il faut que l'ombrage soit réglable. Comme pour tout système de verdure verticale, la conception doit aussi tenir compte de la croissance, de la couleur, de la floraison, du feuillage et de la composition globale des plantes. Dans les climats continentaux humides, le lierre de Boston (parthenocissus tricuspidata) est l'espèce qui fournit un effet de refroidissement maximal, comparable à l'effet des arbres (Al-musaed, 2007a) (Fig 4.27). Les plantes à feuilles persistantes et les vivaces sont aussi de bons choix, en particulier celles qui gardent leurs feuilles plus longtemps que les autres. Selon IP et al. (2010), "les auvents de plantes grimpantes à feuilles caduques stratégiquement intégrés aux façades des bâtiments peuvent agir comme des dispositifs d'ombrage sensibles aux changements climatiques saisonniers. L'ombrage maximal se produit en été lorsque la plante est à son maximum de croissance. La chute des feuilles en automne et en hiver réduit l'ombrage et permet au rayonnement solaire bénéfique d'être absorbé par la surface opaque de la façade du bâtiment ou de pénétrer à travers les fenêtres vers l'intérieur du bâtiment" (traduction de l'auteure).

Cependant, il est aussi possible de proposer d'autres types de plantes et d'espèces, telles que les succulentes et les mousses. Dans le cadre de cette étude, les plantes grimpantes, telles que le lierre grimpant (hedera helix), le lierre de boston (parthenocissus tricuspidata) et la vigne vierge (parthenocissus quinquefolia) sont privilégiées pour le panneau de verdure verticale. Ces plantes sont adaptées aux hivers froids de Montréal (-10° à -40° fahrenheit) et sont capables de pousser verticalement et de fournir un rapide effet d'ombrage pour les fenêtres. Ces plantes grimpantes (Fig 4.25) peuvent également être associées aux mousses pré-cultivées qui tolèrent le froid. Les mousses ont besoin d'un ombrage moyen à dense, d'humidité et de nutriments similaires à ceux de leur habitat d'origine (Julinova et Beckovsky, 2019), mais certaines espèces

supportent assez bien les zones ensoleillées, en montagne ou sur des dunes de sable stabilisées (Wang et al., 2019). Dans la conception de SVV, les façades nord ou est resteront tout de même les plus appropriées pour la plantation de mousses (Julinova et Beckovsky, 2019).

Les particularités biologiques des mousses les rendent non seulement très résistantes à une large gamme de températures, mais aussi à la dessiccation, au gel, à la pollution de l'air et de l'eau et aux maladies. De plus, leur goût spécial repousse animaux et insectes nuisibles (Julinova et Beckovsky, 2019). Grâce à leur capacité à résister, elles croissent naturellement dans les milieux urbains et deviennent des plantes de choix pour la conception de murs ou de façades verts en ville. Les mousses demandent peu d'entretien : elles n'ont pas besoin d'être tondues ou désherbées. Toutes ces caractéristiques rendent plus facile l'entretien de ce dispositif. Si ce dispositif était réellement installé aux fenêtres d'une école, on serait en droit de se demander qui devrait s'occuper de l'entretien. Puisque les plantes se situeraient à l'extérieur et en hauteur, il serait impossible de proposer aux élèves de participer à cet entretien dans une perspective pédagogique. Le problème serait similaire pour l'enseignante qui, non seulement pourrait se mettre en danger, s'ajouterait aussi de nouvelles responsabilités. Pour éviter ce type de problèmes, il faut donc que les plantes aient le moins besoin d'entretien possible. Une autre option serait de planter les mousses dans le bas ou dans le haut du dispositif, juste dans l'ombre de l'étagère lumineuse.

La lysimaque nummulaire (Lysimachia nummularia) et l'arnica des montagnes (arnica montana) sont des vivaces à fleurs qui conviennent aussi au système de verdure vertical et qui sont adaptées au climat montréalais, avec une tolérance au froid de -4° à -40° fahrenheit. Toutefois, leur longévité dépend particulièrement de leur entretien. Le cotoneastre de Pékin (cotonéaster acutifolius) est une espèce indigène du sud de la

Sibérie, de la Mongolie et de la majeure partie de la Chine. Cet arbuste à feuilles caduques est également adapté au climat de Montréal (Fig 4.27).

Finalement, la jardinière peut accueillir une diversité de plantes rustiques et des plantes plus ornementales. Ce dispositif d'ombrage n'est pas seulement conçu pour répondre à des objectifs environnementaux. Ce jardin de fenêtre peut également être utilisé à des fins décoratives et augmenter les valeurs esthétiques de l'environnement et des bâtiments. Certaines plantes succulentes, comme le sedum et la plupart des joubarbes (Sempervivum), peuvent tolérer le froid, la sécheresse et pousser dans tous les climats. Les succulentes rustiques peuvent survivre pendant l'hiver à des températures inférieures à zéro, tant que le sol reste bien drainé et qu'elles sont protégées des intempéries et des baisses de températures extrêmes. C'est particulièrement le cas du genre sedum, qui regroupe un très grand nombre d'espèces dont certaines sont très résistantes au froid et sont adaptées au gel et à la neige. Par contre, les petits sedums ne supportent pas des chaleurs pouvant dépasser les 26°C (Baldwin, 2013; Bagnasco et Riedmuller, 2019; Kelaidis, 2012). En été, elles doivent être gardées à l'abri du soleil. Les plantes cailloux (Lithops) ont également le potentiel d'être utilisées pour les jardins verticaux extérieurs, à condition qu'elles reçoivent plusieurs heures de soleil par jour. Les espèces succulentes comme le Ficoïde à feuilles en cœur (Mesembryanthemum cordifolium) gèlent à partir de −5 °C. Elles peuvent être transférées à l'intérieur pendant l'hiver et la saison des glaces. Cependant, la question de l'entretien se repose : qui aura la responsabilité de les extraire du dispositif, de s'en occuper à l'intérieur et de les replanter le temps venu? Toutes ces considérations sont importantes pour concevoir un SVV dans le contexte montréalais.

Dans cette recherche, en fonction des conditions climatiques et du froid extrême des hivers montréalais, diverses études ont été réalisées sur la sélection de végétaux adaptés aux espaces extérieurs ayant le potentiel de résister au froid extrême, ainsi que sur l'isolation et la protection des racines à l'intérieur de la jardinière contre le froid. Dans

cette recherche, les plantes sont considérées hypothétiquement résistantes aux conditions hivernales rigoureuses.

Étant donné les conditions climatiques et le froid extrême des hivers montréalais, dans cette étude diverses études ont été réalisées sur la sélection de végétaux adaptés aux espaces extérieurs, la capacité de ces-derniers à résister au froid extrême, puis l'isolation et la protection des racines à l'intérieur de la jardinière. Dans le cadre de cette recherche, les plantes sont considérées hypothétiquement résistantes aux conditions hivernales rigoureuses.

