



La performance des bâtiments
et la responsabilité envers les occupants

ÉTUDE POST-OCCUPATION DE LA MAISON DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

TABLE DES MATIÈRES

Introduction..... 5

Volet 1

L’adaptabilité de la maison du développement durable aux besoins futurs..... 6

Résumé 7

1.1. Objectif de l’étude et procédure8

1.2. Références préliminaires sur l’adaptabilité 11

1.3. Le concept de l’adaptabilité appliqué aux édifices à bureaux..... 14

1.4. Discussion et autres résultats 16

1.5. Conclusions 23

Références..... 26

Volet 2

Les planchers surélevés et le système de ventilation du bâtiment de la MDD 28

Résumé..... 29

2.1. Objectif de l’étude et procédure 30

2.2. Les planchers surélevés à ventilation intégrée..... 31

2.3. Résultats de l’étude 33

2.4. Conclusions 41

Références..... 50

Volet 3

Le confort, le bien-être et la productivité des employés de la MDD 51

Résumé..... 52

3.1. Objectif de l’étude et procédure 53

3.2. Nouvelles tendances dans l’aménagement des bureaux 55

3.3. Les indicateurs de performance 57

3.4. Résultats de l’étude 60

3.5. Conclusions et recommandations 75

Références..... 78

Remerciements

Équiterre tient à remercier la Fondation familiale Trottier et le groupe CRH Canada pour leur contribution financière ayant permis de réaliser ce rapport.

La Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité tient à remercier toutes les personnes qui ont participé aux entrevues et qui ont participé au sondage sur le confort, le bien-être et la fonctionnalité des espaces. Nous remercions aussi les personnes suivantes, qui ont contribué d’une manière ou d’une autre à notre recherche : Michel Max Raynaud, Clément Demers et Daniel Pearl de l’Université de Montréal, Simon Oliver de l’Université Manchester, Michel Leduc de Sonar, Rosamund Hyde de Stantec, Rod Thorpe d’Enviroparfait, Anik Schooner et l’équipe de MSDL, Normand Roy, Colleen Thorpe et Kristel Papineau d’Equiterre, Roland Charneux de Pageau Morel, Jean-François Arbour de la firme SCV, et Jean-Paul Boudreau et Thomas Schweitzer, membres de la Chaire.



Volet 4

le facteur «L/U» (locatif VS. utilisable) de la MDD80

Résumé..... 81

4.1. Objectif de l'étude et procédure 82

4.2. Le facteur L/U..... 83

4.4. Discussion 92

4.5. Conclusion..... 95

Annexe..... 97

Références.....105

Volet 5

Revêtement en béton106

5.1. Introduction.....107

5.2. Les avantages du béton poli107

5.3. La mise en place du béton poli:107

5.4. L'entretien d'un plancher en béton poli: le cas de la MDD109

5.5. Inconvénients du béton poli : Le cas de la MDD109

Références..... 114

Volet 6

Le mur végétal bio-filtrant 115

6.1. Introduction..... 116

6.2. Principe et description du système du mur végétal de la MDD 116

6.3. L'entretien du biomur Nedlaw et son coût d'exploitation 118

6.4. Enjeux relatifs à l'utilisation du mur végétal de la MDD 119

6.5. Le mur végétal, bien-être et productivité 121

6.6. La qualité de l'air 122

6.7. Impact énergétique..... 125

6.8. Conclusion 126

INTRODUCTION

L'impact du cadre bâti sur l'environnement est énorme. Environ 40 % de la consommation totale d'énergie et 30 % des émissions de gaz à effet de serre proviennent du secteur de la construction. En réponse, les architectes, ingénieurs, donneurs d'ouvrage et autres décideurs cherchent à réduire ces impacts en réalisant des bâtiments plus performants. Or, il existe souvent des écarts importants entre la performance anticipée des bâtiments durables et leur performance réelle – post construction – surtout en termes énergétiques et de systèmes techniques. Les écarts entre les attentes du client et les réels impacts du bâtiment sur les occupants sont aussi courants.

Comment diminuer ces écarts? Comment savoir si les décisions prises lors de la phase de conception du bâtiment conduisent à des impacts positifs une fois celui-ci occupé? Et comment éviter de répéter les erreurs de conception dans le futur, alors que chaque projet est unique ?

Dans un secteur largement influencé par une quête de plus en plus frénétique de la performance des bâtiments, le domaine de l'évaluation post-occupation (ÉPO) est en rapide croissance. Notre projet vise à apporter des pistes de réflexion à partir de l'évaluation du bâtiment de la Maison du développement durable (MDD), sept ans après son inauguration.

Dans cette étude post-occupation, nous examinons l'impact des décisions prises durant la conception sur le fonctionnement du bâtiment. Nous portons une attention particulière aux impacts sur le confort, le bien-être et la productivité des occupants. De façon plus spécifique, nous explorons dans quelles mesures certains aspects fonctionnels et architecturaux répondent aux attentes de l'opérateur de la MDD, en tant que client et occupant du bâtiment. Ce rapport cherche à aider les professionnels, donneurs d'ouvrage et décideurs à concentrer leurs efforts sur les éléments essentiels à la conception des immeubles de bureaux. Il invite de plus à une réflexion sur la responsabilité envers les occupants dans la réalisation de bâtiments durables.

Les résultats présentés ci-dessous proviennent de deux groupes d'auteurs, soit les chercheurs de la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et les analystes d'Équiterre, promoteurs de la MDD. Le groupe d'auteurs de chacun des 6 chapitres est identifié immédiatement sous le titre.



VOLET 1

L'ADAPTABILITÉ DE LA MAISON DU DÉVELOPPEMENT DURABLE AUX BESOINS FUTURS

Auteurs : Amy Oliver, Anne-Marie Petter, Ricardo Leoto, Gonzalo Lizarralde et Normand Roy | En collaboration entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre | Avec l'appui financier de MITACS. Contrat de recherche MITACS IT10752 Certificat d'éthique No. CPER-18-001-D

Août 2018

Note sur les limites de l'étude

Ce rapport ne vise pas la production d'un contenu scientifique susceptible de produire des généralisations. Il vise à répondre à des questions spécifiques du mandataire (La Maison du développement durable/ Equiterre) concernant l'opération du bâtiment de la MDD. Il s'agit d'une étude de cas qui illustre les enjeux de planification, conception et opération d'un bâtiment spécifique. Il a été réalisé dans le cadre d'un projet de stage MITACS et d'une entente de collaboration de 8 mois entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre. Cette section fait partie intégrante d'une étude plus large qui comporte 3 autres sections similaires. Les résultats présentés dans cette section doivent être compris et contextualisés en regard de l'ensemble des résultats de l'étude.

Résumé

Le secteur de la rénovation des bâtiments non résidentiels joue un rôle fondamental dans l'industrie de la construction au Québec. Ce secteur gagne en importance en matière d'impacts causés par l'industrie de la construction sur l'environnement, contribuant à des milliards de tonnes de déchets par année. Une dimension importante de la durabilité d'un bâtiment est celle de permettre de possibles adaptations aux besoins futurs des occupants. En effet, la facilité d'adaptation du bâtiment est un critère de performance important pour le client (aussi occupant et gestionnaire) de la Maison du développement durable (MDD). Ce critère se révèle particulièrement significatif lorsque l'on considère que depuis l'inauguration de la MDD en 2011, quatre réaménagements intérieurs totalisant environ un million de dollars y ont été entrepris. Suivant une préoccupation du client-occupant quant à l'envergure des réaménagements survenus à la MDD, l'objectif de cette étude est d'examiner les enjeux d'adaptabilité de son bâtiment. Dans cette visée, les questions suivantes ont été soulevées: Le bâtiment de la MDD est-il facile à réaménager? Est-il est facilement adaptable aux besoins futurs? Est-ce que le fait que le bâtiment a subi 4 réaménagements intérieurs depuis son inauguration est « habituel » pour un nouvel édifice à bureaux? Et, quels sont les impacts de ces interventions sur la qualité du bâtiment?

Les résultats de l'étude sont assez nuancés. En termes de facilité de réaménagement, l'absence de problèmes significatifs lors des réaménagements suggère que le bâtiment se prête à des adaptations futures. Toutefois, certains facteurs tels que l'exiguïté du quai de chargement pour l'entreposage des matériaux, le manque d'espace pour le tri des déchets, l'absence de sous-sol et la complexité des contrôles électromécaniques ont, à certains égards, rendu difficiles les activités de construction. En ce qui a trait à l'adaptabilité du bâtiment aux besoins futurs, les résultats indiquent que bien que les concepteurs n'aient pas privilégié certains systèmes intérieurs maximisant sa flexibilité, le bâtiment répond plutôt au critère de la « généralité » grâce à une configuration géométrique propice à l'adaptation des espaces. Par

ailleurs, alors que certaines composantes du bâtiment peuvent accueillir un plus grand nombre d'occupants, les espaces ne se prêtent pas facilement à une densification future. La principale cause est la capacité d'évacuation des issues qui, selon les estimations effectuées, se trouve déjà plafonnée. Quant à l'envergure des réaménagements réalisés, les résultats signalent qu'en termes de coûts et de fréquence, ces réaménagements ne sont pas atypiques pour ce type de bâtiment. Enfin, en ce qui concerne l'impact des réaménagements sur la qualité du bâtiment, l'étude montre que, dans certains cas, les réaménagements ont détérioré quelques finis ou ont défavorablement altéré les contrôles et le balancement des systèmes électromécaniques. Par ailleurs dans d'autres cas, les réaménagements ont amélioré la qualité du bâtiment et la durabilité de certains matériaux et composantes.

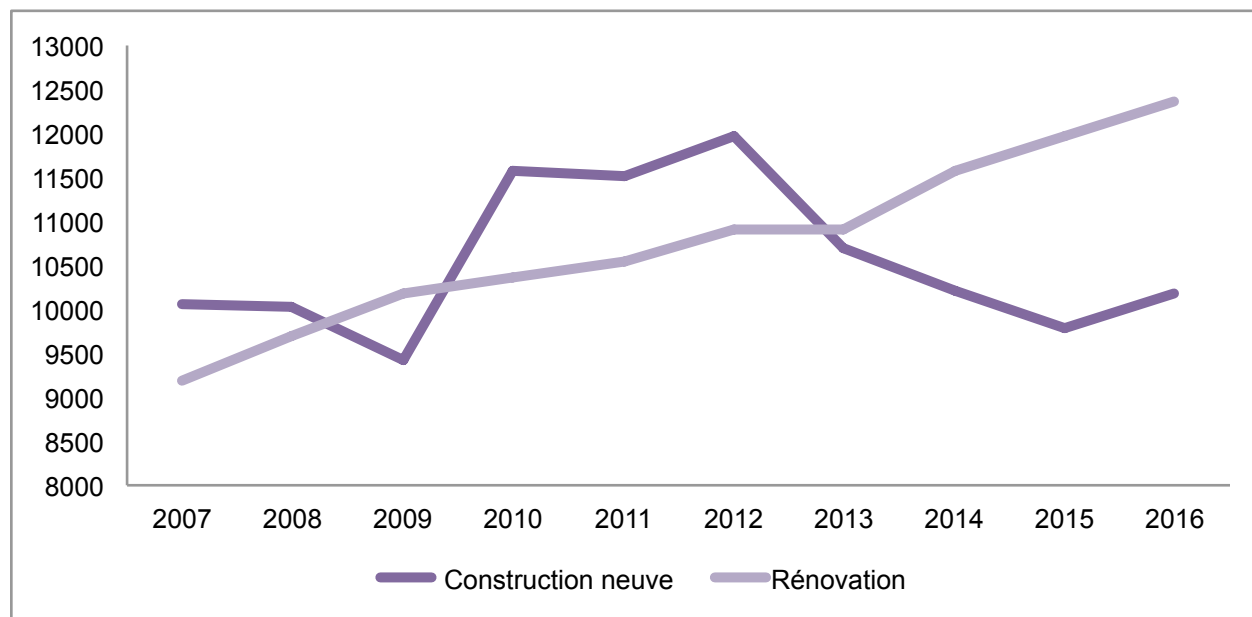
En somme, ces résultats suggèrent que malgré les inquiétudes du client relativement au fait que la fréquence et les coûts des réaménagements lui semblaient inhabituels, le bâtiment de la MDD n'est pas atypique en termes d'adaptabilité. Comme tout système complexe, le bâtiment a des points forts et des points faibles. L'étude a également révélé plusieurs facteurs que les acteurs de l'industrie de la construction au Québec doivent considérer afin de faciliter les réaménagements des édifices à bureaux. Elle propose aussi une réflexion sur la densification potentielle des bureaux, un aspect de plus en plus important pour les occupants des édifices à bureaux. Cette réflexion peut être utile pour les promoteurs et gestionnaires immobiliers québécois, car la densification des espaces de bureaux est une tendance actuelle du marché immobilier canadien. Étant donné qu'une grande partie du parc immobilier du centre-ville de Montréal est déjà construit et devra être rénové, les avantages et les inconvénients des nouvelles tendances mériteront à être considérés.

1.1. Objectif de l'étude et procédure

Le secteur de la construction non-résidentielle joue un rôle prépondérant dans l'industrie de la construction au Québec. En effet dans la province, environ 50% du total des heures travaillées dans l'industrie correspondent à des occupations dans des projets institutionnels et commerciaux (CCQ, 2018). De plus, la rénovation et l'entretien d'immeubles non résidentiels génèrent environ 13% de l'emploi dans le secteur de la construction au Québec (Construction Forecasts Canada, 2017). La rénovation des immeubles commerciaux¹ et de bureaux joue un rôle de plus en plus important. Ainsi depuis 2013, la rénovation des bâtiments devient l'une des principales activités de l'industrie de la construction au Québec. En effet, la rénovation des bâtiments existants a dépassé la construction neuve en termes de dépenses d'immobilisation dans le secteur résidentiel (voir graphique 1). Dans la ville de Québec, la rénovation des bâtiments non résidentiels atteint environ 24% de la construction en général (en termes de valeur des immobilisations) (Néron, 2018). Entre 2014 et 2017, les travaux en rénovation non résidentielle à Québec ont dépassé les travaux en construction neuve. Avec le besoin de mettre aux normes un parc immobilier désuet, une tendance similaire pourra être observée dans le secteur institutionnel et commercial dans le reste de la province. En effet, l'Association des professionnels de la construction et de l'habitation du Québec (APCHQ) anticipait en 2017 un investissement historique en matière de rénovations dans le secteur immobilier au Québec (Association de la construction et de l'habitation du Québec, 19 octobre 2017).

GRAPHIQUE 1

Dépenses d'immobilisation pour bâtiments résidentiels au QC (M\$). Une tendance similaire pourra être observée dans les prochaines années dans le secteur non résidentiel. D'après les données de la CCQ (2017)



Bien que le secteur de la rénovation de bâtiments propulse l'économie au Canada et ailleurs, il cause un impact de plus en plus important sur l'environnement. On estime qu'aux États-Unis, chaque année cinq milliards de livres de tapis sont envoyées au dépotoir. Ajoutant à ceux-ci gypse, câblage et autres revêtements, il devient évident que chaque fois qu'une entreprise modifie ses espaces de bureaux, elle produit un lourd impact sur

1. Les bâtiments commerciaux sont des bâtiments utilisés à des fins commerciales, y compris les immeubles de bureaux, les entrepôts et les immeubles commerciaux (mails, magasins, etc.).

l'environnement. Au Danemark par exemple, il est estimé que 75 % des déchets de construction proviennent de projets de rénovation (McKay, 2010). L'impact des rénovations est doublement important parce qu'il faut prendre en compte non seulement les déchets liés à la démolition, mais aussi l'énergie intrinsèque, et d'autres facteurs tels que le manque d'efficacité des occupants pendant les activités de construction et les effets des rénovations sur leur santé. À tout cela s'ajoutent les impacts causés par la production de nouvelles composantes qui seront ajoutées au bâtiment.

Certes, les rénovations en général ont un moindre impact sur l'environnement que la construction neuve. De nature, elles ne consomment pas de nouveaux terrains et elles favorisent habituellement la réutilisation des structures, des services et des systèmes déjà construits. Le recyclage des espaces en ville est toujours une stratégie plus durable que l'étalement urbain. Or si l'on réaménageait tous les bureaux à chaque 5 ou 10 ans, l'empreinte écologique des bâtiments dans l'ensemble de leur cycle de vie serait dès lors plus importante que l'on ne le pense. Suivant les tendances actuelles ici et ailleurs, les rénovations contribuent de plus en plus à la pollution et au réchauffement de la planète, à l'appauvrissement de la couche d'ozone, et à l'acidification.

Ces faits mettent en lumière la nécessité de concevoir les édifices à bureaux au Québec suivant des principes permettant une adaptation efficace, socialement et écologiquement responsable. Cette étude examine les enjeux liés à cet objectif à partir de l'expérience vécue par la MDD.

Dans la présente étude, les « réaménagements » sont définis comme les opérations par lesquelles une des composantes d'un bâtiment voit sa condition améliorée. Plus spécifiquement au sujet des réaménagements de bureaux, Adler and Riegel (2014) en propose 3 types: (1) *Réparations rapides* – ces changements incluent des mesures assez simples et peu dispendieuses pour « rafraîchir » l'apparence des espaces ; (2) *Reconfiguration* – ces changements incluent normalement l'achat de nouveaux meubles et accessoires pour s'adapter à des nouvelles tendances du marché, comme celles décrites à la section 1.3; et (3) *Renégociation ou délocalisation* – des changements majeurs où les espaces sont reconfigurés et reconstruits. Se basant sur la spécificité des réaménagements à la MDD, cette étude propose d'ajouter les catégories (4) *Retrofit*² – qui inclut l'amélioration des systèmes du bâtiment, tels que l'éclairage ou les équipements de climatisation et chauffage (CVAC), (5) *Agrandissement* (ici d'aires locatives), et (6) *Cloisonnement*.

Depuis son inauguration en 2011, quatre réaménagements intérieurs, au coût total de près d'un million de dollars, ont été entrepris à la MDD (la rénovation du *base building* exclue). Le détail de ces réaménagements de différente envergure est présenté au tableau 1 ci-dessous.

2. Il s'agit d'interventions très mineures à l'échelle du bâtiment, souvent de l'ordre de réparations.

TABEAU 1
Détails des réaménagements réalisés au bâtiment de la MDD depuis 2011 (base building exclu).

Nom du réaménagement	Type et objectif des réaménagements	Année	Coûts totaux
Restaurant Commensal/ Marius	Réaménagement majeur du rez-de-chaussée pour construire le café Marius et ajouter des salles locatives. <i>Renégociation ou délocalisation – Réaménagement majeur</i>	2013	522,111.69\$
Syndicat des professionnels et professionnelles municipaux de Montréal (SPPMM)	Construction d’une cloison dalle à dalle d’environ 16 pieds de long pour séparer les bureaux du SPPMM des bureaux d’Option Consommateurs et réaménagement de 540 pi.ca. de bureaux privés. <i>Cloisonnement.</i>	2015	43,225.46 \$
Projet Équiterre-MDD	Construction de cloisons en verre (non dalle à dalle) pour séparer les bureaux d’Équiterre d’avec les bureaux de World Wildlife Foundation (sous-locataire d’Équiterre) et de ceux de la Maison du Développement Durable. <i>Cloisonnement.</i>	2015	36,338.82 \$
Les bureaux Dunsky	Démolition d’une cloison dalle à dalle de 80 pieds de long pour agrandir les bureaux de Dunsky de 2100 pi.ca. à 4000 pi.ca; Relocalisation d’appareils d’éclairage et dispositifs électriques afférents. <i>Agrandissement.</i>	2017	113,371.00\$

En plus des coûts monétaires et environnementaux de ces réaménagements, les gestionnaires du bâtiment avaient noté en 2015 quelques impacts de celles-ci sur le bâtiment lui-même, notamment des changements d’intensité d’éclairage et la détérioration de certains finis intérieurs comme les tuiles de tapis, les cadres de portes et le gypse.

Ayant construit un bâtiment considéré comme l’un des plus performants et écologiques de la province, les gestionnaires de la MDD avaient certaines attentes quant à sa performance : que le bâtiment soit apte à combler les besoins spatiaux des locataires, qu’il soit adaptable et facile à rénover et qu’il n’y ait pas de détérioration de la qualité du bâtiment. De plus, les gestionnaires de la MDD ont été surpris par l’envergure des réaménagements y étant survenus depuis son inauguration en 2011, percevant leurs coûts et leur fréquence comme étant plutôt inhabituels pour un bâtiment neuf construit « sur mesure ». Alors que le concept de l’adaptabilité n’était pas inclus dans la charte du projet, cette préoccupation relative à l’envergure des réaménagements a conduit à la présente étude sur l’adaptabilité du bâtiment de la MDD.

Dans cette foulée, l’objectif général de cette étude est donc de comprendre les enjeux d’adaptabilité de la MDD. Selon Conejos et al. (2014), une dimension importante de la durabilité d’un bâtiment est celle de permettre de possibles adaptations à des besoins qui changent à travers le temps. Suivant ce constat, en plus des attentes du client-occupant énoncées plus haut et sa préoccupation quant à l’envergure des réaménagements, l’étude vise plus spécifiquement à examiner quatre vecteurs : la facilité de réaménagement du bâtiment; son adaptabilité aux besoins futurs des occupants; l’envergure de ses réaménagements par rapport aux « standards » du marché; et les impacts des réaménagements sur la qualité du bâtiment. Ainsi, les questions suivantes ont guidé l’étude:

1. Le bâtiment de la MDD est-il facile à rénover ?
2. Est-il facilement adaptable aux besoins futurs ?
3. Est-ce que le fait que le bâtiment a subi quatre réaménagements depuis son inauguration est « habituel » pour un nouvel édifice à bureaux ?
4. Quels sont les impacts de ces réaménagements sur la qualité du bâtiment ?