Bien que les modèles de transmission de la lumière visible à travers le feuillage utilisent les principes décrits par la loi de Beer-Lambert, le présent mémoire ne considérera pas la superposition du feuillage dans ses modélisations d'une part parce que cette superposition n'est pas souhaitable au niveau pratique et d'autre part parce qu'il est à prévoir que le comportement complexe de la lumière sur des feuilles intercalées de façon aléatoire ne soit pas entièrement prévu par la loi de Beer Lambert qui reconnait plutôt l'épaisseur d'une solution uniformément répartie.

Il faut mentionner que toutes les propositions doivent être vérifiées auprès d'experts dans ce domaine et les résultats doivent être confirmés par une approche expérimentale dans des conditions réelles, en tenant compte du modèle et d'autres paramètres qui affectent la distribution de la lumière dans la salle de classe.

4.9 Conclusion

La présente étude visait à étudier l'impact de trois scénarios différents, l'étagère lumineuse, les dispositifs d'ombrage conventionnels et les dispositifs de verdure verticale, sur le confort visuel dans une salle de classe type à Montréal. Grâce à la simulation par ordinateur, différentes alternatives et paramètres ont pu être explorés

pour améliorer le confort visuel. Ces simulations se sont basées sur l'augmentation des dimensions des fenêtres orientées sud-est. Les fenêtres orientées sud-ouest sont inchangées car leur agrandissement amplifierait les problèmes d'éblouissement et de surchauffe déjà existants. L'augmentation de la taille des fenêtres augmente la disponibilité de la lumière du jour, mais aussi la probabilité d'éblouissement et donc d'inconfort. De plus, le changement climatique augmente désormais la possibilité de vagues de chaleur pendant l'année scolaire. Ils ont donc un impact sur le calendrier scolaire et les annulations d'écoles en particulier début septembre ou fin juin. Afin de résoudre des problèmes, cette recherche a présenté des simulations de l'étagère lumineuse, des panneaux conventionnels perforés à l'image de la vigne vierge et de panneaux de verdure verticale.

L'étagère lumineuse peut essentiellement aider à uniformiser la distribution de la lumière du jour dans la pièce, réduire le problème d'éblouissement et diminuer la chaleur à l'intérieur. Dans cette étude, les résultats montrent que les étagères lumineuses sont plus efficaces dans l'orientation sud-est que dans l'orientation sud-ouest. Placée à 30 cm en dessous du linteau, celle-ci permet de ne pas gêner la vue. De toutes les caractéristiques expérimentées, une profondeur de 60 cm avec une inclinaison de 15°vers le haut semblent les plus optimales dans le contexte de l'étude. L'inclinaison permet de recueillir l'excès de neige et d'eau de pluie et le diriger vers le bas de la fenêtre pour empêcher une accumulation dangereuse et l'humidité. L'étagère pourrait également ombrager un système de verdure verticale et recueillir l'eau qui serait redirigée vers les jardinières.

De leur côté, les expérimentations autour des panneaux d'ombrage conventionnels inspirés des motifs de la vigne vierge montrent qu'une couverture de 30% dans l'orientation sud-est génère plus d'impact que dans l'orientation sud-ouest. Lorsque le dispositif recouvre toutes les fenêtres, la DGP et l'UDI sont respectivement réduits de 70 % et 51,2 %.

Le deuxième chapitre s’intéressait au rôle du motif et de la géométrie dans la conception de dispositifs visant à contrôler la lumière, l'éblouissement et la surchauffe. La culture, les croyances et la fonction déterminent la matérialité de ces dispositifs d’ombrage, comme c’est le cas pour le Mashrabiya ou Shobak du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (Al-Masrani et al., 2018; Naciri, 2007; Babaei et al., 2013). Outre l’aspect ornemental, nombre de dispositifs s’inspirent de la nature dans sa capacité à développer des systèmes et des processus de survie dans des environnement contraignants (Gosztonyi, 2018; Vernoux., 2020). Compte tenu du contexte, l’intégration du vivant semble la solution la plus prometteuse pour la conception d’un dispositif d’ombrage pour la salle de classe sélectionnée.

CONCLUSION

Cette recherche s'inscrit dans un contexte d'urgence en matière de rénovation scolaire. Elle présente les enjeux de la rénovation et de la mise aux normes en vigueur de nombreuses écoles primaires au Québec sous l'angle de la qualité visuelle et thermique. Actuellement, une grande majorité des écoles primaires nécessitent des rénovations majeures en raison de la vétusté du parc immobilier scolaire québécois. C'est particulièrement le cas de Montréal, qui possède l'un des plus vieux parcs immobiliers scolaires du Québec. En raison des coûts, de la présence de bâtiments patrimoniaux et en prévision de la diminution des effectifs scolaires dans le primaire, le Centre de services scolaires de Montréal privilégie la transformation et la réparation plutôt que la démolition et la reconstruction. Bien que la rénovation possède de nombreux avantages dont un coût inférieur à la reconstruction, il n'en reste pas moins que le CSSDM doit faire face à des défis de taille et le questionnement autour du confort thermique et visuel reste plus que pertinent.

Assurer le confort visuel dans les salles de classe revient à assurer un environnement adapté aux besoins non seulement visuels, mais aussi physiques, biologiques et psychologiques des enfants et des enseignants, qui y passent la majeure partie de leur journée. On connait aujourd'hui les effets de la lumière sur les êtres humains et particulièrement les plus jeunes. La lumière du jour a évidemment des effets sur la vue. Elle est la lumière la mieux adaptée à la sensibilité visuelle de l'œil humain. Elle constitue d'ailleurs la source de lumière de référence de l'être humain, en raison de ses qualités spectrales mais aussi des vues qu'elle offre, ce qui explique pourquoi elle est

préférée à la lumière artificielle. Outre la vision, la lumière du jour participe aussi à la stabilité du corps et de l'esprit. Elle transmet des informations au cerveau qui les répercute sur le système nerveux, endocrinien, immunitaire, musculaire et osseux et synchronise les horloges internes en conséquence. De ces informations dépendent notre sommeil, notre croissance, nos humeurs, notre attention, notre concentration, mais aussi le développement de maladies. L'excès ou le manque de lumière naturelle ou un éclairage artificiel inadapté épuise nos ressources psychologiques et mentales, provoquant de la fatigue, une diminution des performances, une augmentation du stress et du besoin de récupération (Steidle et al., 2014). Dans le cas des élèves, on sait aussi qu'une lumière du jour abondante et adaptée aux tâches favorise la mémoire, le traitement de l'information et donc les résultats scolaires.