Pour examiner ces questions, ont été analysés 20 références théoriques sur l’adaptabilité des bâtiments, 13 publications sur le marché immobilier d’édifices à bureaux au Canada, plus de 20 documents de construction du projet (plans et devis, estimation des coûts, échéanciers, documents liés aux réaménagements, etc.), ainsi que d’autres références en matière de normes et réglementation (Code de Construction du Québec 2010, Code National du Bâtiment 2010, guide BOMA 1996 sur la classification des bureaux, etc.). De plus, 10 entrevues ont été effectuées avec 2 architectes, 1 gestionnaire de projets, 1 ingénieur en mécanique, 3 promoteurs et gestionnaires immobiliers, 1 gestionnaire de la MDD, 1 entrepreneur général, et le chargé de projet de la MDD, tous possédant une expertise en bâtiments commerciaux. Les résultats d’une enquête réalisée auprès des employés de la MDD lancée en avril 2018 sur le confort, le bien-être et la fonctionnalité des espaces de la MDD ont également été analysés.

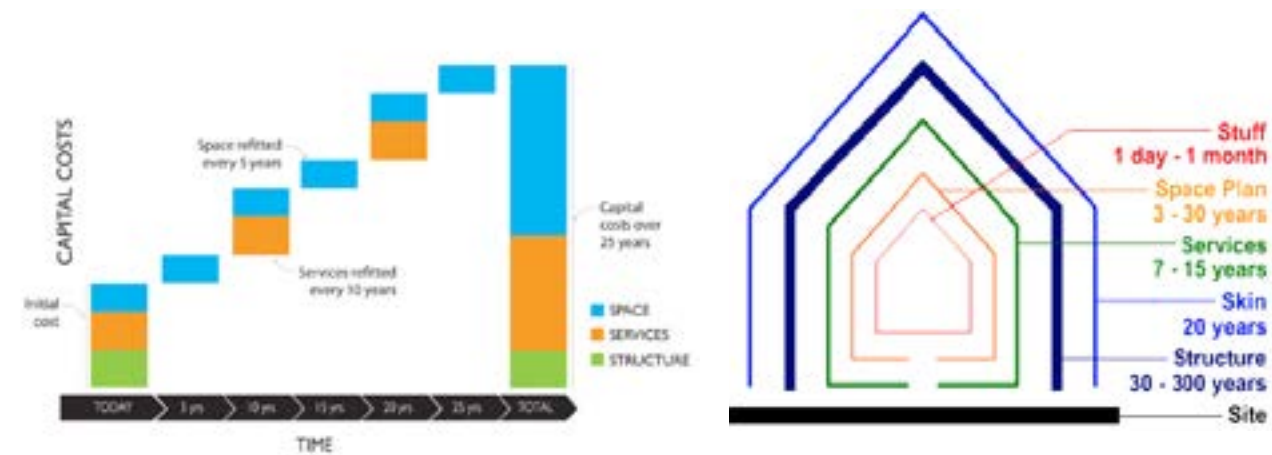
1.2. Références préliminaires sur l’adaptabilité

La capacité d’un bâtiment à s’adapter à des besoins qui changent à travers le temps est une dimension importante de sa durabilité. En effet, **l’adaptabilité d’un bâtiment à travers le temps** est déjà un concept (dont Francis Duffy et Stewart Brand sont deux pionniers (Duffy (1992); Duffy et al. (1993); Duffy and Powell (1997); Brand (1995)) largement adopté dans la littérature scientifique. Dans son article phare « *Measuring Building Performance* » (1990), Duffy insiste sur le fait que la performance des bâtiments devrait se mesurer selon leur durée de vie et non leurs matériaux. Il y développe 4 catégories d’analyse : l’enveloppe (d’une durée de 50 ans), les services (d’une durée de 15 ans), le design intérieur (d’une durée de 5 à 7 ans) et les aménagements non fixes qui eux changent au quotidien (en anglais, ces catégories sont les célèbres *shell, services, scenery* et *sets*).

Suite à Duffy (1990), Brand (1995) a introduit l’idée de la stratification des espaces et composantes suivant différentes couches de longévité. Ces couches incluent : le site (durée éternelle); la structure du bâtiment (30-300 ans); l’enveloppe (environ 20 ans); les services (7-15 ans); l’aménagement intérieur (3-30 ans); et le mobilier (qui change très fréquemment). Selon cette perspective, les diverses composantes devraient être remises à neuf en fonction de leur longévité.

GRAPHIQUE 2

À gauche : Coûts des couches au fil du temps. À droite : Les couches du bâtiment selon Brand (1995). Source : Adaptable Futures (2011).



Mais que signifie « l’adaptabilité » ? D’après Schmidt III et al. (2010), l’adaptabilité « englobe des stratégies spatiales, structurelles et de service qui permettent à l’artefact physique un niveau de malléabilité en réponse à des paramètres opérationnels changeants dans le temps » (p. 233). Détaillant davantage ce concept, Arge (2005) propose trois dimensions de l’adaptabilité pour les édifices à bureaux : *la généralité*, ou l’habileté d’un bâtiment à répondre aux besoins d’un nouvel usager ou propriétaire sans changer ses propriétés; *la flexibilité*, définie comme l’habileté à changer ses propriétés facilement pour accommoder de nouveaux besoins (par exemple en faisant appel à certaines composantes telles que des systèmes modulaires ou des planchers surélevés); et *l’élasticité*, définie comme l’habileté à agrandir les espaces internes du bâtiment ou à les « re-subdiviser » en fonction des besoins des occupants.

L’incorporation de critères d’adaptabilité dépend également du modèle de développement immobilier. Arge (2005) a comparé les critères d’adaptabilité dans des édifices à bureaux réalisés par trois types de promoteurs immobiliers en Norvège : le promoteur qui construit un bâtiment pour son utilisation (propriétaire-occupant), le promoteur qui développe pour la location et la gestion (propriétaire-gestionnaire), et enfin, le promoteur qui développe pour la vente et l’investissement (qui n’occupe pas le bâtiment). L’auteur trouve que les bâtiments conçus par des propriétaires-occupants sont généralement plus adaptables que les bâtiments conçus par les promoteurs investisseurs. En effet, comme toute organisation, les propriétaires-occupants évoluent continuellement et doivent donc considérer l’adaptabilité comme un aspect important de leurs exigences fonctionnelles. Paradoxalement, même quand ils peuvent construire le bâtiment « sur mesure », ces propriétaires-occupants ne cherchent pas à le personnaliser au maximum, car cela peut devenir une contrainte dans le futur. À titre d’occupants, ils seraient de ce fait plus sensibles à cette préoccupation que les promoteurs investisseurs qui relèguent aux acheteurs le soin de doter les bâtiments qu’ils acquièrent de composantes et systèmes adaptables.

Davison et al. (2006) et Gregory (2005) adoptent le concept de construction adaptable « *Multispace* », développé par le cabinet d’architecture britannique Reid Architecture. Ils établissent des **paramètres de conception pour des bâtiments adaptables**. Ces auteurs ont étudié les exigences fonctionnelles et techniques de différents types de bâtiments (commerciaux, résidentiels, hôteliers, et autres), telles que la hauteur des plafonds, l’épaisseur des dalles structurales, le nombre d’ascenseurs, et les normes de sécurité-incendie. Les résultats sont présentés au tableau 2. Bien entendu, ces paramètres doivent être pris sous toute

réserve des normes et codes du bâtiment applicables dans divers contextes géographiques, ces normes et codes ayant préséance si plus restrictifs.

TABEAU 2

Multispace : Paramètres de conception adaptable. Source : adapté de Gregory (2005).

Paramètre	Condition au rez-de-chaussée	Condition aux étages
Proximité des bâtiments	Déterminé par les normes de sécurité-incendie	18-21 m minimum entre les pièces habitables de bâtiments avoisinants
Profondeur du plan	13.5 m (préféablement 15 m) à 45 m	15 à 21 m
Hauteur intérieure du plafond	3.5 m hauteur simple : 5-7 m double hauteur	Environ 2.7 m
Hauteur de zone d’entre plafond	0-500 mm	0-500 mm
Hauteur du plancher	100-350 mm	100-350 mm
Dalles et portées structurales	Portée minimum de 7.5 m Dalle 260 mm @ 9x9 m ; dalle 330mm @12x9 m	Portée maximale de 12 m Dalle 260mm @ 9x9 m; Dalle 330 mm @12x9 m
Sécurité-incendie	1 personne / 5 m ²	1 personne / 6 m ²
Distances de déplacement aux issues en cas d’incendie	30m dans 2 directions (12 m dans une direction)	30 m dans 2 directions (12 m dans une direction)
No. et taille d’ascenseur(s)	N/A	Concevoir pour un usage mixte comme pire des cas
Spécifications de revêtement	Maximiser le vitrage en tenant compte des contraintes d’incendie, de bruit et de coût	40-100% vitrage. NR 20-30. Module 1.5m et option pour fenêtres ouvrables

D’autres experts ont développé des systèmes d’évaluation pour l’adaptabilité des bâtiments, comme le système « Flex 4.0 » proposé par Geraedts et ses collègues (2016) au Pays Bas. Ce système inclut 17 indicateurs applicables à tous genres de bâtiments et 18 autres spécifiques aux édifices à bureaux.³ Un autre système, appelé adaptSTAR, mesure « l’adaptivité » des bureaux; c’est-à-dire leur capacité à changer d’usages dans le futur (Conejos et al., 2013). Ces systèmes représentent de premières tentatives pour quantifier et standardiser le concept d’adaptabilité dans le domaine de la construction durable. Bien que l’application de codes et normes propres aux différents contextes géographiques puisse restreindre

l’universalisation de critères dans le domaine de la construction, il est toutefois important de citer ces récentes recherches sur les indicateurs et critères d’adaptabilité à titre de pionnières dans le domaine.

Les concepts d’adaptabilité et de flexibilité sont de plus en plus incorporés aux certifications de la durabilité des bâtiments. À titre d’exemple, dans la certification *LEED for Neighbourhood Development* (LEED-ND), deux crédits parmi des dizaines sont liés au concept de l’adaptabilité.⁴ À l’échelle du bâtiment, LEED v4 offre 1 crédit d’innovation en termes de « design pour la flexibilité ». Dans ce cas, l’intention du crédit est de concevoir en vue de la flexibilité et de l’optimisation de la durée de vie des composantes et des assemblages (USGBC, 2018). Un crédit

3. Dans le cadre de la présente étude, la possibilité d’appliquer les critères Flex 4.0 au bâtiment de la MDD pour évaluer son degré d’adaptabilité a été explorée. Il a cependant été décidé de concert avec le client de ce mandat de ne pas se restreindre à l’usage de critères trop spécifiques et de plutôt se concentrer sur des questions plus adaptées à la MDD et au contexte local.

4. Voir les crédits GCTc5 « Recyclage de bâtiments historiques » et GCTc4 « Recyclage des bâtiments et recyclage adaptatif » (USGBC, 2018).

similaire est également disponible dans la certification LEED BD+C Healthcare (ibid). Le programme de certification du Royaume Uni, BREEAM, offre aussi quelques crédits pour l'adaptabilité tels que le « MAT 06 – adaptation future » pour les bâtiments existants et le « WST 06 – adaptabilité fonctionnelle » pour les nouvelles constructions (BRE Global, 2018). Il faut toutefois noter que ces crédits sont optionnels et ne représentent qu'une petite fraction de l'ensemble des crédits.

Il existe par ailleurs plusieurs barrières à l'adoption courante du concept de l'adaptabilité. Premièrement, il n'a pas encore été incorporé dans les définitions les plus courantes de la durabilité, alors que des chercheurs tels que Duffy et Brand (parmi beaucoup d'autres) travaillent dans ce domaine depuis plusieurs décennies. Une seconde barrière est le manque de consensus quant à la façon de rendre les bâtiments plus adaptables. De façon plus tangible, un important frein est la perception de coûts additionnels qui pourraient résulter de mesures d'adaptabilité (tels que des planchers surélevés, des cloisons démontables, et autres composantes) alors qu'il ne soit pas garanti que les locataires accepteront de payer pour celles-ci. Ainsi, bien que certaines avancées en matière d'adaptabilité aient été réalisées tant en recherche qu'en pratique, les bénéfices devront encore être démontrés de façon empirique.

Cette revue non exhaustive de la littérature a permis une meilleure compréhension du concept de l'adaptabilité des édifices à bureaux, ainsi que des concepts de « généralité », « flexibilité » et « élasticité », en plus des paramètres de conception de bâtiments adaptables développés par certains chercheurs. Ces repères ont permis de formuler les questions qui structurent la présente étude et de bien cibler celles adressées aux spécialistes lors des entrevues.

1.3. Le concept de l'adaptabilité appliqué aux édifices à bureaux

Des entrevues avec des experts montréalais en immobilier corporatif ont permis l'identification de stratégies mises en place pour garantir l'adaptabilité,

la longévité et la flexibilité des édifices à bureaux, ainsi que certaines tendances prospectives du marché. Ces entrevues ont mis en lumière que l'un des objectifs premiers des promoteurs et gestionnaires immobiliers est précisément de concevoir des bâtiments facilement adaptables qui ne doivent pas être remodelés très fréquemment. Bien entendu, les bureaux à aires ouvertes facilitent beaucoup plus l'adaptabilité que les bureaux fermés. Un promoteur et gestionnaire immobilier interviewé ajoute :

« Nous concevons nos bâtiments de l'intérieur vers l'extérieur. Nous regardons la distance entre le noyau et les fenêtres. Nous examinons plus particulièrement l'efficacité de la dalle⁵ et l'efficacité globale du bâtiment, nous examinons la façon dont vous pouvez diviser l'espace; donc, s'il s'agit d'un plancher à plusieurs locataires, comment cela va fonctionner? La plupart des locataires veulent des bureaux ouverts. Les bureaux fermés sont un phénomène du passé. » (Peritz, 2018)

La distribution des planchers et les hauteurs de plafonds sont des facteurs prépondérants aujourd'hui. Pour les promoteurs et gestionnaires immobiliers, la flexibilité des espaces et une bonne hauteur dalle à dalle sont essentiellement une question de demande et donc de rentabilité. Le *future-proofing*, ou la conception d'un bâtiment en prévision de composantes ou d'usages futurs, devient de plus en plus important. Selon un gestionnaire immobilier, les concepteurs des nouveaux bureaux de la compagnie *Deloitte* à Toronto, par exemple, ont incorporé plusieurs stratégies telles que des portes du plancher au plafond, des systèmes de cloisons démontables sans joints tirés, un grand nombre de prises électriques distribuées dans l'espace et dans les zones « collaboratives », et des cloisons de type « skyfold » (cloisons mobiles pliables comme des persiennes verticales). Ces stratégies favorisent surtout l'aspect de la « flexibilité » selon les principes d'adaptabilité développés par Arge (2005).

5. Doit être entendu comme « l'efficacité du plan ».

Pour Daniel Pearl, architecte chez l'OEUF Architectes, le concept de *future-proofing* est fondamental pour l'analyse de la flexibilité. Pour cet architecte et son équipe, le *future-proofing* est non seulement une stratégie d'adaptabilité fonctionnelle à des besoins futurs, mais aussi une stratégie en vue de l'intégration future de composantes et systèmes « durables ». Certains projets de l'OEUF prévoient à l'avance, par exemple, un toit vert qui sera aménagé plus tard. Les concepteurs s'assurent ainsi de la juste profondeur de la toiture et de la taille des parapets. Ils prévoient à l'avance la capacité de la structure pour supporter le poids d'un tel système et des membranes pour garantir l'étanchéité. Dans un projet de logement social durable à Laval, la firme a conçu la salle de géothermie en fonction de l'intégration future de puits de géothermie supplémentaires afin d'accroître la capacité du système de 30 % à 65 % – ce qui n'était pas possible au départ pour des raisons budgétaires. Selon Pearl, il est important de « convaincre le client d'investir dans l'enveloppe ». Avec une enveloppe très performante, « les besoins en équipements mécaniques, qui doivent entre autres gérer les gains ou pertes de chaleur de l'enveloppe, peuvent être significativement réduits. Tout cela aide aussi à prévenir de coûteuses rénovations à l'avenir ». Bien évidemment, une enveloppe à haute performance aide aussi à réduire les besoins en chauffage et en climatisation du bâtiment. Les entrepreneurs abondent dans le même sens. Certains systèmes constructifs flexibles aident à faciliter les rénovations et réaménagements futurs d'un bâtiment, tels que les gicleurs flexibles et les tuiles de tapis sans colle.

Il est aussi important de s'adapter à un marché en constante évolution. Il y a aujourd'hui, par exemple, une tendance marquée pour le télétravail. Ainsi, de plus en plus d'entreprises réduisent leur surface de bureaux considérant qu'un certain nombre d'employés travailleront depuis leur domicile. Le marché favorise aussi les « *hot desks* », c'est-à-dire, la mise en place de postes non-assignés, tout en offrant des espaces communs de haute qualité tels que des cafés, des cuisines, et des salons avec un mobilier de repos et de détente. Dans un article publié dans *Les Affaires*, Martine Sirois du Groupe Altus explique, « En ce

moment, les propriétaires essaient d'améliorer leurs immeubles pour créer plus d'espaces communs offrant des services aux locataires : de la place pour ranger les vélos et des douches pour se laver, par exemple. Les services aux entreprises locataires ont un impact direct sur l'attrait qu'elles exercent sur leurs employés ou candidats potentiels » (Charest, 2018). À Montréal, les firmes Deloitte et Rogers ont adopté récemment la typologie « *host desks* ». D'autres tendances existent : par exemple, les employés utilisent beaucoup moins de papier aujourd'hui, et ils ont moins besoin d'énormes classeurs, télécopieurs, et appareils de bureaux. Ces changements permettent de réduire les surfaces des espaces de travail. Le lieu de travail basé sur les activités (*activity-based workplace*) est aussi une nouvelle tendance. La conception de ces aires de bureaux est en fonction du type de travail exercé et des activités auxquelles les employés participent (par exemple le travail concentré, le travail collaboratif, la socialisation, les vidéoconférences, etc.). Typiquement, ces bureaux n'ont pas de postes assignés et sont constitués d'une mixité d'aires ouvertes et de salles communes ou privées pour diverses activités. Les employés ont beaucoup plus de mobilité dans cette typologie, étant appelés à se déplacer dans les divers lieux leur étant offerts.

Une autre tendance du marché est la densification des espaces à bureaux. Certains guides adoptés par les grandes corporations recommandent d'assigner jusqu'à 80 pieds carrés (7.4 m²) par poste de travail pour des employés non cadres (Lourdelle, 2009; Public Works and Services, 2012; Whole Building Design Guide). Ceci peut se comparer avec les 500 à 700 pieds carrés par personne (p/p) de mise dans les années 1970, 250 pieds carrés p/p en 2000 et 176 pieds carrés p/p en 2012 (Marr, 2014). Pour Travaux publics et services gouvernementaux Canada (2012), « La tendance actuelle est d'utiliser l'espace avec plus d'efficacité, à travailler plus souvent en collaboration et à créer des postes de travail plus petits qui sont dotés des nouvelles technologies et qui tiennent compte du temps que les employés passent dans leur bureau » (p. A-3). Or cette densité peut dépendre du type de travail. Par exemple, le Gouvernement du

Canada distingue quatre types de travailleurs : leader, fixe, flexible et itinérant. La taille maximale des postes de travail est de 4,5 m² ou 50 pi.ca. pour les travailleurs fixes et encore moins pour les travailleurs flexibles ou itinérants (Travaux publics et services gouvernementaux Canada, 2012). Dans les cas les plus extrêmes de bureaux avec seuls des postes non-assignés, les calculs de densité ne se font même pas au pied carré. Ils se font à l'aide d'un ratio de sièges disponibles sur un nombre d'employés, ce allant de 1 : 1.2 à 1 : 1.5, signifiant un nombre plus important d'employés que de sièges disponibles (entrevue informationnelle, 2018).

Pour être en mesure de gérer cette densification des espaces, il est important de considérer la capacité des systèmes (électriques, mécaniques, de plomberie, de transport vertical) et de certaines composantes tributaires du nombre d'occupants tels que les issues, escaliers et sanitaires (Peritz, 2018).

Vues dans leur ensemble, ces entrevues ont aidé à comprendre les stratégies et facteurs d'adaptabilité reconnus dans le monde professionnel à Montréal et à relever le concept de densification à titre de nouvelle tendance du marché. Ce concept sera mis en perspective dans le détail des résultats de la question 2 traitant de l'adaptabilité de la MDD aux besoins futurs.

1.4. Discussion et autres résultats

Facilité de réaménagement de la MDD

Cette étude a permis d'identifier huit facteurs non limitatifs et non-hiérarchiques ayant rendu difficiles les réaménagements à la MDD :

- Le manque d'espace à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment pour des conteneurs à déchets et recyclage, ce qui obligeait l'entrepreneur à remplir des remorques et faire le tri au centre de triage directement ;
- L'exiguïté du quai de chargement et l'absence de sous-sol, posant des problèmes pour l'entreposage des matériaux ;
- Le défi d'appareiller couleur et fini du nouveau béton poli au RDC avec le béton poli existant ;
- Les exigences environnementales et techniques de la MDD, ayant compliqué la gestion des déchets et le choix des matériaux (voir le tableau 1.3 ci-dessous) ;
- Les planchers surélevés (composante privilégiée à la MDD) qui dans certains cas particuliers ont compliqué certains réaménagements. Ces enjeux sont expliqués en détail dans le volet 2 ;
- Le contrôle des systèmes électromécaniques (par exemple la ventilation, qui est liée à l'éclairage) : Lorsqu'il faut ajouter des systèmes de contrôle à la MDD, ceci accroît les coûts et complique les réaménagements ;
- Le manque d'espace de stationnement (intérieur et environnant) pour les travailleurs de la construction : Une seule case de stationnement était disponible, ayant conduit certains ouvriers à porter plainte ;
- Le souhait du gestionnaire de la MDD du maintien à l'identique de la performance énergétique et environnementale du bâtiment.

Il faudrait mentionner que dans tous ces cas, il s'agit de compromis réalisés lors la conception afin de maximiser les espaces locatifs sur un site exigu et de répondre à la mission environnementale du donneur d'ouvrage.

Exigences environnementales et techniques pour les réaménagements de la MDD.

1. Utilisation de produits sans COV lorsque disponibles. S'applique aux peintures, scellants, colles et tout autre produit volatil
2. Protection en tout temps des conduits de ventilation de la poussière, incluant le dessous du plancher surélevé
3. Limitation (contrôle) au maximum de la génération de poussière dans le bâtiment
4. Maximisation de l'étanchéité du plancher surélevé installé pendant les travaux
5. Électrification au plafond dans des conduits métalliques rigides peints en blanc
6. Interdiction de percement du gypse des murs extérieurs
7. Utilisation de gypse avec 98% en contenu recyclé, si possible celui de CGC produit à Montréal
8. Inspection au rayon X (ou autre technologie) des dalles de béton devant faire l'objet de percements
9. Utilisation de couvertures protectrices dans les ascenseurs et nettoyage des tapis dès qu'ils sont salis
10. Remise au propriétaire des équipements éliminés au cours des réaménagements

Par ailleurs, certains problèmes ont été évités lors des réaménagements de la MDD. Cette étude considère que la non (ou très faible) occurrence de tels problèmes soit un signe de sa relative facilité de réaménagement. Par exemple, il n'y a jamais eu :

- de problèmes avec la trame structurale ;
- d'enjeux de sécurité pour les ouvriers ou les usagers du bâtiment ;
- nécessité de louer des équipements particuliers pour l'acheminement de matériaux de grande dimension aux étages ;
- besoin de percer l'enveloppe du bâtiment pour ces réaménagements. En effet, une nouvelle thermopompe vient tout juste d'être installée à la MDD, ce sans aucun percement extérieur ;
- obligation de fermer l'accès principal ou de bloquer des issues ;
- nécessité d'interrompre les systèmes électromécaniques à la rare exception de l'éclairage pour quelques heures ;

De plus, certains critères facilitent ou ne contraignent pas les réaménagements :

- Des câbles peuvent facilement être passés à l'intérieur des suites sous les planchers et les diffuseurs d'air aisément reconfigurés (ce grâce au système de planchers surélevés malgré d'autres défis qu'il pose, lesquels sont exposés dans l'annexe 2) ;
- grâce aux exigences du propriétaire, les nuisances telles que les odeurs et la poussière sont évitées sans contraintes majeures lors des réaménagements;
- grâce aux exigences du propriétaire, les nuisances auditives sont elles aussi le plus que possible contenues sans contraintes majeures, les travaux bruyants étant plutôt prévus en soirée afin de ne pas déranger les occupants du bâtiment.

Pour l'entrepreneur responsable des quatre réaménagements de la MDD, ce bâtiment « n'a pas plus de positifs ni de contraintes qu'ailleurs », propos qui reflètent bien les résultats nuancés de la présente section.

Adaptabilité de la MDD aux besoins futurs

Pour aborder la question de l'adaptabilité de la MDD aux besoins futurs, deux définitions de ce concept ont

été retenues : a) la capacité à gérer une augmentation de densité future (Peritz, 2018), et b) le triptyque « généralité – flexibilité – élasticité » (Arge, 2005).

a) Pour tenter d'évaluer la capacité du bâtiment de la MDD à accueillir une plus forte densité prospective, ont été analysés quelques-uns de ses composantes et systèmes. Il s'agit en premier lieu des issues des étages de bureaux (incluant leurs baies de portes) et des largeurs des corridors communs conduisant aux issues, qui sont tous deux des éléments critiques en matière de sécurité dans les bâtiments en vertu du Code de Construction du Québec 2010 (et versions précédentes). Toute mesure de la densité prospective d'un bâtiment doit impérativement en premier lieu se soumettre à cette analyse de capacité d'évacuation des issues et de leurs accès, leurs largeurs étant déterminées par la charge d'occupation du bâtiment. En d'autres mots, si les issues et leurs accès n'ont pas la largeur suffisante⁶ pour accueillir un surplus d'occupants, toute densification n'est pas possible sans modifications conséquentes (et significatives) de ceux-ci. D'autres composantes moins critiques en termes hiérarchiques, mais tout aussi importantes ont également ici été examinées, soit les sanitaires et les systèmes mécaniques, dont respectivement le nombre et le rendement sont tributaires de la charge d'occupation. Pour un portrait plus exhaustif de la densification prospective de la MDD, d'autres aspects en auraient mérité l'examen tels que l'optimisation possible des aires de bureaux en termes d'aménagement, et la surcapacité éventuelle des systèmes électromécaniques dans leur ensemble ainsi que de celui du transport vertical. Or pour des raisons de faisabilité, l'étude ne s'est limitée qu'à seule l'analyse des quatre aspects énoncés ci-dessus.

Les chercheurs de la présente étude n'ont pas eu accès à l'étude de code des concepteurs, laquelle aurait été indispensable pour évaluer avec certitude la capacité de ces composantes à recevoir une charge supplémentaire d'occupants. Ils n'ont pas non plus réalisé une étude de code exhaustive de la MDD. Leurs résultats sont le fruit d'une estimation à

6. À noter que pour les issues de bâtiments en aire communicante, d'autres facteurs peuvent être considérés.

partir des plans du bâtiment disponibles et en vertu des exigences du Code de Construction du Québec 2010. C'est suivant cette approche que les issues et leurs baies de portes, les corridors communs servant d'accès aux issues ainsi que les sanitaires ont ici été examinés⁷.

En ce qui a trait aux issues, en premier lieu il faut préciser que le bâtiment de la MDD est en aire communicante du fait de son atrium ouvert, ici sur tous les étages.⁸ Simplement dit, dans un tel cas les issues sont particulières : les charges d'occupants y sont cumulatives à moins d'aires de refuge dédiées sur les étages ou que ces issues puissent servir d'aire de refuge pour tous les occupants de l'aire communicante. Avec les nombres d'occupants par étage leur ayant été fournis et un calcul de superficie des escaliers servant d'issues, les chercheurs estiment que cette superficie n'est pas suffisante pour que ceux-ci puissent servir d'aire de refuge. De ce fait, ils seraient cumulatifs. Ayant calculé à l'inverse la charge maximale d'évacuation permise par leur largeur (principale contrainte dans ce cas), les chercheurs estiment que les deux issues des étages de la MDD sont à presque pleine capacité, étant aptes à ne recevoir environ que quelques personnes de plus que le nombre d'occupants actuels. Par ailleurs, il y a lieu de préciser que si la MDD avait été conçue sans aire communicante, ses issues, dont la capacité serait alors calculée par étage, auraient pu absorber un surplus de population important.

Il est estimé que les deux baies de portes conduisant aux issues ont quant à elles beaucoup plus de latitude. Si l'on ne considère que seul l'étage aujourd'hui le plus densément occupé, ses baies de portes d'issue permettraient de tripler le nombre d'occupants. Quant aux corridors communs des étages 3 à 5, qui en plus de leurs autres usages fonctionnels servent d'accès

7. Cette estimation est pour fins de discussion uniquement et ne saurait remplacer une étude de code en bonne et due forme réalisée par les concepteurs du bâtiment ou préparée par un consultant expert.

8. À noter qu'il s'agit d'un choix architectural qui bonifie grandement la spatialité du bâtiment.

aux issues, de largeur variable ils pourraient soutenir une densité de 3 à 4 fois plus importante que celle d'aujourd'hui. En ce qui concerne les sanitaires, la distribution et quantité des toilettes aux mêmes étages permettraient de doubler la densité actuelle (National Research Council of Canada Associate Committee on the National Building Code, 1990).⁹

Enfin, si les ingénieurs en mécanique ont maintenu comme critères de conception les calculs avancés lors de la 3^e session de brainstorming du processus de conception intégré (PCI)¹⁰, les systèmes mécaniques pourraient quant à eux accueillir environ 10 % plus de densité. Ces résultats partiels indiquent que bien que certains systèmes et composantes de la MDD permettent à divers degrés une densité accrue, la composante critique des issues étant possiblement à capacité presque maximale, toute densification prospective souhaitée nécessiterait des altérations significatives à ces issues (incluant leurs murs de haute résistance au feu) pour accueillir une charge d'occupants supplémentaire.

b) Suivant la définition de l'adaptabilité selon Arge (2005) qui comporte 3 dimensions, soient la généralité, la flexibilité, et l'élasticité, les résultats indiquent que le bâtiment de la MDD intègre celle de la « généralité ». En effet la MDD dispose d'une largeur, hauteur d'étage et d'une trame structurale pouvant facilement accommoder des locataires variés. Par ailleurs, à l'exception des planchers surélevés qui optimisent la « flexibilité » interne des suites de bureaux, l'équipe de conception n'a pas privilégié certains autres systèmes intérieurs qui auraient pu maximiser sa flexibilité¹¹ comme des portes de plancher à plafond ou des cloisons de type *skyfold* telles qu'utilisées dans les bureaux de Deloitte. Quant au dernier critère, soit « l'élasticité » (ou l'habileté d'agrandir les espaces internes ou de les cloisonner en fonction des besoins des occupants), les agrandissements ou les cloisonnements internes à la MDD ne sont ni plus faciles ni plus difficiles que dans d'autres bâtiments. Ainsi, des trois critères proposés par Arge, c'est donc la « généralité » – liée à la forme et à l'organisation spatiale – que la MDD met le plus en exergue.

Envergure des réaménagements à la MDD en regard des tendances du marché

Afin de répondre à la question examinant si quatre réaménagements à la MDD en l'espace de sept ans depuis son inauguration est « habituel » pour un nouvel édifice à bureaux, il s'agit de comparer les coûts et la fréquence des réaménagements à la MDD avec les tendances du marché. Ces deux facteurs d'ordre quantitatif ont été identifiés par le client-occupant à titre de meilleurs indicateurs pour pouvoir comparer l'envergure des réaménagements à la MDD avec celles d'édifices à bureaux neufs ou récents du marché montréalais puisqu'ils en offrent des repères objectifs.

En ce qui concerne les coûts de réaménagement, la gamme habituelle varie énormément, entre 40 et 105 \$ par pied carré. Également, selon un rapport réalisé par Altus Group (2017), l'un des principaux consultants dans le secteur immobilier commercial, les coûts de réaménagements (« *interior fit out* ») d'un édifice à bureaux de classe A moyen à Montréal sont de 80 \$ à 140 \$ par pi.ca. (et de 35 \$ à 90 \$ par pi.ca. pour un classe B). Suivant ces paramètres, les coûts au pied carré de trois des quatre réaménagements à la MDD correspondent aux gammes de prix considérées « habituelles » dans l'industrie.

9. Voir Tableau 3.7.2.2.À du Code de Construction du Québec 2010.

10. Pour valider les critères de conception mécanique, les documents « tels que construits » auraient dû être consultés mais les auteurs de la présente étude n'y ont pas eu accès.

11. D'après une architecte ayant travaillé sur le projet, l'équipe de conception avait suggéré du mobilier flexible. Cette suggestion n'a pas été retenue par le client, celui-ci ayant plutôt opté pour le recyclage de mobilier usagé (architecte, 2018). Ce fait met en lumière la tension entre deux objectifs de développement durable : l'adaptabilité et l'utilisation de matériaux.

TABEAU 3

Détails des réaménagements réalisées à la MDD depuis 2011 (*base building exclu*). Source : auteurs.

Nom du réaménagement	Type de réaménagements	Année	Durée	Superficie affectée	Coûts totaux	Coûts / pi.ca
Restaurant Commensal/Marius	Réaménagement majeur du rez-de-chaussée de la MDD pour construire le café Marius et ajouter des salles locatives.	2013	8 semaines	3444 pi.ca. (320 m²)	522,111.69\$	151.60\$
	Renégociation ou délocalisation – Réaménagement majeur.					
Syndicat des professionnels et professionnelles municipaux de Montréal (SPPMM)	Construction d’une cloison dalle à dalle d’environ 16 pieds de long pour séparer les bureaux du SPPMM des bureaux d’Option Consommateurs et réaménagement de 540 pi.ca. de bureaux privés.	2015	3-4 semaines	540 pi.ca. (50 m²)	43,225.46 \$	80.00\$
	Cloisonnement.					
Projet Équiterre-MDD	Construction de cloisons en verre (non dalle à dalle) pour séparer les bureaux d’Équiterre d’avec les bureaux de World Wildlife Foundation (sous-locataire d’Equiterre) et de ceux de la Maison du Développement Durable.	2015	3-4 semaines	673 pi.ca. (62.5 m²)	36,338.82 \$	54.00\$
	Cloisonnement.					
Les bureaux Dunsky	Démolition d’une cloison dalle à dalle de 80 pieds de long pour agrandir les bureaux de Dunsky de 2100 pi.ca. à 4000 pi.ca; Relocalisation d’appareils d’éclairage et dispositifs électriques afférents.	2017	5-6 semaines	1,873.5 pi.ca. (174.5 m²)	113,371.00\$	60.50\$
	Agrandissement.					

Selon les experts de l’industrie, il n’est pas habituel qu’un locataire effectue des réaménagements pendant la durée de son bail (durée habituelle de 5 à 10 ans). Un répondant a signifié que la fréquence de réaménagements intérieurs pour les types réparations rapides et reconfigurations serait de 5 à 10 ans. Ces points de vue suggèrent que la fréquence des réaménagements réalisés à la MDD soit plutôt inhabituelle (plus fréquentes dans une courte durée). Or d’autres études sont nécessaires afin de valider avec certitude cette conclusion. Mais de façon plus importante, les différents réaménagements entrepris au bâtiment de la MDD, quelle que soit leur envergure, l’ont été pour des raisons particulières issues de contraintes ou de besoins conjoncturels. Il y avait donc d’autres motifs que le plus « habituel » rafraîchissement de l’apparence des bureaux. En effet, la faillite inopinée d’un café-restaurant¹² a ici obligé l’important réaménagement du rez-de-chaussée de

12. Les faillites de restaurants semblent être très communes, de l’ordre de 60% pour les nouveaux restaurants, selon une étude réalisée à l’université d’Ohio (Parsa et al., 2005)

l’immeuble, et les besoins spatiaux et fonctionnels propres à la spécificité des autres locataires ont engendré des réaménagements somme toute assez mineurs et dans les gammes de coûts moyens de l’industrie. Vu de cet angle, les réaménagements de la MDD depuis son inauguration seraient beaucoup moins atypiques.

Pour inversement conclure à une nette singularité de la MDD en termes d’envergure de réaménagements (mesurée ici suivant coûts et fréquence), l’on aurait autrement dû y observer des réaménagements majeurs aux motifs autres que ceux émanant de contraintes et de besoins spatiaux-fonctionnels propres à ses locataires. Par exemple, un rafraîchissement coûteux à tous les deux ans, ou encore des changements importants et fréquents aux systèmes électromécaniques, auraient en ce sens pu être considérés comme étant de l’ordre de réaménagements atypiques, ce qui n’est pas le cas à la MDD.

Impacts des réaménagements sur la qualité du bâtiment

Enfin, quant à la question de l’éventuelle détérioration ou non de la qualité du bâtiment suite aux réaménagements, Normand Roy, chargé de projet lors de la construction de la MDD et client du projet, explique :

« On perd un peu la qualité du bâtiment à chaque fois. On détériore. Quand on conçoit un bâtiment équilibré, et on ajoute ou on enlève des morceaux, le système peut perdre son équilibre » (Roy, 2018).

Dans cette perspective, les réaménagements auraient un impact de longue haleine plutôt négatif sur la qualité physique du bâtiment. En effet, quelques impacts négatifs des réaménagements ont été notés, notamment l’usage de peinture avec COV alors qu’une peinture sans COV avait été utilisée lors de la construction, des aires de tapis désassorties, des revêtements de planchers souillés à certains endroits, et des changements (négatifs) au contrôle et au balancement des systèmes électromécaniques. Par exemple, pendant le réaménagement des bureaux d’Equiterre, réalisées afin de créer des bureaux pour le World Wildlife Foundation et pour l’organisme MDD, une rangée d’appareils d’éclairage n’a jamais été reconnectée dans les bureaux d’Equiterre. De plus, aucun interrupteur n’a été installé dans les bureaux de la MDD, de sorte que lorsqu’un employé travaille de soir à la MDD, les lumières chez Equiterre restent allumées et vice versa (Turcotte, 2018).



Conduits électriques non peints lors de réaménagements.
Photo : Antoine Saito.



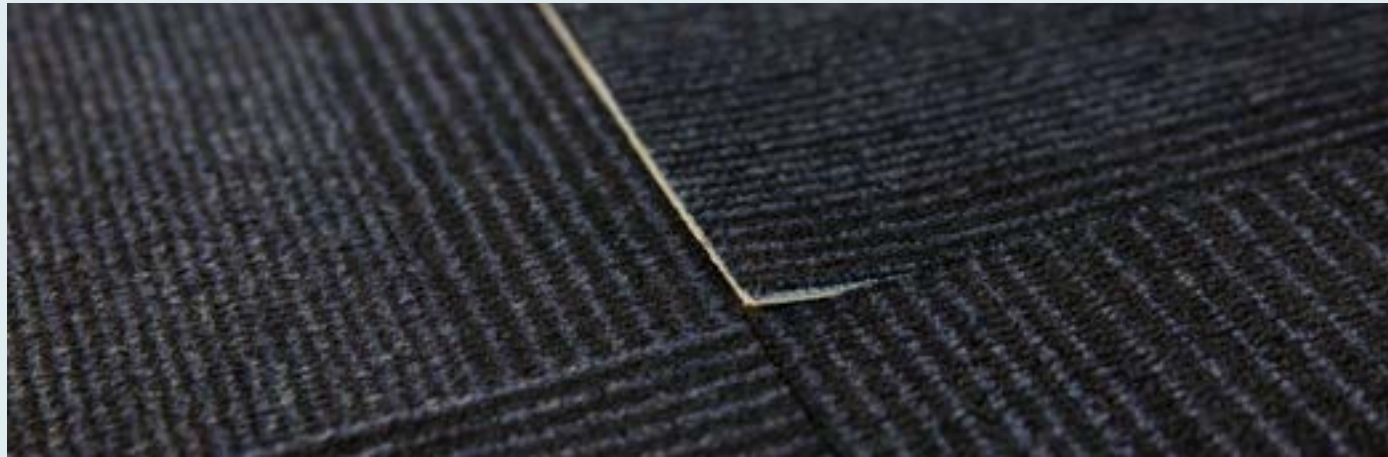
Équipements électro-mécaniques non peints lors de réaménagements. Photo : Antoine Saito.



Marques laissées lors du déplacement d'un mur.
Photo : Antoine Saito.



Marques laissées lors du déplacement d'un mur et de tuyaux de plomberie. Photo : Antoine Saito.



Tapis mal recollés lors d'un réaménagement. Photo : Antoine Saito.

En revanche, d'autres réaménagements ont amélioré la qualité du bâtiment. Alors que les responsables des réaménagements n'ont pas toujours pu conserver le contrôle et le balancement des systèmes électromécaniques lors de certains réaménagements, la MDD a même pu optimiser le nombre de diffuseurs d'air dans les espaces à bureaux. De plus, l'efficacité énergétique a été améliorée. Par exemple, pour le projet d'agrandissement des bureaux de Dunsky, le bâtiment s'est doté de la technologie la plus récente en matière d'éclairage, soit les ampoules DEL tout en conservant le même modèle d'appareil d'éclairage, en plus d'un système entièrement automatisé. M. Chartier, l'entrepreneur des réaménagements, précise :

« les réaménagements effectuées à la MDD ont toujours été réalisées avec l'objectif de garder le concept de la MDD bien en vie. Les réaménagements ont amélioré les espaces et ont réduit le nombre d'appareils d'éclairage dans quelques espaces bordant les fenêtres. De plus, des programmations de contrôle d'éclairage ont aussi été modifiées pour permettre aux appareils de s'éteindre plus rapidement en cas d'inactivité dans une pièce. » (Chartier, 2018)

Les aspects du confort des usagers sont particulièrement traités dans l'Annexe 4. Pour ce qui est de la qualité physique des composantes et systèmes du bâtiment, cette étude conclut que bien que les réaménagements aient parfois laissé des traces de détérioration, celles-ci sont mineures et peuvent aisément être corrigées. De plus, certains réaménagements auraient plutôt contribué à la bonification de la qualité du bâtiment.

1.5. Conclusions

Les quatre réaménagements intérieurs réalisés dans le bâtiment de la MDD depuis 2011 ont totalisé près d'un million de dollars et ont été un sujet de préoccupation pour le client-occupant. Ce le fut en particulier parce que le bâtiment fait « sur mesure » représentait un important investissement et se voulait un bâtiment phare en matière de principes de durabilité au Québec et ailleurs. Ces réaménagements ont eu non seulement un impact financier pour les occupants, mais ils ont aussi généré des impacts environnementaux importants et des effets sur les autres composantes et systèmes du bâtiment. Ainsi, « l'adaptabilité » physique et fonctionnelle du bâtiment a été étudiée.