Pourtant la plupart des salles de classe ne sont pas visuellement confortables. Tirer des rideaux et changer de place le mobilier ne sont pas de bonnes solutions pour pallier à l'éblouissement et à l'inconfort. D'autres avenues qui tiennent compte du contexte québécois et montréalais, des questions esthétiques, fonctionnelles et environnementales peuvent être explorées. La présente recherche s'intéresse donc aux systèmes d'ombrage extérieurs et tente de déterminer l'impact de ces dispositifs et de leurs caractéristiques sur la qualité de la lumière du jour à l'intérieur d'une salle de classe existante. L'école primaire Laurier a été sélectionnée en raison de sa situation géographique, de sa vétusté et des réparations majeures en cours. En effet, alors que la construction date de 1970, l'école possède un indice de vétusté si avancé que sa démolition devrait être préconisée. En ce sens, cette école est emblématique des problématiques et des enjeux du parc immobilier scolaire montréalais et québécois. Afin d'y améliorer le confort visuel, plusieurs alternatives à l'existant ont été proposées. Ces alternatives se sont basées sur l'agrandissement des fenêtres, d'après la proposition faite par l'école et refusée par la Ville de Montréal. Ces alternatives ont mené à la conception d'un dispositif qui associe étagère lumineuse et système de verdure verticale. Ce modèle est coulissant pour répondre aux besoins des usagers et aux

conditions climatiques. Il faut mentionner que toutes les propositions doivent être vérifiées auprès d'experts dans le domaine et les résultats doivent être confirmés par une approche expérimentale dans des conditions réelles, en tenant compte du modèle et d'autres paramètres qui affectent la distribution de la lumière dans la salle de classe.

L’expérimentation de l’étagère lumineuse, d’un dispositif d’ombrage conventionnel et d’un SVV et leur combinaison reste limitée à l’espace numérique. De ce fait, les résultats ne sont pas prouvés. L’expérimentation dans la matière aurait permis, non seulement de voir comment réagissent les systèmes, les plantes, le bâtiment et les occupants dans le temps, mais aussi de donner une idée des coûts qui pourraient leurs être associés. Elle aurait aussi permis d’entrevoir le potentiel de reproductibilité de ces systèmes sur l’ensemble des écoles primaires du territoire montréalais et québécois. Cependant, la simulation a permis de démystifier ces dispositifs et mettre en lumière leur potentiel dans la création d’espaces d’apprentissage confortables. Avec un peu de chance, il sera peut-être possible dans un futur proche de concevoir et installer un prototype du dispositif final à la fenêtre de la classe sélectionnée ou ailleurs.

:

ANNEXE

Annexe : 3.1 Récapitulatif des études de performance des systèmes de verdure verticale (SVV)

	Sources	**Climate**	**Méthode**	**Types de plantes** Décidius **(D)** Persistant **(P)** Semi-persistant **(SP**) Annuel **(A)**	**Résultat**
1	Magliocco et Perini (2015)	Italie Climat méditerranéen	Expérimental et Questionnaire	—	Cette surveillance comprend des inspections avant et après l'installation pour évaluer les perceptions des utilisateurs sur les effets du SVV à l'intérieur du bâtiment. Valeurs moyennes attribuées aux effets positifs des vues vertes par l'échantillon total d'interviews.
2	Pérez et al. (2011)	Espagne Climat continental méditerranéen sec	Expérimental	Lierre (Hedera helix) P Chèvrefeuille des bois (Lonicera periclymenum) D Vigne vierge (Parthenocissus quinquefolia) D Clématite (Clematis) D	Les résultats ont confirmé la grande capacité des SVV à produire de l'ombre et à la chaleur sur le mur de façade du bâtiment
3	Lee et Jim (2019)	Chine Climat subtropical humide	Expérimental	Chèvrefeuille du Japon (Lonicera japonica) Vigne *S*P	Un système de mur vert rotatif a été proposé avec un écran végétal réglable. Le plus grand avantage thermique du mur vert a été réalisé sur la surface extérieure du mur en béton derrière la végétation grimpante avec un refroidissement maximal de 6,6 K par temps ensoleillé
4	Sunakorna et Yimprayoona (2011)	Thaïlande Climat tropical	Expérimental	-Thunbergie à grandes fleurs (Thunbergia grandiflora) P -Courge écarlate (Coccinia grandis) P -Liane corail (Antigonon leptopus)	La combinaison de la biofaçade avec des systèmes de climatisation peut aider à réduire efficacement la charge de refroidissement. La température ambiante avec biofaçade a considérablement diminué, mais n'a pas pu atteindre la zone de confort
5	Stec et al. (2005)	Pays-BasClimat maritime ou océanique modéré	Simulation	Lierre (Hedera helix) P	Pour un même rayonnement solaire, l'échauffement de la plante est environ deux fois plus faible que pour les stores. La température de la plante n'a jamais dépassé la température de 35,8°C, alors que les stores pouvaient dépasser les 55,8°C

6	Poddar et al.(2017)	Corée du sud Climat tempéré	Simulation	Lierre (Hedera helix) P	Le mur vivant a respectivement réduit la consommation de chauffage de 60 %, 7 % et 3 % pour le bâtiment résidentiel, de recherche et administratif, en raison de la couverture de lierre du bâtiment
7	Pérez et al. (2017)	Espagne Climat continental méditerranéen sec	Expérimental	Vigne vierge à trois pointes (Partenocissus Tricuspidata) P	Des économies d'énergie ont été obtenues (jusqu'à 34 % avec un LAI de 3,5-4) pendant la période estivale. La dépendance à l'orientation de la façade a été prouvée.
8	Zheng et al. (2020)	Chine Climat sutropical	Expérimental	Courge éponge (Luffa) P Épinard du Malabar (Basella alba) P Gloire du matin (Ipomoea) P	La présence d'ombrages en été réduit l'impact du rayonnement solaire sur la consommation d'énergie de refroidissement avec des coefficients de corrélation de 0,94 à 0,61.
9	Ip et al. (2010)	Royaume-Uni Climat tempéré océanique	Expérimental	*Vigne vierge vraie (Parthenocissus quinquefolia) D* *Renouée du Turkestan (Polygonum baldschuanicum) D* *Vigne de Boston (Parthenocissus tricuspidate) D* *Glycine de Chine (Wisteria sinensis) D* *Vigne du Japon (Vitis coignetiae) D*	. La verdure a permis une diminution minimale de la température interne de 3,5°C, avec des sommets allant jusqu'à 5,6°C. La transmission solaire du feuillage variait de 0,43, avec un feuillage à une seule couche, jusqu'à 0,14 avec cinq couches de feuilles.
10	Satumane et Suk (2018)	Etats-Unis Subtropical humide avec des étés chauds	Expérimental	*Jasmin de Caroline (Gelsemium sempervirens) P à SP* *Badamier sauvage (Combretum indicum) SP* *Jasmin étoilé (Trachelospermum jasminoides) P*	Les caractéristiques physiques des plantes telles que la densité du feuillage, la taille des feuilles et la distribution ont un impact significatif sur la qualité et la quantité de lumière du jour dans le bâtiment.
11	Hunter et al. (2014)		Expérimental, observationnel et Simulation	-	Hunter et al ont examiné 28 études sur les performances des SVV pour développer une méthodologie adaptable à n'importe quelle autre étude. Dans les climats aux hivers froids, probablement des compromis à faire entre l'utilisation de plantes à feuilles caduques, semi-caduques et persistantes afin que la façade verte puisse réduire autant le coût du refroidissement en été que le coût de chauffage en hiver.