Étant donné que l'adaptabilité est un élément important de la durabilité des bâtiments, quatre questions ont été examinées : Le bâtiment de la MDD est-il facile à rénover ? Est-il facilement adaptable aux besoins futurs ? Est-ce que le fait que le bâtiment a subi quatre réaménagements depuis son inauguration est « habituel » pour un nouvel édifice à bureaux ? Et, quels sont les impacts de ces réaménagements sur la qualité du bâtiment ? Une analyse de la littérature sur l'adaptabilité et les réaménagements d'édifices à bureaux, des entrevues avec des experts de l'industrie, ainsi qu'une revue de documents de la MDD et de codes et règlements canadiens ont permis l'exploration de ces questions.

Le bâtiment de la MDD ne répond pas aux attentes du client-occupant en termes de facilité de réaménagements, d'adaptabilité aux besoins futurs, d'envergure de réaménagements passés (selon leurs coûts et leur fréquence), et de capacité de certains finis et systèmes à résister à la détérioration suite aux travaux de réaménagement. Cependant, il s'agit davantage ici d'une question d'expectatives du client-occupant que de la réelle performance du bâtiment. Les résultats de cette étude montrent que, malgré ces préoccupations légitimes, le bâtiment de la MDD n'est pas figure d'exception dans ces aspects. Au contraire, l'étude tend à conclure que le bâtiment de la MDD est plutôt assez habituel. Or les réponses à ces questions sont aussi nuancées. Finalement, l'adaptabilité est un

concept dynamique et multidimensionnel, et, comme tout bâtiment, celui de la MDD est un système complexe, composé d'éléments fortement inter-reliés, aux forces et faiblesses en équilibre.

En premier lieu, cette recherche suggère que la MDD n'est ni plus facile ni plus difficile à rénover qu'un édifice à bureaux « typique ». Certains facteurs complexifient ses réaménagements, notamment les exigences environnementales et techniques du client-occupant qui ont un impact sur la gestion des déchets, le manque d'espace pour les conteneurs à déchets et recyclage et pour l'entreposage des matériaux, en plus du défi d'appareillage de certains finis. Or ces enjeux ne sont pas majeurs. Inversement, la non (ou très faible) occurrence de certains problèmes contribue à la facilité de réaménagement de la MDD.

En second lieu, pour aborder la question de l'adaptabilité de la MDD aux besoins futurs, deux angles de ce concept ont été retenus : a) la capacité à gérer une augmentation de densité future (Peritz, 2018), et b) le triptyque 'généralité - flexibilité - élasticité' (Arge, 2005). En termes de densité, pour des raisons de faisabilité l'étude n'a examiné que quatre composantes et systèmes alors que pour en avoir un portrait plus exhaustif, l'examen de plusieurs autres paramètres serait nécessaire. L'étude s'est penchée sur la capacité des issues des étages de bureaux 2 à 5 (incluant leurs baies de portes), la capacité des corridors communs servant aussi d'accès aux issues, des sanitaires et du système mécanique, tous ces éléments étant tributaires de la charge d'occupation. Avec ces résultats partiels, il est possible de conclure que les baies de portes, les sanitaires et, avec réserve, le système mécanique, peuvent à divers degrés non négligeables soutenir un accroissement de population. Cependant, la composante critique des issues étant estimée à capacité presque maximale à la MDD du fait de sa conception en aire communicante, toute densification prospective souhaitée nécessiterait des altérations significatives à ces issues pour accueillir une charge d'occupants supplémentaire.

En ce qui a trait aux dimensions de l'adaptabilité proposées par Arge (2005), les hauteurs d'étages, la trame structurale et les aires ouvertes contribuent à

la « généralité » de la MDD, élément important de son adaptabilité. Par ailleurs, la « flexibilité » et « l'élasticité » n'ont pas été des principes de conception privilégiés à la MDD, à l'exception du système de planchers surélevés qui accroît en partie sa « flexibilité ». Par l'ensemble de ces faits, il est possible de conclure que le bâtiment de la MDD est adaptable seulement à certains égards et moins à d'autres.

En troisième lieu, en ce qui concerne l'envergure des réaménagements à la MDD, évaluée ici par leurs coûts et leur fréquence, cette étude révèle que les coûts de réaménagements n'ont pas été exceptionnels comparativement à ceux des édifices à bureaux « habituels » à Montréal. Il est difficile de se prononcer avec certitude quant à la valeur typique ou atypique de la fréquence de ces réaménagements. En revanche, ils ne sont pas liés à des motifs de rafraîchissement de l'apparence des lieux, mais ils sont plutôt tributaires de contraintes et besoins conjoncturels propres aux locataires. De plus, trois de ces réaménagements sont mineurs. En ce sens, cette étude suggère que ces réaménagements ne sont pas inhabituels.

Enfin en quatrième lieu, concernant la question de l'éventuelle détérioration ou non de la qualité du bâtiment suite aux réaménagements, des cas où les finis ont été détériorés ou endommagés ont été documentés. Inversement, les réaménagements ont aussi contribué à l'amélioration de la qualité de certaines composantes du bâtiment, notamment l'efficacité des systèmes d'éclairage et l'optimisation de l'emplacement des diffuseurs d'air.

En conclusion, deux leçons pertinentes peuvent être tirées du cas de la MDD en termes prospectifs. À plus petite échelle, il s'agit d'abord des enseignements que nous livre le concept de la possible densification interne des édifices à bureaux, une tendance émergente sur le marché de l'immobilier corporatif. En effet, étant donné qu'une grande partie du parc immobilier administratif du centre-ville de Montréal est déjà construite et devra être rénovée, les nouvelles tendances en demande mériteront à être considérées par les gestionnaires immobiliers. De plus, les promoteurs de bâtiments neufs, quel que

soit leur emplacement, auront également avantage à répondre aux nouvelles demandes du marché pour que leur offre immobilière demeure compétitive. Or la présente étude soulève la question de la capacité de l'industrie à se prévaloir de cette nouvelle tendance.

Dans le cas de bâtiments existants, il est possible qu'ils soient déjà à saturation par le fait que certaines de leurs composantes critiques (issues, systèmes mécaniques, sanitaires, ascenseurs, structure, etc.) ne soient pas en mesure d'absorber une charge d'occupants supplémentaire, nécessitant dès lors des altérations significatives et donc coûteuses. Dans l'éventuelle impossibilité de modifier conséquemment leurs bâtiments, les gestionnaires devront se résoudre à sacrifier une certaine clientèle « en expansion » en demande de suites locatives aptes à soutenir leur croissance à plus ou moins long terme. Dans le cas de bâtiments neufs, les défis de la densification future sont tout aussi importants. Dans un contexte qui privilégie la densification des espaces et les postes non-assignés, les standards traditionnels pour calculer le nombre d'ascenseurs et la taille de certaines composantes ne fonctionnent plus. De plus, prévoir en amont pour une charge d'occupants additionnelle signifie de surdimensionner des composantes et des systèmes dont la taille et la performance sont tributaires du nombre d'occupants. Les surdimensionnements spatiaux peuvent avoir un impact significatif dans le cas d'un bâtiment en hauteur, du fait de leur multiplication par le nombre d'étages où ils se répètent. Essentiellement, le surdimensionnement se traduit en surcoût d'immobilisation. Pour les promoteurs et gestionnaires immobiliers, il s'agit dès lors d'évaluer quels compromis peuvent être faits entre coûts d'immobilisation (voire d'opérations), versus de rendement financier et de coût environnemental sur le long terme. Donc tant pour les bâtiments existants que les bâtiments neufs, les propriétaires et promoteurs immobiliers devront tenir compte de ce facteur de densification et mesurer ses impacts et/ou ses opportunités.

La seconde leçon qui englobe la première est l'importance de prendre en compte l'adaptabilité au sens large – donc la « généralité », la « flexibilité »,

« l'élasticité », le « *future-proofing* » et la densification intérieure des espaces – dès le début du projet. Une fois que la trame structurale, les issues, corridors communs, toilettes, ventilation, ascenseurs et autres composantes et systèmes critiques du bâtiment sont fixés et construits, il devient beaucoup plus difficile et coûteux d'apporter des changements au bâtiment pour l'adapter à de nouveaux besoins. En revanche, comme le suggèrent les propos sur la densité et le « *future-proofing* », privilégier l'adaptabilité en amont signifie des compromis, notamment en termes de coûts d'immobilisation, car elle implique souvent le surdimensionnement de certains éléments propres à l'infrastructure du bâtiment. Il est à noter que dans le cas de la MDD, l'adaptabilité du bâtiment n'a pas été intégrée à la charte du projet. Pour les raisons ici évoquées, cette dimension et ses implications auraient mérité de faire l'objet de discussions plus approfondies et soutenues dès l'amorce du projet.

Références

- Adaptable Futures. (2011). Toolkit. *Adaptable Futures*. Retrieved February 15th, 2018 from <http://adaptablefutures.com/>
- Adler, Jim, & Riegel, Dawn. (2014). 3 degrees of renovation for suburban office space. *Daily Herald Business Ledger*. <https://www.hiffmanblog.com/blog/8/18/2014/3-degrees-of-renovation-for-suburban-office-space>
- Altus Group. (2017). Canadian Cost Guide 2017.
- Arge, Kirsten. (2005). Adaptable office buildings: theory and practice. *Facilities*, 23(3/4), 119-127.
- Association de la construction et de l'habitation du Québec. (19 octobre 2017). Prévisions économiques – Davantage de mises en chantier que prévu en 2017, légère diminution pour 2018. *Cision / Newswire*. from <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/previsions-economiques---davantage-de-mises-en-chantier-que-prevu-en-2017-legere-diminution-pour-2018-651592483.html>
- Brand, Stewart. (1995). *How buildings learn: What happens after they're built*: Penguin.
- BRE Global. (2018). BREEAM official website. Retrieved August 7th, 2018, from <https://www.breeam.com/>
- Charest, Matthieu. (2018, 12 mai 2018). Les tendances qui dominent le marché du bureau. *Les Affaires*.
- Chartier, Pierre-Yves. (2018). Entrevue informationnelle. In A. O. e. R. Leoto (Ed.). Montreal.
- Conejos, Sheila, Langston, Craig, & Smith, Jim. (2013). AdaptSTAR model: A climate-friendly strategy to promote built environment sustainability. *Habitat international*, 37, 95-103.
- Construction Forecasts Canada. (2017). Regard prospectif – construction et maintenance (pp. 12).
- Davison, Nigel, Gibb, Alistair GF, Austin, Simon A, Goodier, Chris I, & Warner, P. (2006). *The Multispace adaptable building concept and its extension into mass customisation*.
- Duffy, Francis. (1990). Measuring building performance. *Facilities*, 8(5), 17-20.
- Duffy, Francis. (1992). *The changing workplace*: Phaidon Press.
- Duffy, Francis, Laing, Andrew, & Crisp, Vic. (1993). The responsible workplace: The redesign of work and offices: Butterworth-Heinemann.
- Duffy, Francis, & Powell, Kenneth. (1997). *The new office*. London : Conran Octopus.
- Geraedts, Rob. (2016). FLEX 4.0, a practical instrument to assess the adaptive capacity of buildings. *Energy Procedia*, 96, 568-579.
- Gregory, C. (2005). Multispace: adaptable building design concept. *Reid Architecture*, London.
- Lourdelle, Lucie. (2009, février). « L'enfer c'est les autres : bruit, promiscuité, manque d'intimité, uniformité : la vie au travail des salariés décloisonné » *CFDT Magazine*, 25-27.
- Marr, Gary. (2014). 'Hot desking' trend grows: No offices or assigned seating at new Deloitte headquarters. Financial Post. <http://business.financialpost.com/real-estate/property-post/hot-desking-trend-grows-no-offices-or-assigned-seating-at-new-deloitte-headquarters>
- McKay, Lauren. (2010, October). Modular Interior Technologies. *Green Building & Design* 1, 140.
- MDD équipe de conception. (2007). Réunion de coordination 2 Notes de rencontre. Laboratoire GRIDDD, Montréal, QC.
- National Research Council of Canada Associate Committee on the National Building Code. (1990). *National building code of Canada*: Associate Committee on the National Building Code, National Research Council.
- Néron, Jean-Francois. (2018). Construction non résidentielle à Québec: hausse majeure de la valeur des permis. *Le Soleil*.
- Parsa, HG, Self, John T, Njite, David, & King, Tiffany. (2005). Why restaurants fail. *Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly*, 46(3), 304-322.
- Peritz, Daniel. (2018). Informational interview. In A. O. a. R. Leoto (Ed.).
- Public Works and Services. (2012). Office Space Standards and Guidelines: Government of the Northwest Territories *version 1.4*: Government of the Northwest Territories (GNWT).

Roy, Normand. (2018). Entrevue sur les rénovations à la MDD. In A. Oliver (Ed.), *Etude Equiterre-Chaire Fayolle-Magil Construction*. Montréal.

Schmidt III, Robert, Eguchi, Toru, Austin, Simon, & Gibb, Alistair. (2010). *What is the meaning of adaptability in the building industry*. Paper presented at the 16th International Conference on "Open and Sustainable Building".

Travaux publics et services gouvernementaux Canada. (2012). *Normes d'aménagement du gouvernement du Canada relatives à l'initiative Milieu de Travail 2.0 - 2012 Gouvernement du Canada*.

Turcotte, Julie. (2018). Entrevue sur les rénovations à la MDD. In A. Oliver (Ed.). Montreal.

USGBC. (2018). USGBC official website. from www.usgbc.org

Whole Building Design Guide. Office. Retrieved July 25th, 2018, from <https://www.wbdg.org/space-types/office>



Photo : Bernard Fougère

VOLET 2

LES PLANCHERS SURÉLEVÉS ET LE SYSTEME DE VENTILATION DU BÂTIMENT DE LA MDD

Auteurs : Amy Oliver, Anne-Marie Petter, Gonzalo Lizarralde, Ricardo Leoto et Normand Roy | En collaboration entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre | Avec l'appui financier de MITACS. Contrat de recherche MITACS IT10752 | Certificat d'éthique No. CPER-18-001-D

Août 2018

Note sur les limites de l'étude

Ce rapport ne vise pas la production d'un contenu scientifique susceptible de produire des généralisations. Il vise à répondre à des questions spécifiques du mandataire (La Maison du développement durable/ Equiterre) concernant l'opération du bâtiment de la MDD. Il s'agit d'une étude de cas qui illustre les enjeux de planification, conception et opération d'un bâtiment spécifique. Il a été réalisé dans le cadre d'un projet de stage MITACS et d'une entente de collaboration de 8 mois entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre. Cette section fait partie intégrante d'une étude plus large qui comporte 3 autres sections similaires. Les résultats présentés dans cette section doivent être compris et contextualisés en regard de l'ensemble des résultats de l'étude.

Résumé

À l'époque de la conception du bâtiment de la MDD, le système de plancher surélevé à ventilation intégrée était considéré comme novateur. Il s'agit d'un système constructif permettant (entre autres) une distribution d'air par le plancher. Les étages 3 à 5 ont été dotés de planchers surélevés à ventilation intégrée, mais plutôt qu'une alimentation en air par gaine simple à une seule température, les concepteurs ont adopté un système de ventilation double-gaine (chaude et froide) alimenté par géothermie. Les ingénieurs en mécanique ont su convaincre le client d'adopter le système en soulignant qu'il est sensé permettre un apport d'air de meilleure qualité, maximiser le confort des usagers, offrir une meilleure efficacité énergétique (comparativement aux systèmes conventionnels par le plafond) et faciliter les réaménagements futurs. La validation de l'atteinte de ces quatre performances attendues est le principal objectif de cette étude.

Les résultats montrent qu'en général, le système adopté ne répond que partiellement aux attentes ciblées par le client-occupant. En termes de qualité de l'air, alors que les tests et les occupants révèlent qu'elle soit très bonne à la MDD, la stratification des contaminants attendue d'un tel système y est par ailleurs peu perceptible. De ce fait, les planchers surélevés ne contribuent pas à cette bonne qualité de l'air, celle-ci émanant plutôt d'un apport d'air neuf de l'extérieur de niveau élevé et d'une bonne filtration. Alors qu'il aurait été considéré comme étant bon dans le cas d'un bâtiment avec système mécanique plus conventionnel, le niveau de confort thermique à la MDD n'est pas optimal considérant le type de système adopté, lequel aurait normalement dû

mieux performer à cet effet. En effet, les occupants ne se prévalent pas suffisamment du contrôle qui leur est offert sur leur environnement grâce au système de diffuseurs d'air ajustables. Pour ce qui est de l'efficacité énergétique, les opérateurs de la MDD n'ont pas encore un moyen de mesurer les économies en énergie des planchers surélevés, donc cette étude ne peut quantitativement s'y prononcer. Deux hypothèses sont toutefois avancées : (1) les éventuelles économies en énergie que promet la ventilation par le plancher sont partiellement ou entièrement éclipsées par le système double gaine avec plenum pressurisé (qui est assez énergivore); et (2) le système passif de géothermie compense pour les dépenses énergétiques du système double gaine. En ce qui a trait à la facilité de réaménagements, le système de planchers surélevés facilite la reconfiguration des aires de bureaux et du câblage au sein d'un même espace locatif. Or le système rend plus difficiles les réaménagements qui exigent l'agrandissement ou la sous-division des espaces locatifs pourvus de cloisons dalle à dalle.

En résumé, le système adopté offre des avantages et des inconvénients. Il met en lumière la tension qui existe souvent entre plusieurs objectifs de durabilité. Par exemple, il est plus énergivore et exige une quantité supérieure de matériaux, augmentant l'énergie intrinsèque du bâtiment. Une autre stratégie mécanique aurait pu produire davantage d'économies en énergie, mais probablement au détriment du confort des occupants, notamment en termes de qualité de l'air.

2.1. Objectif de l'étude et procédure

À l'époque de la conception de la MDD, le système de plancher surélevé à ventilation intégrée était considéré comme novateur. Il s'agit d'un système constructif permettant (entre autres) une distribution d'air par le plancher via un plenum. Habituellement ce plenum, en amont duquel se trouve un appareil de traitement d'air centralisé, est alimenté par une gaine simple dans laquelle circule un air d'alimentation à une seule et même température. Il est considéré comme « écologique » et idéal pour maximiser le confort des usagers. Or il est aussi dispendieux en termes de coûts de construction. Lors de la conception du projet, les ingénieurs en mécanique ont convaincu le client-occupant d'adopter ce système en soulignant ses avantages. Premièrement, **il permet un apport d'air de meilleure qualité**, en partie car il facilite la stratification des contaminants, un phénomène qui permet l'élévation de ceux-ci hors de la zone occupée. Deuxièmement, **il maximise le confort des usagers** grâce à un meilleur contrôle individualisé du débit d'air par des diffuseurs manipulables situés au plancher. Troisièmement, **il offre une meilleure efficacité énergétique** que les systèmes conventionnels par le plafond grâce à une alimentation en air moins pré-climatisée et de motricité plus faible. Quatrièmement, **il est sensé faciliter les rénovations ou réaménagements intérieurs** (ce dernier critère a été identifié par le client-occupant rétroactivement, n'étant pas une préoccupation prioritaire lors de la conception) (Roy, 2018). Enfin, et ici non entendu à titre de critère de performance, mais plutôt comme valeur ajoutée, l'équipe de conception y voyait l'opportunité de renforcer les volets éducatif et démonstratif du projet. Ces quatre critères de performance¹³ proviennent du guide ASHRAE « *Underfloor Air Distribution (UFAD) Design Guide* » (Bauman & Dally, 2003). La validation de l'atteinte de ces quatre performances constitue l'objet de l'étude.

13. La littérature technique et scientifique cite souvent les compensations en coûts de construction possibles (avec des économies en systèmes CVCA et câblage) et le grand nombre de points LEED que permet ce système. À défaut de données nécessaires à ces titres, l'équipe de recherche n'a pas pu poursuivre l'évaluation de ces deux derniers indicateurs de performance.

Les étages 3 à 5 du bâtiment de la MDD ont été dotés de planchers surélevés. Or plutôt que de recourir à une alimentation en air à une même température à l'aide d'une seule gaine – plus commune et prétendue peu énergivore – les ingénieurs ont suggéré un système de ventilation double-gaine. Ce système, alimenté par géothermie, est doté d'une gaine d'air froid et d'une gaine d'air chaud qui se mitigent dans des boîtes de mélange distribuées en diverses zones. De cette manière, les occupants peuvent ajuster la température de certaines zones de façon indépendante. Le confort étant l'un des paramètres prioritaires pour le client-occupant, ce type de système a dès lors été privilégié. Cette étude vise à répondre à deux questions: Le système adopté répond-il aux attentes du client ? Et, quelles conclusions peuvent-elles être tirées de ce système pour les bâtiments écologiques ? L'équipe de recherche a eu recours à plusieurs moyens pour répondre à ces questions. Au préalable, les chercheurs ont réalisé une analyse de 19 manuscrits et d'articles sur les avantages et les inconvénients des planchers surélevés et de 12 documents de marketing de fournisseurs. Ils ont également consulté plus d'une vingtaine de documents de construction du projet.¹⁴ Par la suite, ils ont conduit 13 entrevues avec 2 architectes, 1 gestionnaire de projets, 2 ingénieurs en mécanique, 3 promoteurs et gestionnaires immobiliers, 1 expert en construction LEED, 1 spécialiste en rénovations de bureaux en aire ouverte, 1 gestionnaire de la MDD, 1 entrepreneur général, et le chargé de projet de la MDD, tous possédant une expertise en bâtiments commerciaux. L'équipe de recherche a également analysé les résultats d'une enquête réalisée auprès de tous les employés en avril 2018 sur le confort, le bien-être et la fonctionnalité des espaces de la MDD. Il a de plus analysé les résultats d'une récente étude (2018) sur la qualité de l'air et le confort thermique de la MDD. Enfin, des estimations préliminaires de l'impact environnemental des matériaux ont complété le registre des données recueillies et produites. (Prière de consulter le rapport synthèse pour plus de détails).