BIBLIOGRAPHIE

École professionnelle de St-Hyacinthe (n.d). ABCP Architecture. https://www.abcparchitecture.com/projets/architecture/ecole-professionnelle-de-st-hyacinthe

Abdullahi, M. S., & Alibaba, H. Z. (2016). Facade greening: a way to attain sustainable built environment. International Journal of Environmental Monitoring and Analysis, 4(1), 12-20.

Abdulmohsen, A., Boyer, L. L., & Degelman, L.O. (1994). Evaluation of lightshelf daylighting systems for office buildings in hot climates. http://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/6622/ESL-HH-94-05-04.pdf

Abdul-Rahman, Wang, C., Mohd-Rahim, F-A. & Loo, S-C. (2014, décembre). Vertical Greenery Systems (VGS) in Urban Tropics. Open House International, vol. 39, no 4. p. 42-52. DOI.org (Crossref), https://doi.org/10.1108/OHI-04-2014-B0005.

Agaajani, Sh. (2013). Le mur végétal_Michel Blanc : une approche scientifique et artistique. Revue technique Luxembourgeoise (1),38-39. https://www.verticalgardenpatrickblanc.com/dl/4692.

Ai, F. (2010). Reflected daylighting in schools: an investigation into design principles of reflected daylighting in primary schools in the warm-dry climate of Iran (Doctoral dissertation, University of Sheffield).

Al-Masrani, S. M., Al-Obaidi, K. M., Zalin, N. A., & Aida Isma, M. I. (2018). Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: challenges and future trends. Solar Energy, 170, 849–872. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.04.047

Almusaed, A. (2011). Illuminate by light shelves. In Biophilic and bioclimatic architecture (pp. 325-332). Springer, London.

Andréanne. (2021, August). Le phototropisme ou les plantes qui bougent - Blogue de GUEPE. https://www.guepe.qc.ca/blogs/le-phototropisme-ou-les-plantes-qui-bougent.

Annesi-Maesano, I., Baiz, N., Banerjee, S., Rudnai, P., Rive, S., & Sinphonie Group. (2013). Indoor air quality and sources in schools and related health effects. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B, 16(8), 491-550.

Antonis, K., Aris, T., Lambros, D., & Stelios, Z. (2017). A review of light shelf designs for daylit environments. Sustainability, 1, 71–71. https://doi.org/10.3390/su10010071

Antonis, K., Aris, T., Lambros, D., & Stelios, Z. (2017). A review of light shelf designs for daylit environments. Sustainability, 1, 71–71. https://doi.org/10.3390/su10010071

Babaei, M., Soltanzadeh, H., & Islami, S. Y. (2013). A study of the lighting behaviour of Moshabak in Kashan's houses with emphasis on the notion of transparency. Architectural Science Review, 56(2), 152-167.

Badeche, M., & Bouchahm, Y. (2020). Design optimization criteria for windows providing low energy demand in office buildings in algeria. Environmental and Sustainability Indicators (6). https://doi.org/10.1016/j.indic.2020.100024.

Baillaud, L. (2007). La vegetalite : un reseau de determinismes reliant structure, biologie et milieu de vie dans le deuxieme royaume de la nature ? Acta Botanica Gallica : Bulletin De La Société Botanique De France, 154(2), 153.

Baker, N., & Steemers, K. (2014). Daylight design of buildings: a handbook for architects and engineers. Routledge.

Baldwin, D. L. (2013). Succulents Simplified: Growing, Designing, and Crafting with 100 Easy-Care Varieties. Timber Press.

Bellia, L., Marino, C., Minichiello, F., & Pedace, A. (2014). An overview on solar shading systems for buildings. Energy Procedia, 62, 309–317. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.392

Berardi, U., & Anaraki, H. K. (2018). The benefits of light shelves over the daylight illuminance in office buildings in toronto. Indoor and Built Environment, 27(2), 244–262. https://doi.org/10.1177/1420326X16673413

Bernier, A.-M. (2011a). Végétalisation du bâtiment en milieu urbain : bénéfices et perspectives (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec). https://archipel.uqam.ca/4022/1/M11946.pdf

Bernier, A.-M. (2011b). Les plantes grimpantes, une solution rafraichissante. Centre d'écologie urbaine de Montréal. https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2219252

Berry, M. A. (2002). Healthy School Environment and Enhanced Educational Performance: The Case of Charles Young Elementary School, Washington, DC. The Carpet and RugInstitute (CRI). https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED473985.pdf

Besner, J. (2016). Les murs vivants, un remède vert pour contrer la pollution. Urbanité, 52-53

Beute, F., & de Kort, Y. A. W. (2014). Natural resistance: exposure to nature and self-regulation, mood, and physiology after ego-depletion. Journal of Environmental Psychology, 40, 167–178. https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2014.06.004

Bhalla, A., & Manu, S. (2014). Impact of native evergreen trees on the visual comfort in an office space in Ahmedabad, India. In 30th International PLEA Conference: Sustainable Habitat for Developing Societies: Choosing the Way Forward-Proceedings, 17-24.

Binabid, J. (2010). Vertical garden: the study of vertical gardens and their benefits for low-rise buildings in moderate and hot climates. In High Performance Building Enclosures-Practical Sustainability Symposium.

Blouin, M. (2014). Définir l'ingénierie écologique : quels enjeux?.

Bodart, M. (2002). Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique (Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées Unité d'Architecture, Université Catholique de Louvain, Belgique). https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/object/boreal%3A185581/datastream/PDF_01/view

Boursier, Y. (2022, June 29). Les écoles pourraient fermer s'il fait trop chaud. L'info De Petite-Nation. https://infopetitenation.ca/en-vedette/2022/06/30/les-ecoles-pourraient-fermer-sil-fait-trop-chaud/

Bribach, C. J., & Rossomano, D. (2012). Vertical Garden Panel. U.S. Patent No. 8,141,294. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. https://patentimages.storage.googleapis.com/8c/f1/68/a12ef55ff829be/US8141294.pdf

Carlander, J., Moshfegh, B., Akander, J., & Karlsson, F. (2020). Effects on energy demand in an office building considering location, orientation, façade design and

internal heat gains—a parametric study. Energies, 13(23), 6170–6170. https://doi.org/10.3390/en13236170

Carletti, C., Sciurpi, F., & Pierangioli, L. (2014). The energy upgrading of existing buildings: window and shading device typologies for energy efficiency refurbishment. Sustainability, 6(8), 5354–5377. https://doi.org/10.3390/su6085354.

Chandrasekaran, V. (2020). Analysis of Sun Path and Effective Shading Co-efficient using ECOTECT Software for Coimbatore. International Journal of Architecture and Infrastructure Planning, 6(1), 18-27.