14. Documentation LEED, plans architecturaux et mécaniques du bâtiment, estimation des coûts, tests de qualité de l'air, etc

2.2. Les planchers surélevés à ventilation intégrée

Il existe quatre principaux types de systèmes de planchers surélevés :

1	Sans système de ventilation intégré	L'espace libre (minimal) entre la dalle structurale et le plancher surélevé n'est utilisé que pour passer du câblage.
2	Système à ventilation intégrée avec plenum pressurisé	En plus de pouvoir y passer du câblage, l'espace libre (de 12 à 18 pouces) entre la dalle et le plancher est utilisé comme plenum par lequel l'air est acheminé. L'air est pressurisé par un appareil de traitement d'air centralisé et le plenum est alimenté par une gaine simple à une seule température. Ce système est le plus commun au Québec. (Tardif, 2018)
3	Système avec plénum non-pressurisé	L'air du plenum est maintenu pratiquement à la même pression que l'espace qu'il dessert. De ce fait, les buses de ventilation sont souvent munies de ventilateurs qui poussent l'air vers le haut.
4	Système avec gaines	Certains systèmes (plus redondants) utilisent des gaines à l'intérieur de l'espace libre entre la dalle et le plancher.

Selon les plus importants fournisseurs, les trois derniers systèmes offrent les avantages suivants par rapport à un système conventionnel :

Meilleure qualité de l'air : Dans ces systèmes on obtient une plus grande stratification des contaminants. La compagnie Haworth précise que l'air avec les impuretés « s'élève naturellement pour être retiré de l'espace » de travail. En effet l'air chaud, plus léger que l'air froid, s'élève progressivement dans la pièce, transportant avec lui certains contaminants au-dessus de la zone occupée. Ainsi, l'air est supposé être de meilleure qualité que celui fourni par un système conventionnel par le plafond qui mélange air neuf et air vicié de façon uniforme.

Meilleur confort thermique : L'approvisionnement en air neuf par le bas permet un meilleur confort grâce à l'ajustement possible du débit d'air projeté par des buses situées au plancher et en proximité des usagers. Plus particulier à la MDD, le système double gaine dont elle est pourvue permet également aux usagers d'ajuster la température pour un confort optimum.

Possibles économies en énergie : Des économies en énergie sont obtenues pour trois raisons. Premièrement, grâce à une moindre activité des ventilateurs. Selon Tate et Kingspan, ces systèmes sont plus efficaces « grâce à de plus grandes économies en fonctionnement, et moins d'énergie pour les ventilateurs. » (Tate Access FloorsInc., 2009, p. 6). Le fournisseur Haworth Haworth explique : « Les ventilateurs utilisent de 10 à 20% moins d'énergie en travaillant avec le flux naturel de l'air ». Les forces motrices des équipements de ventilation peuvent parfois être réduites jusqu'à 25 % (Webster et al., 2002). Deuxièmement, la température d'alimentation de la pièce peut être plus élevée que dans le cas d'un système d'alimentation par le plafond en saison de refroidissement (Fisk et al., 2004).¹⁵ Ceci se traduit par moins de refroidissement de l'air (Tardif, 2018). Troisièmement, le système peut (dans certains cas et certaines conditions) utiliser l'air neuf de l'extérieur durant une plus grande période de l'année. Par exemple, un bâtiment à San Francisco doté de planchers

15. Celle-ci peut être supérieure à 1°C au lieu de la plage habituelle de 13 à 1°C (Fisk et al., 2004). À la MDD, la température d'alimentation est en moyenne 2°C.

surélevés aura 2200 heures supplémentaires de refroidissement gratuites par année comparativement à un système de distribution d’air conventionnel¹⁶ (Bauman & Dally, 2003; Lehrer & Bauman, 2003). Selon Pearl (2018), un architecte montréalais de grande expertise en conception écologique, les bâtiments dotés de planchers surélevés où sont prévues plusieurs zones thermiques (par exemple le périmètre et le centre du bâtiment) et des cheminées solaires, performeront souvent mieux sur le plan énergétique que les bâtiments sans cheminées solaires.¹⁷

Facilitation des rénovations et réaménagements intérieurs : Selon la compagnie américaine Tate, le système « s’adapte facilement et à faible coût aux changements technologiques et organisationnels durant tout le cycle de vie du bâtiment» (Tate Access Flooring Inc., 2009, p. 6). Tate évoque que la flexibilité et la rapidité d’adaptation que le système permet offre des économies de l’ordre de 50% en coûts de réaménagements intérieurs (ibid, page 16).

Particularités du système adopté à la MDD

Plutôt que de type plus commun à simple gaine, le système mécanique de la MDD est de type double gaine : l’alimentation en air du plenum s’y fait à l’aide de deux conduits situés sous les dalles et au périmètre des aires de bureaux (voir les figures 2.6 et 2.9). Dans l’un d’eux circule en tout temps de l’air chaud et dans l’autre de l’air froid, qui se mitigent en passant par des boites de mélange avant d’alimenter les plénums des pièces. D’après M. Tardif, chercheur-ingénieur pour CanmetÉNERGIE / Ressources Naturelles Canada, il s’agit d’un système plus dispendieux et moins efficace sur le plan énergétique que celui à simple gaine où circule un air pré-mélangé d’une seule température d’alimentation. La raison de cette moindre efficacité est le maintien en toutes saisons à la fois d’air froid et d’air chaud en parallèle pour obtenir une température optimale, résultant en un dédoublement des besoins énergétiques. Alors que le système à double gaine est plus énergivore, il procure en contrepartie un niveau de confort aux usagers plus élevé que celui à simple gaine, notamment grâce au fait que contrairement à ce dernier, la température puisse y être ajustée. Le confort et le bien-être des usagers étaient les paramètres prioritaires de conception. C’est la raison pour laquelle ce système a été adopté.

Le bâtiment est de plus doté d’un système de chauffage et de refroidissement par géothermie. À cet effet, 28 puits géothermiques de 500 pieds (152 m) de profond ont été creusés sous le bâtiment. Ces derniers alimentent en air chaud et froid les gaines en amont des plenums¹⁸ (Voir figure 2.5). En hiver (saison de chauffage), l’air chaud issu des puits¹⁹ est dirigé vers le conduit d’air chaud (muni d’un serpentin de chauffage) et est ensuite acheminé dans les plénums d’alimentation du plancher surélevé. Durant l’été (saison de refroidissement), le système y fonctionne de la même manière, mais en captant du sol l’air froid destiné à alimenter le conduit d’air froid, celui-ci muni d’un serpentin de refroidissement. La climatisation est de plus assurée par des pompes géothermiques utilisant un réfrigérant. Or, le système de la MDD fonctionne presque toujours en mode de refroidissement/climatisation²⁰ de telle sorte qu’il doit renvoyer au sol la chaleur générée dans ce cas à travers

les puits de géothermie. La chaleur supplémentaire générée par le processus de refroidissement est par la suite captée et récupérée pour chauffer la gaine d’air chaud. Il s’agit ainsi d’un système en grande partie passif.

L’air du système provient de plusieurs sources : l’air neuf de l’extérieur, l’air vicié des espaces de bureaux et de l’atrium naturellement traité par le mur végétal, et l’air de retour des étages 2 à 5. L’air neuf provenant de l’extérieur est d’abord traité par un système d’air extérieur dédié (SAED). L’air de retour (vicié) des bureaux est ensuite acheminé dans les corridors ouverts qui font face à l’atrium et au mur végétal. Le mur végétal filtre et prétraite naturellement cet air avant qu’il ne soit réintroduit dans le système CVCA et envoyé à la salle mécanique du 5^e étage. L’air vicié ne pouvant être recyclé (par ex. provenant des toilettes) est évacué après en avoir récupéré la chaleur durant l’hiver et le froid durant l’été. L’acheminement de l’air aux aires de bureaux se fait à l’aide de buses de ventilation ou diffuseurs *swirl* au plancher, situés à proximité de la plupart des postes de travail. Ces diffuseurs peuvent être manipulés par les usagers pour moduler le débit d’air. Finalement, l’air vicié quitte les espaces par des grilles de retour situées au plafond (voir fig 2.6).

2.3. Résultats de l’étude

Performance attendue No. 1 : Meilleure qualité de l’air

En 2018, le client-occupant a commandé des tests de qualité de l’air à EnviroParfait²¹ en vue de mesurer l’impact du mur végétal sur la qualité de l’air du bâtiment. Même si la présente étude ne traite pas du mur végétal, les résultats pour les espaces de bureaux sont ici pertinents. Les paramètres ayant été étudiés sont : la température, l’humidité, le nombre de spores par mètre carré, la concentration de CO² et de CO, la concentration moyenne de particules en suspension dans l’air et les composants organiques volatiles (Global EcoVillage Network) totaux. Les résultats révélaient une bonne qualité de l’air à la MDD. La majorité des espaces mesurés maintenaient des températures conformes au standard d’ASHRAE 55-2004. Les niveaux d’humidité variaient entre 41 à 65 %, étant donc généralement conformes aux normes ASHRAE et de Santé Canada. Or, les niveaux d’humidité relative sont excessifs en été dans diverses zones du bâtiment lorsque le système de ventilation du mur végétal est en marche. Les niveaux de CO² pour tous les espaces étaient conformes à la norme 62.1-2010 d’ASHRAE. De plus, le CO était très en-deçà des seuils maximaux établis par la même norme (0 à 3 ppm comparé à 9 ppm max. pour ASHRAE). Les niveaux de PTS²² atteignaient un maximum de 40 µg/m³, soit en-deçà du seuil critique de Santé Canada. Quant aux COVT, les lectures pour les niveaux dans l’air étaient faibles et inférieures à 0,23 ppm dans les bureaux d’Équiterre (0,23 ppm étant le seuil de détection pour la méthode utilisée et l’échantillon récolté), alors que Santé Canada recommande une limite de 0,5 ppm. Les résultats de ces tests sont résumés au tableau 4.

16. Toutefois, il est aussi important de considérer les niveaux d’humidité d’un climat en particulier, car même si la température est idéale pour fournir de l’air neuf extérieur gratuit, il est possible que cet air soit trop humide et devra alors être déshumidifié.
17. Voir, par exemple, le bâtiment Place Manitoba Hydro à Winnipeg. Ce bâtiment utilise une combinaison stratégique de cheminée solaire et planchers surélevés.
18. À noter que le périmètre du bâtiment aux besoins plus élevés en chauffage durant l’hiver, est alimenté par un conduit d’air chaud dédié et non via un plenum. Le système géothermique alimente également ce conduit.
19. Une thermopompe au rez-de-chaussée prend le glycol chaud du système de géothermie et l’envoie au 5^e étage à un échangeur qui transfère la chaleur du liquide en air.
20. L’équipe de recherche et le client-occupant estiment que le mode chauffage est bloqué entre fin mai et début octobre. De plus, le bâtiment de la MDD a été en mode climatisation pendant 30 jours en hiver 2017-2018.

21. Voir : Thorpe, Roderick. (2018). Rapport présenté à Equiterre concernant l’évaluation de la qualité de l’air à la Maison du développement durable (pp. 23). Montréal, QC: EnviroParfait.
22. Ces particules incluent, par exemple, des poussières, les vapeurs, la fumée et les organismes comme les virus, les bactéries, les grains de pollen et les spores de champignons

TABEAU 4
Résumé des résultats du test de qualité de l’air mesurés par EnviroParfait en 2018.

Mesure	Normes de l’industrie	Données recueillies	Bureaux testés	Qualité des résultats
Température	20 à 24 degrés C en hiver 22 à 26 degrés C en été (ASHRAE 55-2004 (1))	Pour la plupart, en conformité aux normes d’ASHRAE	Equiterre	Acceptable*
			EnJEU	Bon
			Fondation David Suzuki	Bon
Humidité	30 à 60% (ASHRAE 55-2004 et Santé Canada)	41 – 65 %	Equiterre	Acceptable**
			EnJEU	Élevé, pas acceptable
			Fondation David Suzuki	Acceptable
# de spores par m³	N/A	200 dans les bureaux d’Equiterre (100% Aspergillus-Penicillium)	Equiterre	Acceptable
			EnJEU	N/A
				N/A
Concentration CO ²	Les niveaux habituels dans les bureaux = 600 à 800 ppm Seuil de risque sanitaire = 5 000 ppm	< 850 ppm	Equiterre	Bon
			EnJEU	Bon
			Fondation David Suzuki	Bon
Concentration CO	< 9 ppm (ASHRAE)	0 à 3 ppm	Equiterre	Bon
			EnJEU	Bon
			Fondation David Suzuki	Bon
Concentration moyenne de PTS	< 50 µg/m³ (AHRAE 62-1999)	10 µg/m³ (Equiterre)	Equiterre	Bon
		12 µg/m³ (EnJEU)	EnJEU	Bon
	< 75 µg/m³ (Santé Canada)	16 µg/m³ (Fondation David Suzuki)		
		40 µg/m³ (couloir au 4 ^e étage)	Fondation David Suzuki	Bon
COV totaux	< 0,5 ppm (Santé Canada)	< 0,23 ppm***	Equiterre	N/A
			EnJEU	N/A
			Fondation David Suzuki	N/A

* La température était élevée durant une période d’une heure
** L’humidité relative après le mur végétal n’est pas bonne
*** Les quantités mesurées étaient en toutes probabilités inférieures à la limite de détection. Elles pourraient néanmoins être meilleures ou même beaucoup meilleures que les normes de l’industrie ; cependant, il n’a pas été possible de conclure concrètement à ce sujet.

Pour que le système de planchers surélevés contribue à la qualité de l’air, deux paramètres sont requis : (a) que le plenum soit bien scellé et étanche à l’air ; et (b) qu’un phénomène de stratification de l’air (ie : stratification de températures et des contaminants) se produise.

L’étanchéité du plenum est nécessaire afin de prévenir l’exfiltration de l’air et ainsi s’assurer d’un approvisionnement en air à la bonne quantité et aux conditions de température et d’humidité requises. En effet, les fuites compromettent la performance du système (Daly, 2002) et augmentent la consommation d’énergie (Bauman & Dally, 2003). À la MDD, le devis des architectes spécifiait une fuite d’air maximale de 0,5 L/sec*m² (AIR-INS, 2011). En mars 2011, le laboratoire AIR-INS a été mandaté pour conduire des tests sur l’étanchéité à l’air des plenums²³ afin de vérifier si elle était conforme aux exigences du devis. Les tests ayant échoué à quelques endroits, AIR-INS a donc proposé des mesures correctives qui ont été apportées et suite auxquelles de nouveaux tests ont conclu à une étanchéité conforme au devis²⁴. Il y a donc raison de croire que l’étanchéité des plenums est aujourd’hui maintenue.

La stratification de l’air est un phénomène de distribution non uniforme d’air dans l’espace, aux conditions de température et de contaminants graduées. L’air chaud plus léger que l’air froid s’élève de façon naturelle en transportant avec lui nombre de contaminants vers le haut. Il s’agit de la stratification des contaminants, et elle celle-ci dépend donc de la stratification thermique. C’est cette stratification des contaminants qui contribue à un air de meilleure qualité. Un paradoxe intéressant à noter ici est que la stratification thermique n’offre pas un bon niveau de confort et n’est et donc pas souhaitable, alors que la stratification des contaminants est quant à elle souhaitable. Selon les normes, il devrait y avoir un écart maximal de température de l’ordre de 3°C entre les niveaux du talon et de la tête et de 5°C entre le plancher et le plafond.

23. Voir intitulé « AS-00451-A Essais préliminaires » par AIR-INS en mars 2011.
24. Voir intitulé « Essais de performance en chantier sur un plancher surélevé servant de conduit d’alimentation pour le projet de la Maison du développement durable » par AIR-INS en mai 2011.

À noter que seule la stratification naturelle et passive de l’air n’est pas suffisante pour faire monter l’air chaud. Celle-ci doit être soutenue par un autre « agent » facilitateur, soit ce que l’on appelle les « panaches thermiques » que sont les occupants et les équipements producteurs de chaleur. Ceux-ci doivent en théorie transporter par flottabilité naturelle de l’air chaud un grand nombre de contaminants hors de la zone occupée d’une pièce et aider à produire un gradient de température vertical (Bauman & Dally, 2003; Tardif, 2018). Ils sont ainsi une composante essentielle au bon fonctionnement du système.

Les résultats d’une étude sur la qualité de l’air de la MDD par Ouazia and Booth (2014) intitulée « *Performance assessment of stratified ventilation system in Équiterre building*»²⁵ révèle en premier lieu qu’au moment des essais, la stratification de l’air à la MDD était négligeable. Les différences de température entre le plancher et les retours d’air au plafond ne dépassaient pas 1 °C alors qu’ils auraient dû normalement atteindre entre 3 et 5 degrés.

Les auteurs identifient deux indicateurs permettant d’évaluer la performance de la stratification de l’air (mesure pour évaluer si les planchers surélevés accroissent la qualité de l’air) : **la concentration de contaminants** et **l’efficacité de l’élimination de ces contaminants**. Concernant **la concentration de contaminants**, l’étude conclut « qu’il n’y avait aucune différence entre les concentrations de contaminants (et de CO²) entre l’air d’alimentation, la zone occupée et l’air de retour (relevés à 1.1, 1.7 et 2.2 m), ce qui impliquait l’absence de stratification » (page 28). Ces résultats signifient une ventilation plutôt mixte (Ouazia & Booth, 2014). De ce fait, la stratification des contaminants à la MDD est inopérante. **L’efficacité d’élimination des contaminants (EEC)** correspond à la vitesse à laquelle un contaminant en suspension dans l’air est éliminé d’une pièce. Cette efficacité se mesure à l’aide d’un ratio équivalent à la différence de concentration de contaminants (dont le CO²) entre le retour et l’alimentation. Dans le cas d’un système de ventilation par déplacement vertical de l’air comme celui issu d’un système de planchers surélevés à

25. Préparée pour le Conseil national de recherches Canada (CNRC)

ventilation intégrée, l’EEC devrait être supérieur à 1.0. À la MDD, il est égal à 1.0. Le système est donc déficient en matière d’élimination des contaminants.

Il est toutefois important de noter que malgré le manque de stratification des contaminants observé, les niveaux de CO² relevés par l’étude de Ouazia et Booth sont acceptables. Comme souligné précédemment, en raison de ces taux de CO² satisfaisants en plus d’autres paramètres favorables relevés par la récente étude sur la qualité de l’air de la MDD (Thorpe, 2018), l’air se révèle y être de bonne qualité. Or les résultats de cette analyse suggèrent que cette qualité de l’air adéquate ne résulte pas de la bonne performance du système en matière de stratification.

Pourquoi cette stratification et efficacité d’élimination des contaminants sont-elles déficientes? Selon M. Tardif, chercheur-ingénieur pour Canmet ÉNERGIE, dans le cas de la MDD, « le nombre de personnes dans les espaces de bureaux était très variable [...] de peu occupé à très peu occupé ». Selon lui, pour que le système soit plus performant, il s’agirait « d’avoir des pièces relativement occupées de façon continue. Plus la densité de vie est continue, mieux c’est pour les systèmes de ventilation par déplacement ». Ces propos signifient que dans les aires de bureaux du bâtiment de la MDD, il n’y a pas assez de « panaches thermiques » ou sources de chaleur (employés, équipements, appareils d’éclairage, ordinateurs, etc.) pour aider l’air chaud à s’élever et à se stratifier. Ce serait la raison pour laquelle la stratification de l’air au sens large est déficiente, conduisant à une inefficacité d’évacuation des contaminants, d’où leurs concentrations uniformes.

TABLEAU 5

Tableau récapitulatif des résultats sur la qualité de l’air.

Indicateur de performance	Résultats attendus	Résultats observés
Concentration CO ²	Stratification des contaminants et du CO ² . La norme ASHRAE 62.1–2010 fixe la limite de concentration intérieure de CO ² à la concentration extérieure plus 700 ppm.	Les niveaux de CO ² mesurés sont acceptables. Aucune stratification significative des contaminants dans l’élévation graduelle du volume.
Efficacité d’élimination des contaminants (EEC)	L’EEC devrait être supérieur à 1.0.	Égal à 1.0 : À défaut de stratification thermique et de stratification des contaminants, l’élimination des contaminants est peu efficace.

Ces résultats suggèrent que la bonne qualité de l’air à la MDD ne résulte pas de la performance du système de planchers surélevés à ventilation intégrée. La qualité de l’air est supérieure à la MDD plutôt grâce à la grande quantité d’air neuf extérieur introduit dans le système de ventilation. La deuxième étude post-occupation de la MDD explique : « En mode occupé, la MDD distribue à ses occupants un minimum de 3500 litres d’air neuf extérieur par seconde, une quantité que la norme ASHRAE 62.1 – 2004, en vigueur lors de la conception du bâtiment, désigne comme l’alimentation requise pour 412 personnes » (page 17). Cette population est nettement supérieure à sa fréquentation moyenne quotidienne de 353 personnes. De ce fait, l’air fourni aux usagers de la MDD est de qualité « exemplaire » (Equiterre, 2018, p. 17). D’autres facteurs contribuent aussi à une bonne qualité de l’air telle que l’efficacité de la filtration de l’air.

En réalité la bonne qualité de l’air à la MDD est la résultante de hauts standards au niveau de la mécanique générale du bâtiment et non du système de planchers surélevés à ventilation intégrée. Ce système ne saurait être performant ni par sa seule nature endogène, ni par sa parfaite maîtrise technique (installation adéquate, étanchéité du plenum etc.). À titre de système complexe, **sa performance optimale est aussi tributaire de facteurs d’influence exogènes, assez aléatoires et pouvant se moduler dans le temps (densité d’occupation, quantité d’équipements, etc.)**. Les fournisseurs de tels systèmes occultent peut-être ce fait non négligeable dans leurs documents promotionnels et techniques et mériteraient à le mentionner pour que les choix des concepteurs de bâtiments soient mieux éclairés.

Performance No. 2 : Meilleur confort thermique

Dans le cas de la MDD, en plus de pouvoir ajuster le débit d’air, les occupants peuvent également ajuster la température, ce qui n’est pas possible dans la majorité des systèmes à simple gaine d’une seule température d’alimentation. Selon Tardif, ce système est le plus confortable. Il précise : « Si vous voulez la température X dans un espace X, vous allez être capables de l’atteindre ».

Il est important de souligner que le confort thermique est une expérience individuelle et non collective (Cole et al., 2010, p. 344; Davidson et al., 1984). Par exemple, plusieurs études signalent que les femmes sont plus frileuses que les hommes. Comme le confort thermique est un concept de nature subjective, une façon de le mesurer est de sonder les usagers. De ce fait, la présente section se base sur les résultats d’un sondage sur le confort, le bien-être et la fonctionnalité des espaces de la MDD réalisé en avril 2018 auprès de ses occupants en plus d’un autre datant de 2012. L’indicateur de performance retenu est leur **pourcentage de satisfaction en matière de confort**. S’y ajoutent deux indicateurs d’inconfort provenant de l’étude de Ouazia et Booth

(2014) précédemment citée, soit la **différence de température verticale de l’air (DTVA) et la vitesse de l’air**. En effet, dans cette étude les auteurs avaient émis l’hypothèse que le système de planchers surélevés à ventilation intégrée pouvait causer de l’inconfort. Il s’agit en effet d’un système qui fournit de l’air à une température inférieure à celle ambiante et directement dans la zone occupée. La stratification de la température et la vitesse de l’air qui en résultent pourraient y générer des températures plus fraîches et des courants d’air. Les auteurs ont donc cherché à évaluer l’inconfort éventuel émanant de ces deux paramètres.

La différence de température verticale de l’air (DTVA) est un phénomène issu de la stratification de la température nécessaire à celle des contaminants. Elle affecte défavorablement le confort thermique, mais favorablement l’élimination des contaminants, contribuant davantage à la qualité de l’air qu’au confort des occupants. Ouazia et Booth ont trouvé que les DTVA mesurées à la MDD étaient inférieures à 1,0 °C entre le plancher et le plafond durant la saison de chauffage, et inférieures à 0,2°C durant celle de refroidissement²⁶, ce qui signifie une très faible stratification de l’air et DTVA. Ces résultats indiquent des températures uniformes et donc que l’air froid n’a pas tendance à demeurer dans la zone occupée. La DTVA ici négligeable favorise le confort thermique.

La vitesse de l’air projeté par les diffuseurs au plancher pourrait elle aussi contribuer à l’inconfort des occupants, ce que Ouazia et Booth ont tenté d’évaluer. Pour ce faire, ils ont mesuré la vitesse de l’air à différentes hauteurs dans les espaces de bureaux. En général, celle-ci était inférieure à la limite de 0,15 m/s fixée dans leur étude et par les normes ASHRAE. Par ailleurs, la vitesse de l’air mesurée durant la saison de refroidissement dépassait cette limite. De ce fait, les résultats démontrent une vitesse de l’air satisfaisante qui ne devrait en général pas causer d’inconfort auprès des occupants assis, sauf en été.

26. Rappelons que les normes recommandent une DTVA maximale de 3,0 °C entre le niveau du talon et celui de la tête et de 5 °C entre le plancher et le plafond.

Satisfaction des occupants : Selon la mesure largement admise qu'en donnent ASHRAE et d'autres organismes professionnels, un niveau de confort thermique optimal est atteint lorsqu'au minimum 80 % des occupants s'en disent satisfaits et donc qu'au maximum 20 % en sont insatisfaits. Dans l'étude de Ouazia et Booth, c'est le pourcentage d'insatisfaction (PI) qui a été utilisé pour l'évaluer, ce en fonction de facteurs environnementaux thermiques (vitesse de l'air, humidité relative et température) et de facteurs personnels (niveau d'activité et vêtements). L'indice PI a été calculé à différentes hauteurs lors des saisons hivernale et estivale et les auteurs ont noté un environnement confortable durant la saison de chauffage et inconfortable durant celle de refroidissement.

L'étude de 2012 (Mercier, 2012)²⁷ a pour sa part révélé que les occupants situés dans les aires ouvertes disaient se sentir *confortables* le matin tout en souhaitant plus de mouvement d'air. En après-midi, ils trouvaient l'espace un peu froid, souhaitant augmenter la température sans toutefois modifier le mouvement d'air. En termes saisonniers, l'étude indique que les occupants étaient légèrement inconfortables tant en été qu'en hiver, du fait d'avoir plus chaud en hiver et plus froid en été. Les répondants ont de plus noté des différences de température journalière importantes tout en jugeant les taux d'humidité et le mouvement d'air acceptables, tant en été qu'en hiver.

Les résultats du sondage sur le confort, le bien-être et la fonctionnalité des espaces de la MDD, réalisés en avril 2018 auprès de ses occupants démontrent qu'ils sont en général assez satisfaits (mais pas entièrement) de leur confort thermique. En effet, 57 % des occupants en sont *satisfaits* (donc soit *très satisfaits*, soit *satisfaits*), 24 % en sont *moyennement satisfaits*, et 19 % en sont *insatisfaits* (soit *insatisfaits*, soit *très insatisfaits*). Ces résultats confirment que la satisfaction des occupants se trouve proche de celle du standard d'ASHRAE si l'on considère que moins de 20 % d'usagers sont *insatisfaits*. Ils pourraient être considérés comme bons dans un bâtiment avec un système mécanique plus conventionnel. Or, il

27. Réalisée par un étudiant de l'Université Laval.

ne faut pas négliger le fait qu'ici plus de 40 % des occupants sont *moyennement satisfaits* ou *carrément insatisfaits*. À la lumière du système choisi, censé maximiser le confort des usagers, ces résultats ne sont pas optimaux.

Paradoxalement, alors que 76 % des répondants savent qu'ils peuvent manipuler les diffuseurs au plancher pour ajuster la température et le débit d'air dans leur espace de travail, ce ces répondants, 30 % ne les manipulent jamais, 37 % le font une à deux fois par année et 17 % environ une fois par mois. Ces résultats révèlent que les employés n'exploitent pas à son plein potentiel le contrôle sur l'environnement de travail qui leur est permis par la configuration du système mécanique privilégié au bâtiment de la MDD²⁸, ce qui pourrait en partie expliquer le fait que le niveau de confort n'y soit pas à un niveau plus élevé.

Ces résultats assez mitigés conduisent à la conclusion que le système de planchers surélevés à ventilation intégrée n'accroît le confort des usagers que partiellement. En effet ce niveau de confort à la MDD n'est pas optimal considérant le type de système adopté, lequel aurait normalement dû grandement contribuer à un meilleur confort. En tant que système complexe, sa performance optimale est tributaire de facteurs d'influence exogènes, dont possiblement le comportement des occupants à ce titre. De plus amples informations au sujet du confort thermique sont disponibles dans le volet 4 de cette étude post-occupation.

Performance No. 3 : Possibles économies en énergie

Selon Zhao et al. (2014), le système CVCA représente 30 à 50 % de la consommation énergétique d'un bâtiment conventionnel. Il est donc primordial que les concepteurs de bâtiments écologiques tentent de trouver des systèmes plus efficaces et moins énergivores. Évaluer la performance du système de planchers surélevés à ventilation intégrée en termes

28. Par ailleurs, il faut noter qu'un ingénieur en mécanique interviewé souligne qu'il ne soit pas souhaitable que tous les employés manipulent les diffuseurs de plancher, la fermeture des uns accroissant le débit d'air des autres.

d'économies d'énergie est une opération nécessitant en premier lieu des données quantitatives relatives aux économies effectives précisément liées au système en question. Or, alors que le bénéfice des économies en énergie est souvent cité dans la littérature, il est par contre « difficile à prouver quantitativement en raison de l'absence d'un outil de modélisation énergétique qui aborde correctement tous les problèmes liés à l'utilisation de l'énergie avec des systèmes sous plancher permettant une comparaison directe de deux systèmes simulés » (Bauman & Dally, 2003).

Pour obtenir la certification LEED en 2011, les ingénieurs en mécanique ont procédé à une simulation énergétique pour le système de ventilation du bâtiment à l'aide du logiciel EE4 (Equiterre et al.). Ils y ont relevé que le bâtiment de référence consommait 658,882 MJ d'énergie alors que la MDD (simulée)²⁹ ne consommait que 286,764 MJ. Ils ont par ailleurs rencontré des problèmes avec la simulation d'économies énergétiques en lien direct avec les planchers surélevés. Dans leur rapport, les ingénieurs expliquent : « EE4 ne présente aucune manière de modéliser cette alimentation qui se trouve à produire une économie d'énergie pour la climatisation ... Dans ce cas, les économies seront plutôt sur la force motrice des ventilateurs que sur le refroidissement, mais c'est la meilleure approximation possible étant donné les contraintes de EE4 » (ibid). Alors qu'il avait été estimé que le système de planchers surélevés à ventilation intégrée allait engendrer des économies en énergie de l'ordre de 15 % (La Maison du développement durable), il n'a pas été possible de le valider lors de cette simulation à cause des limites du logiciel de modélisation de l'époque.

Après la construction du bâtiment, le client-occupant a souhaité mesurer les économies en énergie avec des données réelles (Roy, 2018). Les ingénieurs concepteurs sollicités pour cette commande ont dû décliner l'offre, faute d'une technologie disponible pour le faire. Le client-occupant s'est ensuite tourné

29. Pour cette simulation, le système de ventilation était composé : du système d'air neuf, du système de conditionnement d'air des étages 2 à 5 et du système de conditionnement d'air du rez-de-chaussée, ainsi que de neuf sous-stratégies mécaniques, incluant la géothermie, le mur végétal, et les planchers surélevés.

vers Ressources Naturelles Canada et le Conseil national de recherches Canada, sans plus de succès. Ces laboratoires ont signifié qu'à défaut d'un bâtiment de référence, les calculs resteraient très théoriques et peu fiables.

Ainsi, à défaut d'outil de modélisation et de bâtiment de référence requis pour générer les données quantitatives permettant le calcul des économies en énergie du système, la performance à cet effet ne peut donc être évaluée. En l'absence de telles données, une réflexion pertinente issue de certains arguments soulevés mérite toutefois d'être discutée. Selon Tardif, il y a raison de croire que les économies énergétiques permises en théorie par le système à simple gaine soient partiellement – si ce n'est pas totalement – éclipsées par l'énergie consommée par celui à double gaine. En effet, certains ingénieurs en mécanique considèrent que la pressurisation des plenums et le fonctionnement continu des boîtes de mélange consomment une énergie non négligeable. Il s'agit d'une hypothèse que ne partage pas entièrement M. Roy, directeur de la MDD, car le système mécanique y fonctionne grâce à la géothermie. Dans ce cas, l'énergie requise par le système de ventilation double-gaine est puisée à même le sol. À la MDD, le système de ventilation fonctionne presque toujours en mode de refroidissement/climatisation. De ce fait, la chaleur générée par ce processus est en partie renvoyée au sol et en partie captée et récupérée pour desservir la gaine d'air chaud. Comme il s'agit d'un système mécanique passif et qui recycle ses extrants, d'après M. Roy l'énergie dédiée au système double gaine ne coûterait ainsi pratiquement rien. L'économie en énergie permise par la géothermie compenserait donc pour la surconsommation énergétique du système double gaine.

Il y a toutefois lieu de noter que la chaleur renvoyée au sol pourrait conduire à un réchauffement de celui-ci de quelques degrés, ceci pouvant affecter l'efficacité du système à long terme (Pearl, 2018). De plus, bien qu'il soit passif, le système de géothermie requiert quand même de l'électricité pour fonctionner, et les pompes doivent être remplacées à chaque 15 ou 20 ans. Ainsi, il ne s'agit pas d'un système auto-suffisant et infini.

Il y a par ailleurs lieu de souligner que le système de ventilation de la MDD dispose d'une certaine marge de flexibilité thermique qui pourrait lui permettre de devenir plus performant. En effet, Ouazia et Booth (2014) avaient remarqué qu'en augmentant légèrement la température de l'air en été, ils n'avaient pas observé de variation sur le confort thermique des occupants. Le client-occupant et les gestionnaires du bâtiment auraient donc une certaine latitude pour ajuster la température d'alimentation de l'air en vue d'accroître l'efficacité énergétique du système, ce sans causer d'inconfort aux occupants.

En conclusion, il n'a pas été possible de mesurer les éventuelles économies en énergie du système de planchers surélevés à ventilation intégrée de la MDD, unique indicateur de sa performance à ce titre. Il n'est donc pas possible de conclure si le système répond aux attentes du client-occupant en matière d'économies d'énergie. À défaut de résultats en ce sens, les chercheurs de la présente étude ont toutefois jugé pertinent de partager l'expérience de la MDD à ce sujet avec les acteurs de l'industrie. Le cas témoigne en premier lieu d'un assemblage inédit en matière de mécanique du bâtiment : un système fonctionnant par géothermie, écologique et peu énergivore, doublé d'un système de planchers surélevés à ventilation intégrée à double gaine, énergivore. Il s'agit d'une figure d'exception qui présente une réelle problématique à examiner en matière d'économies d'énergie, soit un cas intéressant et fort pertinent pour l'industrie. En second lieu, les efforts déployés pour mesurer ces économies en énergie (si existantes) témoignent des défis rencontrés, lesquels se posent toujours aujourd'hui. L'on peut conclure que la technologie n'est pas encore au rendez-vous pour y parvenir, un enjeu qui mérite l'attention en vue de son développement souhaitable.

Performance No. 4 : Facilitation des réaménagements intérieurs

L'une des grandes performances attendues du système est la facilité de réaménagements intérieurs. Or peu d'études scientifiques ont validé cet avantage. Lors de la conception du bâtiment de la MDD, ce critère n'était pas un facteur prioritaire, le client-occupant étant

davantage intéressé par le confort et les économies en énergie. Cette préoccupation s'est manifestée a posteriori lorsque le bâtiment de la MDD a subi quelques réaménagements intérieurs dont certains ont exigé des déplacements de cloisons dalle à dalle.

Cette étude soulève que la facilité des réaménagements permise par le système n'est pas universelle, dépendant plutôt de leur type et de leurs caractéristiques. Alors qu'il facilite effectivement les *réaménagements mineurs ou les reconfigurations*³⁰, le système pose des difficultés lors de rénovations majeures (*agrandissements* et *sous-divisions d'espaces locatifs*) qui nécessitent des interventions aux cloisons dalle à dalle.

En ce qui concerne **les réaménagements mineurs ou les reconfigurations**, un employé en technologie de l'information (T.I.) à la MDD confirme que les planchers surélevés sont beaucoup plus pratiques que les systèmes constructifs conventionnels. Comme les tuiles de plancher sont modulaires, elles peuvent être facilement déplacées sans entièrement refaire la câblage (Schieber, 2018). Dans plusieurs systèmes conventionnels, le câblage se trouve dans l'entre-plafond et passe dans les cloisons en gypse où se trouvent de nombreux conduits souples et rigides de toutes natures. Il faut perforer les cloisons pour installer de nouvelles prises murales. Dans le cas d'un plancher surélevé, « il y a littéralement deux ou trois monuments qu'il faut changer et on tire le câble jusqu'à la zone où il doit être installé » (ibid). Par ces faits, ces rénovations peuvent être moins dispendieuses en termes de câblage. Au-delà de celui-ci, tous les avantages du système de planchers surélevés cités par les fournisseurs s'appliquent lorsqu'il s'agit de réaménagements internes de suites locatives en aire ouverte. En effet, pour exploiter au maximum le potentiel du système, de grandes surfaces ininterrompues (aires ouvertes) sont nécessaires.

Dans le cas de réaménagements intérieurs de plus grande envergure, les professionnels interviewés sont moins convaincus de la performance du système.

30. Voir le volet 1 sur l'adaptabilité des espaces de la MDD pour les définitions de ces catégories de réaménagements.

L'entrepreneur général responsable des quatre réaménagements internes de la MDD considère que le système ne facilite pas ce type de réaménagement. Le plus important problème sont les cloisons dalle à dalle. En effet, pour construire une nouvelle cloison mitoyenne qui descend jusqu'à la dalle, les planchers doivent être démontés et il faut scier les tuiles, très lourdes, avec une lame au diamant. Toutes ces tuiles doivent être transportées à l'extérieur pour être coupées afin d'éviter de faire de la poussière, soit l'une des exigences environnementales du client-occupant. De plus, il arrive parfois que la démolition de cloisons (dalle à dalle) au pourtour de suites locatives révèle que les planchers de part et d'autre de celles-ci ne soient pas au même niveau. Des interventions sont dès lors requises pour les mettre à niveau. Autrement, certains cas n'impliquant pas de cloisons dalle à dalle présentent aussi des complications. On trouve tantôt des tuiles de planchers emprisonnées sous des cloisons fixes (non dalle à dalle), leurs vis de fixation n'étant plus accessibles ; tantôt, les câbles sous le plancher ne sont pas suffisamment longs pour pouvoir déplacer ceux-ci et les tuiles avec monuments où l'on veut (Chartier, 2018). Enfin, Pearl (2018) soutient que pour exploiter au maximum le potentiel des planchers surélevés en matière de rénovations, il faut privilégier des systèmes flexibles tels que des cloisons démontables. Dans le cas de cloisons conventionnelles en gypse, le système de planchers surélevés n'est pas plus avantageux que d'autres en matière de réaménagements intérieurs.

En conclusion, les planchers surélevés peuvent faciliter ou complexifier les réaménagements intérieurs selon le type d'intervention. Il est facile de faire des *réaménagements mineurs* et des *reconfigurations internes* au sein d'une même suite en aire ouverte. Inversement, il est plus difficile de faire des rénovations majeures tels que les *agrandissements* ou *sous-divisions d'espaces locatifs* qui requièrent notamment des interventions au niveau des cloisons dalle à dalle. Lorsque des divisions fixes plutôt que des cloisons amovibles sont installées, le système ne performe pas moins ou pas mieux qu'un autre. Or le bâtiment de la MDD est doté de plusieurs suites locatives isolées les unes des autres par des cloisons dalle à dalle. De

ce fait, la performance du système de planchers surélevés en matière de facilité de rénovations ne répond aux attentes du client que partiellement, soit uniquement dans le cas de *réaménagements mineurs* et de *reconfigurations internes*.

2.4. Conclusions

Pour atteindre les plus hauts niveaux de durabilité et de certification tel que LEED Platine, les équipes de conception privilégient parfois des technologies et systèmes « novateurs ». Il s'agit d'un pari risqué, car leur mise à l'essai en contexte réel n'est parfois qu'à un stade embryonnaire. Cette étude a évalué la performance du système de planchers surélevés à ventilation intégrée selon quatre indicateurs. Les résultats montrent que le système du bâtiment de la MDD n'y performe que partiellement, les attentes du client-occupant n'étant que partiellement rencontrées. Les performances retenues pour les fins de l'étude étaient la qualité de l'air, le confort thermique des usagers, les économies d'énergie, et la facilité des réaménagements intérieurs.

Par les résultats de tests de qualité de l'air favorables et la satisfaction élevée qu'en ont les occupants, la présente étude conclut de façon générale en une bonne qualité de l'air à la MDD. Cette dernière n'est cependant pas tributaire de la performance du système de planchers surélevés à ventilation intégrée. En effet, le phénomène de stratification de l'air et des contaminants attendu d'un tel système n'est pas au rendez-vous. La qualité de l'air est supérieure à la MDD plutôt grâce à la grande quantité d'air neuf extérieur introduit dans le système de ventilation issue du surdimensionnement de ce dernier à cet effet et de la filtration de l'air. Il en résulte que l'air fourni aux usagers est considéré être de qualité « exemplaire ». Comme il s'agissait d'une exigence de premier plan pour le client-occupant en matière de conception, il devrait en être satisfait. La présente étude conclut ainsi que cette bonne qualité de l'air à la MDD est la résultante de standards de conception élevés au chapitre de la mécanique générale du bâtiment. Les planchers surélevés à ventilation intégrée n'y jouent pas le rôle attendu et la raison probable soulevée

par la présente étude mérite l'attention du client-occupant : Il y aurait insuffisance de « panaches thermiques » (ou sources de chaleur – employés, équipements, etc.) ou de forces supplémentaires (motrices, cheminées solaires, etc) au soutien du phénomène de stratification des contaminants. En quantité adéquate, ceux-ci auraient autrement pu contribuer à la meilleure performance du système. Les fournisseurs ne dévoilent peut-être pas ce fait non négligeable dans leurs documents promotionnels et techniques et mériteraient à le faire pour que les choix des concepteurs de bâtiments soient mieux éclairés.