Charlery, C. (2003). Histoire des persiennes : de Versailles aux Antilles. Bulletin De La Société D'histoire De La Guadeloupe, 134(134), 19–26. https://doi.org/10.7202/1040744ar

Charoenkit, S., & Yiemwattana, S. (2017). Role of specific plant characteristics on thermal and carbon sequestration properties of living walls in tropical climate. Building and Environment, 115, 67–79. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.017.

Chayaamor-Heil, N., & Vitalis, L. (2021). Biology and architecture: an ongoing hybridization of scientific knowledge and design practice by six architectural offices in france. Frontiers of Architectural Research, 10(2), 240–262. https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.10.002.

Chi, D. A., Moreno, D., & Navarro, J. (2018). Correlating daylight availability metric with lighting, heating and cooling energy consumptions. Building and Environment, 132, 170–180.

CIE Standard Overcast Sky and Clear Sky (n.d). Commission International de l'Eclairage. https://cie.co.at/publications/cie-standard-overcast-sky-and-clear-sky

Cingolani, F. (2013, Septembre). unMonastery : Architecture paramétrique et collaborative. Immaginoteca. https://www.immaginoteca.com/unmonasteryparametrique/#:%7E:text=Petit%20rappel%20sur%20la%20d%C3%A9finition,%2C%20structurel%2C%20social%2C%20urbain

Collin, P. (2001). L'adaptation au milieu chez les plantes vasculaires. L'annee Biologique, 40, 21–42.https://doi.org/10.1016/S0003-5017(01)72083-1

Commission scolaire de Montréal (2005). La place du patrimoine scolaire dans la politique du patrimoine de la Ville de Montréal (Rapport). Consultation publique de

la Ville de Montréal sur le projet de politique du patrimoine. https://ocpm.qc.ca/sites/default/files/pdf/PD04/6d.pdf

Condensed Report. Pacific Gas and Electric Company. https://h-m-g.com/downloads/Daylighting/schoolc.pdfLouafi,S., Abdou, S. (2013). Benefits and well-being perceived by pedestrian in vegetated urban space in periods of heat stress. International Journal of Engineering and Technology, 5(1), 20.

Corradi, L. (2010). U.S. Patent No. 7,832,144. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

DAICH, S. (2011). Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques, Cas de la ville de Biskra (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider Biskra).

Dans F. Rey, F. Gosselin, A. Doré (éd.). Ingénierie écologique Action par et/ou pour le vivant ? (pp. 15-28). QUAE

Demers, C. M. H. (1997). The Sanctuary of Art: images in the assessment and design of light in architecture (Doctoral dissertation, University of Cambridge).

Denan, Z., & Majid, N. H. A. (2015). An assessment on glare from daylight through various designs of shading devices in hot humid climate, case study in Kuala Lumpur, Malaysia. International Journal of Engineering and Technology, 7(1), 25. http://www.ijetch.org/vol7/760-C0024.pdf

Després, C., Coté, C., De Blois, M., Demers, C., Doyle, M., Dufaux, F., Gagnon, C. (2021). L'ABC de la rénovation scolaire. Guide de planification immobilière pour les écoles primaires publiques du Québec, Fascicule A. Schola, Université Laval. https://www.schola.ca/telech/ABC_de_la_renovation_scolaire-Fascicule-A.pdf

Eames, M., Dixon, T., Lannon, S- C., Hunt, M., De Laurentis, C., Marvin, S., Hodson, M., Guthrie, P., & and Georgiadou, M- C. (2014). Retrofit 2050: critical challenges for urban transitions. [Working Paper]. Cardiff University. https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/65743/1/critical_challenges_briefing-March%202014.pdf

École Nationale de Cirque (n.d.). Advanced Glazings Ltd. https://www.advancedglazings.com/case-studies/cirque

École professionnelle de St-Hyacinthe (n.d). ABCP Architecture. https://www.abcparchitecture.com/projets/architecture/ecole-professionnelle-de-st-hyacinthe

Édifice Maurice-Normand - 740 Bel-Air. (n.d.). ABCP Architecture. https://www.abcparchitecture.com/projets/architecture/edifice-maurice-normand-740-bel-air

Edwards, L, Torcellini, P. (2002). Literature review of the effects of natural light on building occupants (Rapport technique). National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/30769.pdf

El Amrousi, M. (2017). Masdar City: As an example of sustainable facades and building skins. International journal of structural and civil engineering research, 6(1), 40-44. http://www.ijscer.com/uploadfile/2017/0216/20170216023957267.pdf

Emami, N., & Giles, H. (2016). Geometric Patterns, Light and Shade: Quantifying Aperture Ratio and Pattern Resolution in the Performance of Shading Screens. Nexus Network Journal, 18(1), 197-222. https://link.springer.com/article/10.1007/s00004-015-0279-z

Erskine, R. (1968). Architecture and town planning in the north. Polar Record, 14(89), 165-171.

Euro Inox et diamant building (2012). Green Walls in Stainless Steel. Building Series (17). https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/euroinox/VertGardens.pdf?m=1488200847&

Frumkin, H. (2001). Beyond toxicity: human health and the natural environment. American journal of preventive medicine, 20(3), 234-240.

Galasiu, A. D., & Reinhart, C. F. (2008). Current daylighting design practice: a survey. Building Research and Information, 36(2), 159–174. https://doi.org/10.1080/09613210701549748

Gaumont, C. (2007). Le verdissement montréalais : pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique. Conseil régional de l'environnement de Montréal. https://cremtl.org/sites/default/files/upload/documents/publications/leverdissementmontrealais.pdf

Gelil, N. A. (2006). A new mashrabiyya for contemporary Cairo: Integrating traditional latticework from Islamic and Japanese cultures. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 5(1), 37-44.

Germanà , M. L., Alatawneh, B., & Reffat, R. (2015, November). Technological and behavioral aspects of perforated building envelopes in the Mediterranean region. 10th Conference on Advanced Building Skins GmbH At: Berna, Switzerland.

Gosztonyi, S. (2018). The role of geometry for adaptability: Comparison of shading systems and biological role models. Journal of Facade Design and Engineering, 6(3), 163-174.

Gouvernement du Canada (n.d). Rapport de données quotidiennes pour août 2019. https://climat.meteo.gc.ca/climate_data/daily_data_f.html?StationID=51157&wbdisable=true&timeframe=2&StartYear=1840&EndYear=2022&Day=24&Year=2019&Month=8#

Green, B. (2004). Building Green: A guide to using plants on roofs, walls and pavements. Jacklyn Johnston & John Newton. Greater London Authority. https://brightonandhovebuildinggreen.files.wordpress.com/2017/07/johnstone-and-newton-building-green.pdf

Gronfier, C. (s,d). La lumière naturelle, le médicament de demain ?. Lumière. Lettre d'information du GIF. https://www.afe-eclairage.com.fr/docs/10304-ext.pdf

Grynning, S., Lolli, N., Wago, S., & Risholt, B. (2017). Solar shading in low energy office buildings - design strategy and user perception. Journal of Daylighting, 4(1), 1–14. https://doi.org/10.15627/jd.2017.1

Hashimoto, K., Yano, T., Shimizu, M., & Nayatani, Y. (2007). New method for specifying color‐rendering properties of light sources based on feeling of contrast. Color Research & Application, 32(5), 361-371.