Le client-occupant s'attendait aussi à ce que les planchers surélevés à ventilation intégrée offrent un meilleur confort thermique aux usagers. Il s'agissait d'un critère de première importance et décisif dans le choix d'un tel système. En effet, celui-ci est prétendu procurer un meilleur confort grâce au contrôle que peut exercer l'utilisateur sur ses diffuseurs ajustables quant au débit d'air et à la température. Les résultats assez mitigés conduisent à la conclusion que le système de planchers surélevés à ventilation intégrée n'accroît le confort des usagers que partiellement. Alors qu'il aurait été considéré comme étant bon dans le cas d'un bâtiment avec système mécanique plus conventionnel, le niveau de confort thermique à la MDD n'est pas optimal considérant le type de système adopté, lequel aurait normalement dû mieux performer à cet effet. Par ailleurs, il se dégage de l'étude une hypothèse que les avantages de ce système ne sont pas exploités à leur plein potentiel : La majorité des occupants manipule rarement les diffuseurs ajustables qui leur sont offerts pour régler le débit d'air souhaité. De ce fait, une recommandation au client-occupant serait ici de sensibiliser les occupants aux paramètres de fonctionnement du système afin de les habiliter à mieux contrôler leur confort thermique. Cependant, ce contrôle thermique doit être encadré afin de ne pas déstabiliser le système.

En matière d'économies d'énergie, il n'a pas été possible de les mesurer, les opérateurs n'ayant pas encore de moyen technique à disposition pour le faire. De ce fait, cette étude ne peut conclure si le système répond ou non aux attentes du client-occupant dans cet axe. À défaut de résultats quantitatifs, il était au-

delà opportun de partager l'expérience de la MDD à ce sujet avec les acteurs de l'industrie. Le cas témoigne en premier lieu d'un assemblage inédit en matière de mécanique du bâtiment : un système fonctionnant par géothermie, écologique et peu énergivore, doublé d'un système de planchers surélevés à ventilation intégrée à double gaine, énergivore. Il s'agit d'une figure d'exception qui présente une réelle problématique à examiner en matière d'économies d'énergie, soit un cas intéressant et fort pertinent pour l'industrie. En second lieu, les efforts déployés pour mesurer ces économies en énergie (si existantes) témoignent des défis rencontrés, lesquels se posent toujours aujourd'hui. L'on peut conclure que la technologie n'est pas encore au rendez-vous pour y parvenir, un enjeu qui mérite l'attention en vue de son développement souhaitable. Enfin, l'étude soulève deux hypothèses qui méritent un examen additionnel : (1) les éventuelles économies en énergie que promet la ventilation par le plancher sont partiellement ou entièrement éclipsées par le système double gaine (assez énergivore) ; et (2) le système passif de géothermie compense pour les dépenses énergétiques du système double gaine. En ce sens une fois la technologie adéquate développée, des études devraient s'y pencher.

Enfin, concernant la performance attendue de l'industrie à l'effet que les planchers surélevés facilitent les réaménagements intérieurs, les entretiens avec des experts et des professionnels ont permis de tirer des conclusions pertinentes. Alors que l'industrie semble prétendre que cette facilité de réaménagements serait « universelle », cette étude apporte une nuance, suggérant plutôt que les planchers surélevés facilitent ou complexifient les réaménagements suivant leur type. Les planchers surélevés facilitent les *réaménagements mineurs* et *reconfigurations internes* au sein d'une même suite en aire ouverte. Inversement, il rend plus difficile les réaménagements majeurs tels que les *agrandissements* ou *sous-divisions d'espaces locatifs* qui requièrent notamment des interventions au niveau des cloisons dalle à dalle. Or le bâtiment de la MDD est doté de plusieurs suites locatives isolées les unes des autres par des cloisons dalle à dalle. Ainsi, la performance du système de planchers surélevés en matière de facilité de rénovations ne devrait

répondre aux attentes du client que partiellement, soit uniquement dans le cas de *rénovations mineures* et de *reconfigurations internes*.

Pistes de recherches futures sur les planchers surélevés

Cette étude s'est concentrée essentiellement sur quatre critères de performances identifiés par le client-occupant et soutenus par la littérature. Il existe toutefois deux autres indicateurs de performance souvent cités dans la documentation promotionnelle et technique des planchers surélevés. L'un est leur avantage en termes d'économies de coûts de construction. Il est prétendu que malgré leur surcoût en matériel et installation, ils sont quand même avantageux, ce surcoût étant souvent compensé par des économies importantes dans les systèmes de CVCA, électricité et câblage ainsi que dans les coûts d'entretien. Le second avantage est que ce système peut contribuer à l'obtention de plusieurs points LEED. N'ayant pas eu accès aux données quantitatives nécessaires à leur évaluation, la présente étude a exclu l'examen de ces deux performances également attendues. Néanmoins, certaines hypothèses pertinentes peuvent être avancées et des études futures méritent de s'y pencher.

En termes de compensation du surcoût des planchers surélevés grâce aux économies en systèmes constructifs autres et frais d'opération, le fait d'avoir privilégié un système de ventilation double gaine (en partie « dédoublé » et plus énergivore), pourrait nuire à ces compensations. D'autre part, des économies en termes de reconfigurations mineures sont à envisager, ce jusqu'à 15% selon Schieber (2018). Mais ceci est probablement négligeable si l'on considère que le système choisi à la MDD est très dispendieux. De ce fait, l'évaluation de cette performance en matière d'économies à la MDD aurait été peu éclairante. Elle l'est néanmoins pour l'industrie qui mérite à mieux comprendre les enjeux d'ordre budgétaire liés aux systèmes de planchers surélevés.

En ce qui concerne la contribution du système à l'obtention de plusieurs points LEED, il est ici très

important de souligner que les certifications des bâtiments dans le domaine de la durabilité ne sont pas l'unique moyen d'en affirmer la réelle valeur écologique, voire valeur écoresponsable. Ces certifications sont basées sur le cumul d'une série de points, souvent anecdotiques et isolés, qui ne tiennent pas compte de leur impact global sur le bâtiment et l'environnement au-delà. Or il y a lieu de souligner qu'à la MDD, le système de planchers surélevés a généré environ 32,000 pi.ca. de tuiles de béton, tapis, colle, et des centaines de pattes en métal pour soutenir le tout, sans oublier le surdimensionnement de la structure pour en supporter le poids. Ces matériaux sont pour la plupart des ajouts au bâtiment, signifiant l'accroissement de son énergie intrinsèque et une empreinte écologique qui ne doit pas être négligée.³¹ Un message important s'adresse donc ici aux professionnels œuvrant à la réalisation de bâtiments verts et écoresponsables. Ceux-ci doivent impérativement faire preuve de jugement en regard des « promesses » dites « écologiques » de ces certifications. Au-delà de la quête de points LEED, ils doivent réfléchir à d'autres façons de concevoir la réelle valeur « écologique » des bâtiments (calculs de l'énergie intrinsèque, analyse du cycle de vie), ou du moins être conscients des compromis qui doivent être faits en ce sens.

Implications des résultats

Le client-occupant de la MDD a privilégié l'être humain (et donc le confort et le bien-être de l'occupant) à titre de premier paramètre de conception. Ce choix a conduit à des compromis sur trois plans. Premièrement sur celui des coûts, car les planchers surélevés et le système de ventilation double-gaine sont plus dispendieux que d'autres systèmes plus conventionnels

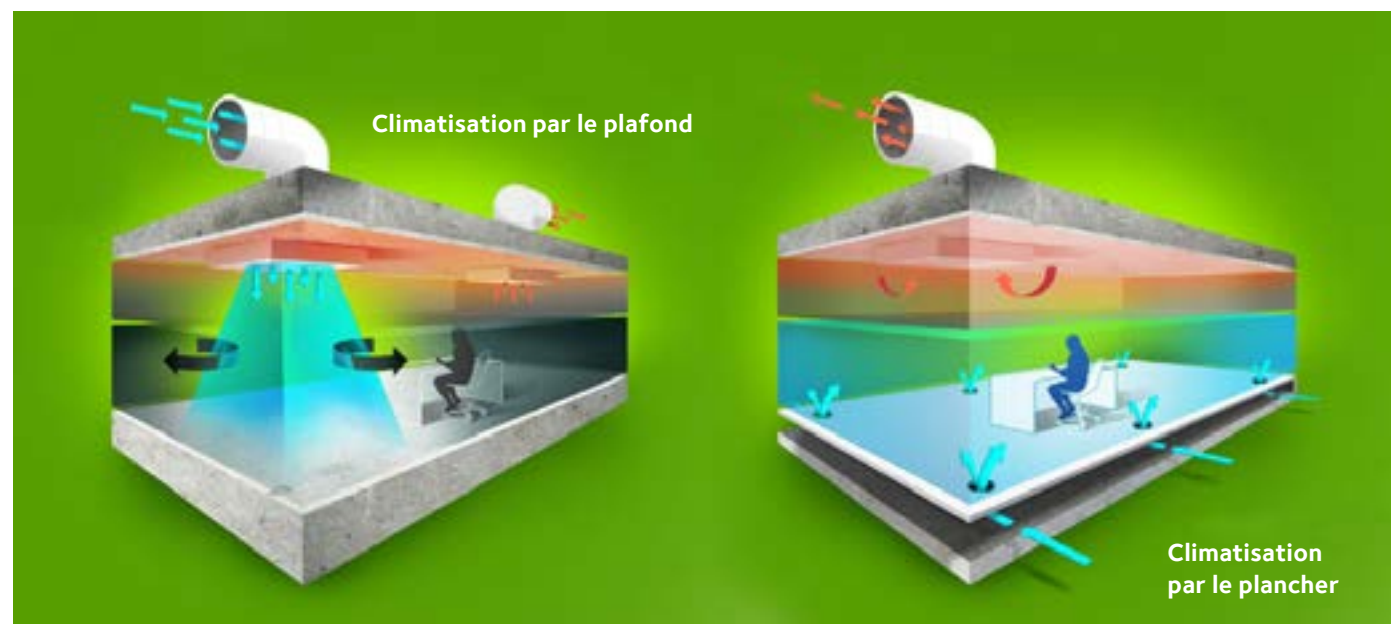
31. Des calculs préliminaires avec le logiciel d'analyse de cycle de vie Athena montrent que l'ajout de planchers surélevés pourrait contribuer à 50 tonnes de CO² pendant la construction. Ceci prend en compte les tuiles de béton, pattes en métal et béton au périmètre du bâtiment (12 pouces de hauteur additionnels aux étages 3 à 5). Une évaluation interne menée au bâtiment de la MDD pour l'année 2012 a permis d'estimer que le transport des employés du bâtiment au travail émettait environ 13 tonnes de GES – donc environ un quart des émissions de carbone liées au transport des employés au travail. Ces chiffres sont détaillés dans le tableau 2.4 à la fin de l'étude.

pour les édifices à bureaux. Deuxièmement en termes d'énergie intrinsèque, car les planchers surélevés signifient l'ajout de matériaux de construction qui accroissent incidemment les émissions de CO² (même si ce système pallie la nécessité de plafonds suspendus dans certaines zones). Et enfin, en termes de performance énergétique, qui est probablement moindre que ce qui aurait pu être atteint avec une autre solution (or ce dernier aspect devra être confirmé par d'autres études quantitatives).

La question émergeant dès lors de ces résultats est la suivante : Est-ce que le client-occupant aurait pu atteindre les mêmes niveaux de confort et de qualité de l'air avec un système de ventilation plus abordable et plus énergétiquement efficace ? Cette étude soulève est que si l'on avait privilégié un autre système de ventilation que celui à double gaine, davantage d'économies en énergie auraient peut-être pu être réalisées. En revanche, cette stratégie aurait été probablement au détriment du confort de l'utilisateur alors que la performance du système en termes de confort (au niveau thermique et de qualité de l'air), était jugée prioritaire pour le client-occupant.

Or ces compromis effectués lors de la conception du bâtiment de la MDD ne sont pas inhabituels. Comme l'affirment Bauman and Dally (2003), « Des recherches récentes suggèrent que le fait de maintenir les zones occupées « confortables » peut être en conflit avec le fait de réduire au minimum la consommation d'énergie » (p. 106) – ce qui semble être le cas à la MDD. Une implication importante de cette étude est donc qu'il n'existe pas – comme le soutient Herbert Simon dans son ouvrage *The Sciences of the Artificial* – de solutions « optimales » pour un bâtiment. Cette étude démontre la place importante que prennent les inéluctables compromis en matière de design de bâtiments, lesquels ont une incidence inévitable sur leur performance. Pour les bâtiments écologiques et écoresponsables comme celui de la MDD, il arrive parfois que les objectifs de développement durable entrent en conflit et la solution devient alors une question de priorités pour le client.

2.5. Images



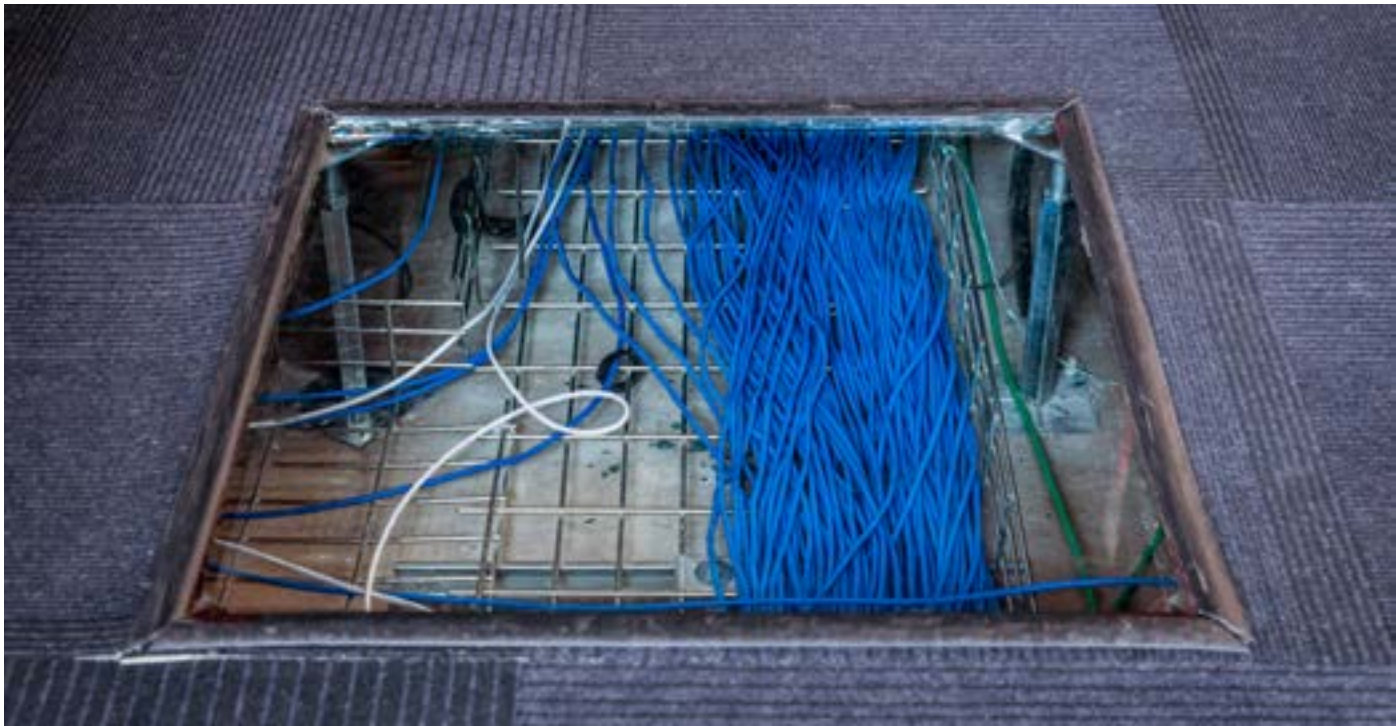
Principes de la ventilation par déplacement. Illustrations : Trame média.



Distribution des diffuseurs. Photo : Antoine Saito.



Mécanisme interne des diffuseurs. Photo : Antoine Saito.



Vue intérieure des planchers surélevés. Photo : Antoine Saito.



Boîte de mélange. Photo : Antoine Saito.



Installation du système de planchers surélevés.

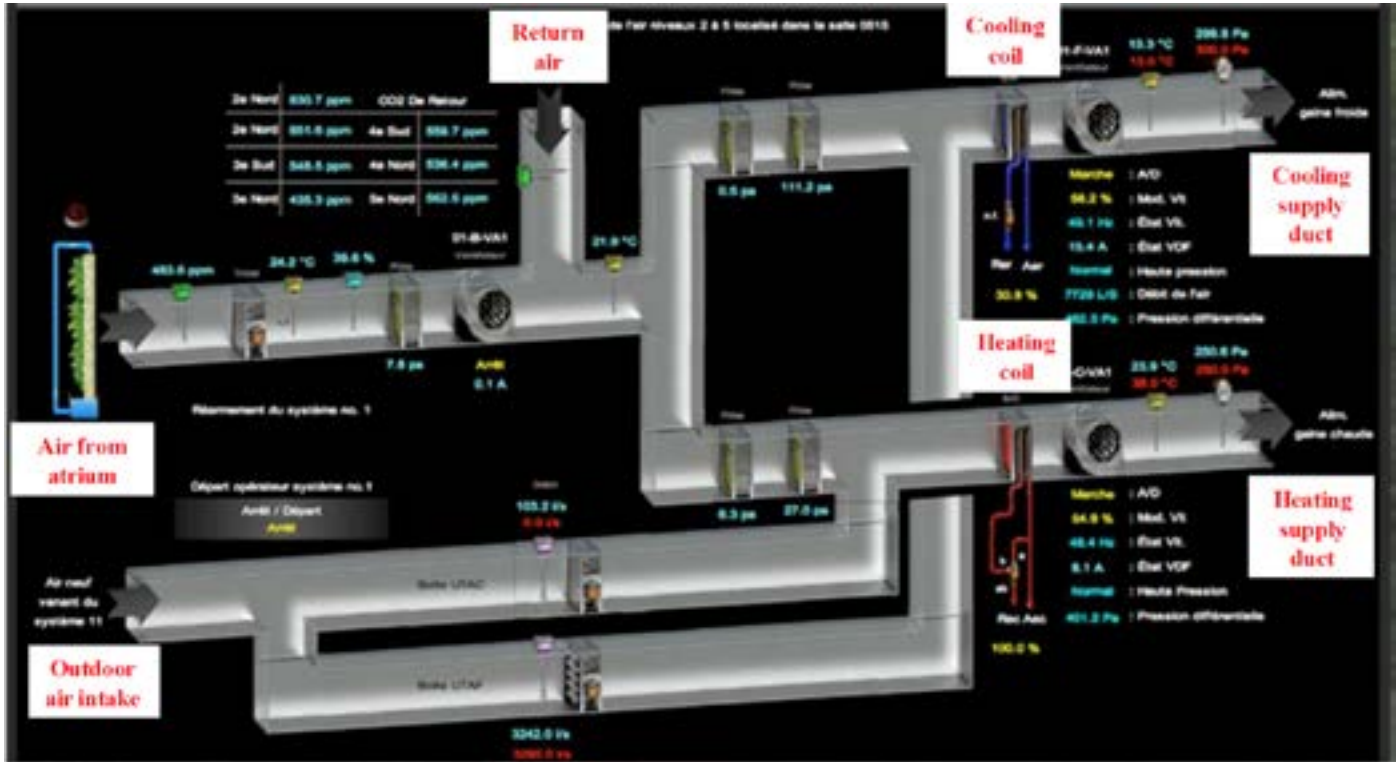


Schéma du système de ventilation. Source: Ouazia & Booth, 2014.



Plans de zonage de ventilation. Source: Bouthillette Parizeau, 2011.

Le tableau 6 ci-dessous détaille quelques ajouts et réductions de coûts liés aux planchers surélevés selon Bauman & Dally.

TABLEAU 6

Les ajouts et réductions de coûts associés aux planchers surélevés. Adapté de Bauman & Dally, 2003.

AJOUT DE PLANCHERS SURÉLEVÉS	
Ajouts de coûts usuels	Réductions de coûts usuels
Coûts de structure de base : • La taille de la colonne augmente pour soutenir le plancher • Les noyaux mécaniques doivent être surélevés ou des rampes pour personnes handicapées installés • Augmentation de la hauteur dalle à la dalle si la hauteur plancher à plafond souhaite être conservée • Coûts du plancher surélevé et tes tuiles de tapis (versus tapis en rouleau)	Coûts de structure de base: • Pas de nivellement final de la dalle lorsque le sol est nivelé au laser
Coûts de câblage TI et électrique : • Sans objet	Coûts de câblage TI et électrique : • Le câblage électrique utilise des modules d’alimentation dans tout l’espace pour réduire les exigences de câblage • Les boîtes de sortie au sol dans chaque poste de travail éliminent le besoin d’électrifier le mobilier • Les fiches modulaires dans les boîtes de sortie réduisent le temps de connexion requis pour les services PVD • Les coûts d’installation sont réduits en raison de la facilité de travail au niveau du sol\ les coûts de conduits peuvent être considérablement réduits ou éliminés si un câble de plénum est utilisé
Coûts d’opération et d’entretien : • Sans objet	Coûts d’opération et d’entretien : • Réduction des coûts de remplacement des tapis résultant de l’utilisation de tuiles de tapis remplaçables • Réduction des coûts de relocalisation des postes de travail et / ou de reconfiguration des services grâce au câblage modulaire et aux boîtes de service PVD facilement déplaçables

TABLEAU 7

Estimation préliminaire de l’impact des matériaux du système de planchers surélevés lors de la phase construction. Analyse faite avec le logiciel Athena.

Mesures	Impact des matériaux	Ajout au bâtiment de la MDD
Potentielle de réchauffement planétaire	50 tonnes	0.40 %
Consommation de combustibles fossiles	390,000 MJ	0.65 %
Potentiel d’acidification	0.3 tonnes	0.83 %
Potentiel de smog	6.6 tonnes	1,3 %

Références

AIR-INS. (2011). AS-00451-A Essais préliminaires (pp. 16). Varennes, QC.