Hathaway, W. E. (1983). Lights, windows, color: elements of the school environment. In 59th Annual meeting of the Council of Educational Facility Planners, Alberta, Canada.https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.863.6067&rep=rep1&type=pdf

Heikinheimo, M. (2018, November). Paimio Sanatorium under Construction. In Arts (Vol. 7, No. 4, p. 78). MDPI.

Héliotropisme : qu'est-ce que c'est ? (n.d). Futura. https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/botanique-heliotropisme-19421/

HESCHONG MAHONE GROUP. Daylighting in Schools An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance (Rapport). CALIFORNIA BOARD FOR ENERGY EFFICIENCY. https://h-m-g.com/downloads/Daylighting/schoolc.pdf

Heschong, L. (1999). Daylighting in Schools: An investigation into the relationship between daylighting and human performance condensed report. HESCHONG MAHONE GROUP

Heschong, L. (2002). Daylighting and human performance. ASHRAE Journal. http://www.livingdaylights.nl/wp-content/uploads/2016/12/Heschong-2002.-Daylighting-and-Human-performance..pdf

Holm, D. (1989). Thermal improvement by means of leaf cover on external walls—a simulation model. Energy and Buildings, 14(1), 19-30. https://doi.org/10.1016/0378-7788(89)90025-X

Hosseini, S. M., Fadli, F., & Mohammadi, M. (2021). Biomimetic kinetic shading facade inspired by tree morphology for improving occupant's daylight performance. Journal of Daylighting, 8(1), 65-82.

Houser, K., Mossman, M., Smet, K., & Whitehead, L. (2016). Tutorial: color rendering and its applications in lighting. Leukos, 12(1-2), 7–26. https://doi.org/10.1080/15502724.2014.989802

https://aapq.org/sites/aapq.org/files/bibliotheque/ceum_brochureverdissement_20140122.pdf

https://solarlits.com/jd/pdf/8-65.pdf

Huang, Z., Lu, Y., Wong, N. H., & Poh, C. H. (2019). The true cost of "greening" a building: Life cycle cost analysis of vertical greenery systems (VGS) in tropical climate. Journal of Cleaner Production, 228, 437-454.

Hydro-Québec. (2010). Répertoire des arbres et arbustes ornementaux.

I Im, O., Kim, K., & Han, S. (2013, August). A Kinetic Light Shelf Unit as an Integrated Intelligent Control Device for Optimizing Interior Illumination. In Proceedings of the Eighth International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology (pp. 295-298).

Irga, P. J., Pettit, T. J., & Torpy, F. R. (2018). The phytoremediation of indoor air pollution: a review on the technology development from the potted plant through to functional green wall biofilters. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 17(2), 395-415.

Jimenez-Castellanos, O. (2010). Relationship between educational resources and school achievement: A mixed method intra-district analysis. The Urban Review, 42(4), 351-371.

Julinova, P., & Beckovsky, D. (2019). Perspectives of moss species in urban ecosystems and vertical living-architecture: A review. Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications, 2370-2375

Kellert, S. R., Heerwagen, J., & Mador, M. (2011). Biophilic design: the theory, science and practice of bringing buildings to life. John Wiley & Sons.

Kim, G., Lim, H. S., Lim, T. S., Schaefer, L., & Kim, J. T. (2012). Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. Energy and buildings, 46, 105-111.

Kirimtat, A., Koyunbaba, B. K., Chatzikonstantinou, I., & Sariyildiz, S. (2016). Review of simulation modeling for shading devices in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 23-49.

Kmieć, M. (2014). Green wall technology. Technical Transaction-Architecture 10 A (23), 47-60. https://repozytorium.biblos.pk.edu.pl/redo/resources/30142/file/suwFiles/KmiecM_GreenWall.pdf

Konstantzos, I., Tzempelikos, A., & Chan, Y.-C. (2015). Experimental and simulation analysis of daylight glare probability in offices with dynamic window shades. Building and Environment, 87, 244–254. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.007

Kromoser, B., Ritt, M., Spitzer, A., Stangl, R., & Idam, F. (2020). Design concept for a greened timber truss bridge in city area. Sustainability, 12(8), 3218.

L'École (n.d). École Nationale De Cirque Montréal. https://ecolenationaledecirque.ca/fr/lecole

Lang, D. C. (2002). Teacher interactions within the physical environment: How teachers alter their space and/or routines because of classroom character. Seattle: University of Washington.

Lau, A. K. K., Salleh, E., Lim, C. H., & Sulaiman, M. Y. (2016). Potential of shading devices and glazing configurations on cooling energy savings for high-rise office buildings in hot-humid climates: The case of Malaysia. International Journal of Sustainable Built Environment, 5(2), 387-399.

Lavoie, M.-P., & Hebert, M. F. (2007). Faire la lumiere sur le trouble affectif saisonnier. Canadian Psychology. Psychologie Canadienne, 48(3), 187–199.

Le 740 Bel-Air, un bâtiment vert qui fera école (2005). LesAffaires.com. https://www.lesaffaires.com/secteurs-d-activite/general/le-740-bel-air-un-batiment-vert-qui-fera-ecole/525186

Leclercq, M., Anthierens, C., Bideaux, E., & Flambard, L. (2007). Régulation du confort visuel dans une pièce: analyse pour la mise en oeuvre. Proceedings of 2ndes journées doctorales du Groupe de Recherche Modélisation, Analyse, Commande des systemes complexes, 9-11.

Lee, D.-S., Jo, J.-H., Koo, S.-H., & Lee, B.-Y. (2015). Development of climate indices using local weather data for shading design. Sustainability (Switzerland), 7(2), 1884–1899. https://doi.org/10.3390/su7021884

Lee, H., Park, S., & Seo, J. (2018). Development and performance evaluation of light shelves using width-adjustable reflectors. Advances in Civil Engineering, 2018. https://doi.org/10.1155/2018/2028065

Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2019). Transforming thermal-radiative study of a climber green wall to innovative engineering design to enhance building-energy efficiency. Journal of Cleaner Production, 224, 892–904. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.278

Lesage, K. (2013). La lumière naturelle favorise-t'elle la création d'un environnement sain et confortable pour les occupants des bâtiments écologiques certifiés? Un comparatif des certifications LEED®-Ca et BREEAM® (Maitrise en environnement, Université de Sherbrooke). https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7298/cufe_Lesage_Kateri_essai287.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lessard, G., & Boulfroy, E. (2008). Les rôles de l'arbre en ville. Centre collégial de transfert de technologie en foresterie de Sainte-Foy (CERFO), Québec. https://ileau.ca/sites/default/files/upload/roles_arbre_en_ville_cerfo.pdf

LM, I. (2013). Approved method: IES spatial Daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE). Illuminating Engineering Society. https://www. ies. org/product/ies-spatial-daylight-autonomy-sda-and-annual-sunlight-exposure-ase.

Loisos, G (1999). Daylighting in Schools: An Investigation into the Relationship Between Daylighting and Human Performance

Louiset, E. (2009). Perturbation du rythme circadien du cortisol. Correspondance en métabolisme hormones diabète et nutrition, 13(3).

Luciani, A., & Maudsley, A. (2021). Erskine's Svappavaara: From modern Arctic town to global village. In 16th International Docomomo Conference, Tokyo, Japan 2020+ 1, 29 August 2021 through 2 September 2021 (Vol. 3, pp. 958-963). Docomomo.

Lumière naturelle (n.d). Le Lab Promodul. https://lab.cercle-promodul.inef4.org/knowledge/sampost/lumiere-naturelle-definition

Lyons, A., Genest, F. et De Grâce, J. (2009). Canada's Green Prototype. High performing buildings. http://www.pageaumorel.com/publications/23-2009-05-00_ASHRAE_HPB_740_Bel-Air_JDG_FGE_AL.pdf

Mårtensson, L., Wuolo, A., Fransson, A. M., & Emilsson, T. (2014). Plant performance in living wall systems in the Scandinavian climate.

Meas, M. V. (2016). LA SÉQUESTRATION NATURELLE DE CARBONE EN MILIEU URBAIN: UN OUTIL DE LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À PROMOUVOIR!.

Meresi, A. (2016). Evaluating daylight performance of light shelves combined with external blinds in south-facing classrooms in Athens, Greece. Energy and Buildings, 116, 190-205.

Michaelidou, K. (2012). Natural light in learning environments. Https://Www.Academia.Edu/2018655/Natural_light_in_learning_environments.

Moazzeni, M. H., & Ghiabaklou, Z. (2016). Investigating the influence of light shelf geometry parameters on daylight performance and visual comfort, a case study of educational space in Tehran, Iran. Buildings, 6(3), 26.

Morency-Coulombe, T. (2019). Compréhension de l'expérience de confort en contexte d'apprentissage : une recherche conduite auprès des élèves et des enseignants dans 19 écoles primaires au Québec (Mémoire de maîtrise. École de design : Université Laval). http://hdl.handle.net/20.500.11794/37916

Motamedi, S. (2017). Qualitative and quantitative optimization of skylights: a comprehensive and inclusive analysis of skylight sizes for an office while providing enough daylight, avoiding glare and saving energy (Doctoral dissertation).

Naciri, N. (2007). Sustainable features of the Vernacular Architecture. http://www.solaripedia.com/files/488.pdf.

Naik, N., & Elzeyadi, I. (2020). Investigating the Impacts of Solar Screens on Occupant's Thermal Comfort: An Observational Field Study. ASHRAE Transactions, 126(1).

Nicklas, M. H., & Bailey, G. B. (1996). Analysis of the Performance of Students in Daylit Schools.

Nori, C., Olivieri, F., & Bedoya Frutos, C. (2013). Testing the performance of a green wall system on an experimental building in the summer.

O'Brien, W., Kapsis, K., & Athienitis, A. K. (2013). Manually-operated window shade patterns in office buildings: A critical review. Building and Environment, 60, 319-338.

Ochoa, C. E., & Capeluto, I. G. (2006). Evaluating visual comfort and performance of three natural lighting systems for deep office buildings in highly luminous climates. Building and environment, 41(8), 1128-1135.

Oghazian, F., Daneshjoo, K., & Mahdavinejad, M. (2017). The role of geometry and non-uniform distribution of openings in daylighting performance of solar screens. In The Proceedings of Passive and Low Energy Architecture (PLEA) Conference (pp. 3332-3339).

Omidfar, A. (2015). Performance evaluation of complex facades using various shading systems with ornamental patterns. In IES Annual Conference. Indianapolis, USA.

Patel, P., & Griffiths, S. (2013). Masdar City showcases sustainability. MRS bulletin, 38(6), 450-451.

Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. Renewable and sustainable energy reviews, 39, 139-165.

Pesenti, M., Masera, G., & Fiorito, F. (2015). Shaping an origami shading device through visual and thermal simulations. Energy Procedia, 78, 346-351.

Pho'liage ®. (2019). Art Build. https://www.artbuild.com/lab/pholiage

Phototropisme : Qu'est-ce que c'est? (n.d). Futura. https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/botanique-phototropisme-19420/

Pierson, C., Wienold, J., & Bodart, M. (2018). Review of factors influencing discomfort glare perception from daylight. Leukos, 14(3), 111-148.

Plusquellec, P., Trépanier, L., Juster, R., Marin, M. F., Sindi, S., François, N., ... & Lupien, S. (2015). Étude pilote des effets du programme DéStresse et Progresse chez des élèves de 6e année du primaire intégrés dans une école secondaire. Éducation et francophonie, 43(2), 6-29.

Price, A., Jones, E. C., & Jefferson, F. (2015). Vertical greenery systems as a strategy in urban heat island mitigation. Water, Air, & Soil Pollution, 226(8), 1-11

Provencher Roy et Associés Architectes (n.d). Édifice Normand-Maurice 740 Bel-Air Claude Bourbeau.https://cupdf.com/document/edifice-normand-maurice-740-bel-air-claude-bourbeau-ville-abcp-beauchamp-bourbeau.html?page=1

Reinhart, C. (2014). Daylighting Handbook I.(1st éd.).Building Technology Press.

Reinhart, C. F., & LoVerso, V. R. M. (2010). A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight. Lighting Research & Technology, 42(1), 7-31.

Reinhart, C. F., & Wienold, J. (2011). The daylighting dashboard–A simulation-based design analysis for daylit spaces. Building and environment, 46(2), 386-396.

Reinhart, C.F. (2012). 4.430 Daylighting.; MIT OpenCourseWare Massachusetts Institute of Technology.

Resolute Bay.(2021). Ralph Erskine and the Arctic Utopia - Senses Atlas,. Senses Atlas.(https://www.sensesatlas.com/territory/resolute-bay-ralph-erskine-and-the-arctic-utopia).

Robertson, I. M. (1991). Plants as a Medium for Design Expression and the Imperatives of the Avant-Garde. Landscape Journal, 10(1), 68-73.

Ruck, N., Aschehoug, Ø., & Aydinli, S. (2000). Daylight buildings. A source book on daylighting systems and components.

Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., & Baharvand, M. (2014). A review of energy characteristic of vertical greenery systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40, 450-462.

Sampson,X.(2014). CSDM :votre école est-elle en bon état? Service des nouvelles,Radio-Canada.https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/643711/csdm-liste-ecoles-etat-vetuste.

Satumane, A. D., & Suk, J. Y. (2018). Impacts of Vertical Greening System (VGS) on daylight quantity and quality in buildings. In ARCC Conference Repository.

Sauzet, M., & Younès, C. (2003). Habiter l'architecture: entre transformation et création. Massin.

Sawyer, A. O. (2019). Behind the Facade: Evaluating the Effect of Facade Design on Daylight Admittance and Perceptual Assessments (Doctoral dissertation, University of Michigan).

Schiebel, T., Gallinat, J., & Kühn, S. (2022). Testing the Biophilia theory: Automatic approach tendencies towards nature. Journal of Environmental Psychology, 79, 101725.

Schiler, M. (2000). Toward a definition of glare: can qualitative issues be quantified?. In 2nd EAAE–ARCC Conference on Architectural Research.

Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Masselter, T., Speck, T., & Knippers, J. (2011, March). Adaptive façade shading systems inspired by natural elastic kinematics. In Proceedings of the International Conference on Adaptive Architecture.

Schleicher, S., Lienhard, J., Poppinga, S., Speck, T., & Knippers, J. (2015). A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture. Computer-Aided Design, 60, 105-117.

Schmidt-Nielsen, K. (1964). Desert animals. Physiological problems of heat and water. Desert animals. Physiological problems of heat and water.

Schneider, M. (2003). Linking school facility conditions to teacher satisfaction and success. Washington, DC: National Clearinghouse for Educational Facilities.

Shahdan, M. S., Ahmad, S. S., & Hussin, M. A. (2018, February). External shading devices for energy efficient building. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 117, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.

Sharp, R., MBCSLA, M., & ASLA, L. A. (2007). Things You Need to Know About Green Walls. Building Design & Construction.(6)

Sherif, A., Sabry, H., & Rakha, T. (2012). External perforated Solar Screens for daylighting in residential desert buildings: Identification of minimum perforation percentages. Solar Energy, 86(6), 1929-1940.

Shiraziadle,S.M.(2017)étudie des encadrements pour les écoles écologiques et analyse du progrès du Québec dans ce domaine.(Mémoire de maîtrise). Université de Montréal, Montréal, Québec.

Simone, A. (2021, March 24). Définition de L'ARCHITECTURE PARAMÉTRIQUE. Architecture + Design Parametrique. Retrieved September 18, 2022, from https://architecture-design-parametric.com/definition-architecture-parametrique/

Siret, D., & Harzallah, A. (2006, November). Architecture et contrôle de l'ensoleillement. In Congrès IBPSA France.

Smyth, J. M., Ockenfels, M. C., Gorin, A. A., Catley, D., Porter, L. S., Kirschbaum, C., ... & Stone, A. A. (1997). Individual differences in the diurnal cycle of cortisol. Psychoneuroendocrinology, 22(2), 89-105.

Solemma, LLC (2022) .https://www.solemma.com/climatestudio

Stec, W. J., Van Paassen, A. H. C., & Maziarz, A. (2005). Modelling the double skin façade with plants. Energy and Buildings, 37(5), 419-427.Modelling the double skin façade with plants - ScienceDirect

Stevens, S. (2001). Intelligent facades: occupant control and satisfaction. International journal of solar energy, 21(2-3), 147-160.

Touitou, Y. (2011). Désynchronisation de l'horloge interne, lumière et mélatonine. Bulletin de l'Académie nationale de médecine, 195(7), 1527-1549.

Tregenza, P., & Wilson, M. (2011). Daylighting: architecture and lighting design. Routledge.

Tremblay-Lemieux, S. (2019). Vers une caractérisation du parc immobilier des écoles primaires publiques du Québec: Une exploration de la combinaison des méthodes d'analyse de la typomorphologie et de la syntaxe spatiale (Doctoral dissertation, Université Laval).

Trottier, A. (2008). Toitures végétales: implantation de toits verts en milieu institutionnel. Etude de cas: UQAM. Montréal: Grip-UQAM/Verdis-toit, Centre d'écologie urbaine de Montréal.

Tuaycharoen, N., & Tregenza, P. R. (2005). Discomfort glare from interesting images. Lighting Research & Technology, 37(4), 329-338.

United Nation Environment Programme.(2019). La mousse qui absorbe la pollution atmosphérique nettoie les points chauds en Europe.youngchampions. https://www.unep.org/youngchampions/fr/news/recit/la-mousse-qui-absorbe-la-pollution-atmospherique-nettoie-les-points-chauds-en-europe.

Vachon, J. (2016). La prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans les politiques publiques de verdissement (2005-2015): le cas de Montréal.

Vernoux, T. (2020). Quand l'architecture imite la nature. CNRS Le journal, January. https://lejournal.cnrs.fr/billets/quand-larchitecture-imite-la-nature.

Wang, C., Li, H., & Neoh, S. A. (2019). Moss-indoor vertical greenery system design protocol: Using moss as an indoor vertical greenery system in the tropics. Indoor and Built Environment, 28(7), 887-904.

Ward, G. J. (1994). The RADIANCE lighting simulation and rendering system. In Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques (pp. 459-472).

Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., Sia, A., & Wong, N. C. (2010). Perception studies of vertical greenery systems in Singapore. Journal of Urban Planning and Development, 136(4), 330-338.

Woodman, E., Wilkinson, T., Murray, C., Editors, A., & Carr, L. (2016). 'Aalto's Paimio Sanatorium continues to radiate a profound sense of human empathy' - Architectural Review.https://www.architectural-review.com/buildings/revisit-aaltos-paimio-sanatorium-continues-to-radiate-a-profound-sense-of-human-empathy

Yao, J. (2014). An investigation into the impact of movable solar shades on energy, indoor thermal and visual comfort improvements. Building and Environment, 71, 24-32.

Yeow, T. S. (2002). The analemma for latitudinally-challenged people. unpublished B. Sc. thesis, National University of Singapore.

Zemmouri Malika, C. (2018). Caractérisation et optimisation de la lumière naturelle en milieu urbain (Thèse de doctorat, Institut d'architecture et des sciences de la terre, Université Ferhat Abbas-Sétif, Algérie).

Zheng, X., Dai, T., & Tang, M. (2020). An experimental study of vertical greenery systems for window shading for energy saving in summer. Journal of Cleaner Production, 259, 120708.

Zomorodian, Z. S., & Tahsildoost, M. (2017). Assessment of window performance in classrooms by long term spatial comfort metrics. Energy and Buildings, 134, 80-93.

Zomorodian, Z. S., Korsavi, S. S., & Tahsildoost, M. (2016). The effect of window configuration on daylight performance in classrooms: A field and simulation study. 24-15 ,)1(26 ,دانشگاه علم و صنعت ایران.

Zulkifli, M. A. R. (2011). Shading device as strategies achieving thermal comfort for office building in tropics (Doctoral dissertation, M. Sc. Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Malaysia).