Bauman, Fred S, & Dally, Allan. (2003). *Underfloor air distribution (UFAD) design guide* (Vol. 1064): American Society of Electroplated Plastics.

Bouthillette Parizeau. (2011). MAISON DU DÉVELOPPEMENT DURABLE : Simulation énergétique pour accréditation LEED – Logiciel EE4v1.7-2 (pp. 1-74).

Bouthillette Parizeau. (2013). Centre for Sustainable Development Construction *Canadian Consulting Engineering Prize – Prix canadiens du génie-conseil* 2013 (pp. 12). Montréal.

Chartier, Pierre-Yves. (2018). Entrevue informationnelle. In A. O. e. R. Leoto (Ed.). Montréal.

Cole, Raymond J, Brown, Zosia, & McKay, Sherry. (2010). Building human agency: a timely manifesto. *Building Research & Information*, 38(3), 339-350.

Daly, Allan. (2002). Underfloor air distribution: lessons learned. *ASHRAE journal*, 44(5).

Davidson, Colin H, Gagné, Mario, & l'aménagement, Université de Montréal. Faculté de. (1984). *Le bureau de demain: actes du deuxième Colloque sur la qualité de vie au travail tenu les 6, 7 et 8 avril 1983 à Montréal*. Montréal: Université de Montréal, Faculté de l'aménagement.

Equiterre. (2018). Bilan de la consommation énergétique: Analyse de la performance énergétique de la Maison du développement durable (Vol. 2, pp. 35). Montréal, Canada.

Equiterre, MSDL, BPA, PSA, Teknika-HBA, PMA, . . . ETS. (2007). *Compte rendu de la réunion*. Montréal.

Fisk, William, Faulkner, David, & Sullivan, Douglas. (2004). Performance of underfloor air distribution: results of a field study: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA (US).

Global EcoVillage Network. What is an EcoVillage? Retrieved August 16th, 2017, from <https://ecovillage.org/projects/what-is-an-ecovillage/>

Haworth. Haworth Raised Access Flooring (pp. 64).

Tate Access Floors Inc. (2009). High Performance & Sustainable: Developer and Multi-Tenant Leased Buildings (pp. 20).

La Maison du développement durable. Gestion écologique de l'énergie. 2018, from <https://lamdd.org/batiment/gestion-ecologique-lenergie>

Lehrer, David, & Bauman, F. (2003). Hype vs. reality: new research findings on underfloor air distribution systems.

Ouazia, Boulem, & Booth, Daniel. (2014). Performance Assessment of Stratified Ventilation System in Equiterre Building. *NRC-CNRC, Project Report no, A1-003056 Final*, 33.

Pearl, Daniel S. (2018). Entrevue informationnelle. In A. Oliver & G. Lizarralde (Eds.). Montréal.

Roy, Normand. (2018). Entrevue sur les rénovations à la MDD. In A. Oliver (Ed.), *Etude Equiterre-Chaire Fayolle-Magil Construction*. Montréal.

Schieber, Guillaume. (2018). Entrevue sur les planchers surélevés et les systèmes T.I. . In A. Oliver (Ed.).

Tardif, Michel. (2018). Entrevue informationnelle. In A. O. E. R. Leoto (Ed.), *Ressources Naturelles Canada*.

Thorpe, Roderick. (2018). Rapport présenté à Equiterre concernant l'évaluation de la qualité de l'air à la Maison du développement durable (pp. 23). Montréal, QC: EnviroParfait.

Webster, Tom, Bauman, Fred, Shi, Mingyu, & Reese, James. (2002). Thermal stratification performance of underfloor air distribution (UFAD) systems.

Zhao, Juan, Khmelenko, Vasiliy, & Claridge, David. (2014). Performance Study of an Under-floor Air Distribution System in an Education Building to Identify Building Energy Efficiency Improvement Opportunities. *ASHRAE Transactions*, 120, D1.



Photo : Antoine Saito

VOLET 3

LE CONFORT, LE BIEN-ÊTRE ET LA PRODUCTIVITÉ DES EMPLOYÉS DE LA MDD

Auteurs : Amy Oliver, Anne-Marie Petter, Gonzalo Lizarralde, Hela Boussoffara, Ricardo Leoto et Normand Roy | En collaboration entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre | Avec l'appui financier de MITACS. Contrat de recherche MITACS IT10752 | Certificat d'éthique No. CPER-18-001-D

Août 2018

Note sur les limites de l'étude

Ce rapport ne vise pas la production d'un contenu scientifique susceptible de produire des généralisations. Il vise à répondre à des questions spécifiques du mandataire (La Maison du développement durable/ Equiterre) concernant l'opération du bâtiment de la MDD. Il s'agit d'une étude de cas qui illustre les enjeux de planification, conception et opération d'un bâtiment spécifique. Il a été réalisé dans le cadre d'un projet de stage MITACS et d'une entente de collaboration de 8 mois entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre. Cette section fait partie intégrante d'une étude plus large qui comporte 3 autres sections similaires. Les résultats présentés dans cette section doivent être compris et contextualisés en regard de l'ensemble des résultats de l'étude.

Résumé

Les aires de travail complètement ouvertes et partagées sont actuellement une tendance prédominante dans le marché des bureaux au Canada et ailleurs. Les défenseurs de cette approche soutiennent que les espaces ouverts et partagés facilitent la collaboration, l'innovation et l'engagement au travail. Or cette tendance commence à faire l'objet de plusieurs critiques qui soulignent que la stratégie vise, en réalité, la réduction des coûts de construction et d'opération des bâtiments. Les critiques notent qu'il n'existe aucun impact réel sur la performance organisationnelle et que les aires ouvertes et partagées réduisent la productivité des employés et leur collaboration.

Le bâtiment de la MDD offre 40,000 pieds carrés d'espace de bureaux dont trois quarts ont été conçus sous forme de bureaux en aire ouverte avec mobilier muni de cloisons. Le client-occupant a préconisé cette approche à la MDD en vue d'offrir aux occupants un environnement de travail de haute qualité. Il souhaitait ainsi évaluer la performance du bâtiment à l'égard de cet objectif. Cette étude examine l'impact des espaces de bureaux sur le confort, le bien-être et la productivité des employés de la MDD. Pour évaluer le confort en lien avec la qualité environnementale intérieure des aires de bureaux, l'équipe de recherche a retenu cinq indicateurs de performance : l'éclairage naturel et artificiel, l'intimité visuelle, le confort acoustique, la qualité de l'air et le confort thermique. Deux autres indicateurs ont servi à l'évaluation de leur performance fonctionnelle, soit la productivité et le bien-être des occupants. Les méthodes de cette étude incluent une analyse de documents du projet (tests de qualité de l'air, plans, devis, etc.), treize entrevues avec des experts, ainsi que l'analyse des résultats d'un sondage auprès des occupants du bâtiment de la MDD sur le confort, le bien-être et la fonctionnalité et un récent test de qualité de l'air.

Les résultats de l'étude montrent que les espaces de bureaux de la MDD performant bien selon les indicateurs retenus et répondent favorablement aux normes de l'industrie. Les niveaux de confort, de bien-être et de productivité des employés sont plutôt élevés. Les occupants de la MDD se disent satisfaits de

l'éclairage, de la qualité de l'air et du niveau d'intimité visuelle et plutôt (mais pas entièrement) satisfaits des niveaux de confort acoustique et thermique. Ce dernier est sous réserve d'un pourcentage important d'occupants (en particulier les femmes), signifiant avoir froid en hiver et en été. Ces résultats pourraient être considérés comme bons dans un bâtiment avec un système mécanique plus conventionnel. Or il ne faut pas négliger le fait qu'ici plus de 40 % des occupants sont moyennement satisfaits ou carrément insatisfaits. Il n'existe pas de différence entre la productivité et le bien-être des employés en aires ouvertes de ceux en bureaux fermés. De surcroît, les employés en aires ouvertes sont – à l'exception du niveau de confort acoustique – plus satisfaits de leur qualité environnementale intérieure que ceux en bureaux fermés. Ces résultats suggèrent que les espaces de bureaux de la MDD répondent généralement aux objectifs du client-occupant, soit d'offrir aux usagers un environnement de travail de haute qualité.

Cette étude est une contribution importante pour l'industrie de la construction. Elle montre que les aires ouvertes avec mobilier muni de cloisons produisent en effet des résultats favorables. L'étude révèle par ailleurs que certains aspects doivent être considérés dans la conception de ces aires ouvertes, incluant : l'accès à l'éclairage naturel, le contrôle de l'éclairage, du débit de l'air et de la température, la disponibilité d'espaces pour des appels et des rencontres à caractère confidentiel, la disponibilité de lieux de détente et d'échanges, la fourniture de meubles ajustables et ergonomiques, la réduction du bruit, et la sensibilisation des occupants en matière de personnalisation de leur espace de travail. Le projet de la MDD a priorisé avant tout l'être humain. Il s'agit d'une décision appropriée non seulement pour son caractère éthique, mais aussi par son impact positif sur la performance des organisations qui composent la MDD. Cette étude confirme que les performances liées aux facteurs humains peuvent parfois rentrer en contradiction avec d'autres objectifs de construction écologique. Or, ce facteur humain ne doit pas être sous-estimé dans la conception de bâtiments écoresponsables.

3.1. Objectif de l'étude et procédure

Environ 90 000 heures de la vie d'une personne sont consacrées au travail. Pour beaucoup de Nord-américains, ceci se traduit en plus d'un tiers à la moitié de leur temps passé au bureau. Il n'est donc pas surprenant que les immeubles corporatifs suscitent l'intérêt de nombreux chercheurs et professionnels en architecture, design d'intérieur, psychologie du travail et ergonomie. Comprendre la relation entre l'humain et son environnement de travail est important pour plusieurs raisons : L'aménagement des aires de bureaux a un impact reconnu sur la satisfaction des employés, leur engagement professionnel, leur taux de roulement ainsi que leur santé et bien-être. Pour les organisations, la productivité de leurs employés est essentielle à leur succès. Or une étude publiée en 2005 par Basex, une société de recherche en technologie de l'information basée à New York, révèle que 25 % du temps des employés est mobilisé par des interruptions et des distractions au bureau. Il s'agit donc d'un gaspillage considérable de temps et de ressources pour les entreprises (Spira & Feintuch, 2005). Des recherches récentes indiquent que ceci est particulièrement vrai dans le cas de plans en aire ouverte, lesquels sont aujourd'hui privilégiés dans la majorité des immeubles corporatifs (Marchand & Newsham, 2004). Pour les organisations, il est dès lors essentiel de comprendre quelles conditions contribuent favorablement au bien-être, au confort et à la productivité des employés.

Pour mieux comprendre les besoins des employés et les conditions propices à leur satisfaction et productivité, plusieurs chercheurs suggèrent qu'il soit nécessaire de conduire auprès d'eux des évaluations pré- et post-occupation. Ce sont les occupants qui savent « s'ils ont trop chaud ou trop froid, ont trop ou insuffisamment de lumière, si l'environnement est trop bruyant, quel est leur niveau de confort dans l'ensemble, et au final, de quelle façon les conditions inhérentes au bâtiment affectent leur santé et leur productivité » (Baird & Dykes, 2010, p. 292). Il existe différents types d'évaluations post-occupation d'ordre qualitatif. Certaines évaluent le degré de confort des usagers à l'aide de questions

sur la qualité environnementale intérieure. D'autres études, développées par exemple par IBM Kenexa, Gallup et Aon, proposent des indicateurs standardisés pour évaluer le niveau d'engagement professionnel.³² Ou encore certaines visent à évaluer les niveaux de satisfaction et de productivité des employés. Dans cet ordre d'idées, la présente étude s'appuie principalement sur un sondage réalisé auprès des occupants de la MDD pour évaluer la performance des aménagements de bureaux en termes de confort, bien-être et productivité.

Les principes de conception du bâtiment de la MDD visaient à l'élever au rang des édifices à bureaux les plus « durables » au Québec. À ce titre, le client et l'équipe de concepteurs ont retenu la santé et le bien-être des occupants comme principes les plus fondamentaux. Tel que souligné dans l'étude du volet 2, santé (qualité de l'air) et bien-être (confort) ont été légitimement considérés comme prioritaires pour le client-occupant au-delà de toute autre dimension d'ordre technique ou de durabilité. En effet, la première stratégie à la tête de la charte de projet était de « Créer un environnement de travail de haute qualité ». Ceci signifiait la conception d'un environnement d'une part « extrêmement sain » – par une qualité d'air et d'éclairage optimaux – d'autre part confortable et fonctionnel, avec des espaces de travail et équipements de haute performance. Il existait donc une volonté claire de concevoir un bâtiment au service de l'humain. Dans cette foulée, la réflexion sur la performance de la MDD peut offrir de précieux enseignements pour l'industrie de la construction. Mettant au jour les dimensions tantôt optimales et tantôt moins favorables que présente le cas d'un bâtiment écoresponsable priorisant l'être humain, l'étude pourrait contribuer à éclairer la pratique engagée dans des préoccupations similaires.

Lors des séances de conception intégrée du projet, le client-occupant avait signifié sa préférence pour des espaces de bureaux majoritairement en aire ouverte. Or les consultations en cours de développement du projet avec les futures organisations locataires

32. Les indicateurs incluent la fierté, l'engagement, la connexion et la motivation.

ont conduit à l'assouplissement de cette exigence programmatique initiale. En effet, les besoins opérationnels de plusieurs d'entre elles exigeaient l'aménagement de certains bureaux privés et fermés. De ce fait, aujourd'hui la configuration spatiale de la MDD est plutôt hybride, avec environ 30 000 pieds carrés dédiés à des bureaux en aire ouverte et environ 8 150 pieds carrés à des bureaux privés (représentant respectivement 79 % et 21 % de la superficie totale des espaces de travail). Elle compte également des espaces communs tels qu'une cuisinette, salles de conférences, et papeteries, localisés aux étages 2 à 5 du bâtiment.



Cuisine partagée de la MDD. Photo : Antoine Saito.

Les motifs du client-occupant à l'origine de cette étude sont de deux ordres : en premier lieu, évaluer la performance de la MDD en termes de confort, de bien-être et de productivité ; en second lieu, mieux comprendre l'impact des espaces en aire ouverte sur ces dimensions. Plus spécifiquement, le client-occupant soupçonnait qu'il y avait des enjeux sonores, de confort, d'intimité visuelle et de distraction liés aux aires ouvertes qui méritaient une analyse spécifique.

Dans cette visée, les principales questions ayant été posées sont : Les espaces de bureaux répondent-ils aux attentes du client ? Comment les espaces de travail du bâtiment de la MDD performant-ils en termes d'indicateurs de qualité environnementale intérieure ? Quels sont les niveaux de bien-être et de

productivité des employés ? Se sont ajoutées les deux sous-questions suivantes : Quels sont les problèmes, le cas échéant, liés aux espaces de bureaux en aire ouverte ? Et quelles recommandations pourraient être faites afin d'améliorer l'environnement de travail des occupants ?

Pour examiner ces questions, l'équipe de recherche a analysé 36 références théoriques sur les espaces de bureaux, 18 références sur les études post-occupation des espaces de bureaux (incluant les principes de la certification *WELL*), 6 études sur les repères de confort et de qualité environnementale intérieure pour les espaces de bureaux, et plus de 6 documents de construction du projet (charte du projet, plans et devis, procès-verbaux et vidéos du processus de conception intégrée). De plus, l'équipe de recherche a analysé les résultats de deux tests de qualité de l'air (le premier réalisé en 2014 et l'autre mandaté par l'équipe de recherche de la présente étude en 2018), ainsi que les résultats d'une étude sur le confort thermique réalisée en 2012. Elle a aussi effectué 13 entrevues avec 2 architectes, 1 gestionnaire de projets, 2 ingénieurs en mécanique, 3 promoteurs et gestionnaires immobiliers, 1 expert en construction LEED, 1 spécialiste en rénovations de bureaux en aire ouverte, 1 gestionnaire de la MDD, 1 entrepreneur général, et le chargé de projet de la MDD, tous possédant une expertise en bâtiments commerciaux.

Enfin, l'organisme Equiterre a conçu et diffusé un sondage auprès des occupants de la MDD sur le confort, le bien-être et la fonctionnalité des espaces du bâtiment. Les chercheurs ont aidé Equiterre à faire l'analyse des données « anonymisées » de cette étude. Le sondage a été envoyé par la MDD à tous les employés en avril 2018. Au total, il comportait 50 questions dont une grande partie consistait à évaluer la satisfaction des répondants selon des thèmes spécifiques. Pour fins de comparaison approfondie des résultats, un ensemble de premières questions était destiné à détailler le profil des répondants (ex : sexe, tranche d'âge, travail en aire ouverte ou bureau fermé,

pourcentage de temps nécessaire à un maximum de concentration, etc.). Quant aux thèmes abordés, des questions ouvertes ont également été incluses pour inciter les répondants à élaborer plus en détails sur certains d'entre eux. Par exemple, sous le thème du niveau sonore dans l'espace de travail, le répondant devait d'abord en évaluer sa satisfaction, et par la suite on lui demandait de citer et décrire les plus importantes nuisances sonores.

Parmi les environ 159 employés, 93 ont répondu à ce sondage, ce qui représente un taux de participation de 59 %, considéré assez élevé. En effet, d'après le site web Survey Gizmo les taux de participation à un sondage interne sont habituellement de l'ordre de 30 à 40 % (et de 10 à 15 % pour un sondage externe). Ce taux élevé de participation a permis de rencontrer les objectifs de cette étude, soit de mieux comprendre la perception de confort, de bien-être et de productivité des occupants de plusieurs organismes, selon le genre et l'âge. Du point de vue statistique, le questionnaire est solide. Sur 23 questions qui étaient formulées en utilisant une échelle Likert³³ – et classées selon 6 catégories – les chercheurs ont obtenu un α supérieur à 0.95 (ce chiffre suggère aussi que quelques redondances peuvent exister dans le sondage). Ce chiffre se décompose en six catégories pour des fins statistiques : « éclairage » composée de 3 questions ($\alpha = 0.99$) ; « environnement de travail » composée de 5 questions ($\alpha = 0.99$) ; « confort thermique » composée de 7 questions ($\alpha = 0.99$) ; « caractéristique de l'espace de travail » composée de 3 questions ($\alpha = 0.95$) ; « toiture verte » composée de 2 questions ($\alpha = 0.99$) ; et « circulation verticale » composée de 3 questions ($\alpha = 0.99$).

L'étude quantitative comporte cependant quelques limites. Premièrement, le sondage n'a pas été conçu pour réaliser facilement des corrélations statistiques. Certaines corrélations peuvent donc avoir une faible force quantitative. Deuxièmement, les échelles Likert (sur 5 échelles) n'ont pas été conçues suivant

33. Par exemple, plusieurs questions ont demandé aux participants d'évaluer leur satisfaction d'un certain aspect selon cinq choix de réponses : *très insatisfaits*, *insatisfaits*, *moyennement satisfaits*, *satisfaits* ou *très satisfaits*.

des échelons clairement validés par les chercheurs. Il devient donc difficile de distinguer, par exemple, la différence entre un répondant « *très satisfait* » et un répondant « *satisfait* ». Troisièmement, le sondage n'a pas été standardisé pour pouvoir faire des comparaisons avec d'autres organismes. Enfin, les chercheurs n'ont pas éliminé de l'analyse les valeurs aberrantes. Celles-ci peuvent donc avoir une influence non désirée sur les moyennes et les médianes rapportées dans ce document. L'équipe de recherche encourage le client-occupant à améliorer l'outil dans les prochains sondages à réaliser. Or afin de pallier ces limites, l'équipe a complété l'étude quantitative avec des données d'ordre qualitatif (13 entrevues) et des exercices de validation auprès d'experts et de deux occupants de la MDD.

Enfin, il faut noter qu'aucun employé de deux organismes locataires n'a répondu au sondage. Ces organismes et leurs bureaux ne sont donc pas représentés dans la présente étude.

3.2. Nouvelles tendances dans l'aménagement des bureaux

L'espace dédié au travail a certainement évolué au fil des ans. Ces changements sont dus en grande partie à la pression immobilière. En effet, les corporations et sociétés ont souvent cherché à optimiser l'espace dédié à leurs activités tertiaires. Ceci a conduit à la transformation de l'espace de travail en aires ouvertes ou open space. Cette tendance n'est pas apparue subitement ; elle a émergé dès le début du XIX siècle ou à l'amorce de la tertiarisation massive de l'emploi (Bertier & Perin, 2017, p.31). Or elle a connu une croissance importante dans les années 1960-1970 en Allemagne et aux États-Unis. Elle connaîtra un renouvellement important à partir des années 1990. Aujourd'hui, 60 % des bureaux en France sont aménagés en aire ouverte. Et cette tendance devient parfois une obsession. Par exemple, les nouveaux bureaux de grandes compagnies comme Deloitte à Toronto n'ont aucun bureau fermé (même pas pour le président directeur général). D'autres cas incluent le « lieu de travail basé sur les activités », ou *activity-based workplace (ABW)* en anglais. La conception

de ces aires de bureaux est en fonction du type de travail exercé et des activités auxquelles les employés participent (par exemple le travail concentré, le travail collaboratif, la socialisation, les vidéoconférences, etc.). Typiquement, ces bureaux n'ont pas de postes assignés et sont constitués d'une mixité d'aires ouvertes et de salles communes ou privées pour diverses activités « thématiques ».

Deux écoles de pensée s'opposent dans l'arène des aires ouvertes. Les défenseurs de cette approche soutiennent que les espaces ouverts et partagés facilitent la collaboration et l'innovation et réduisent certains inconvénients liés à la stratification pyramidale du personnel. Comme l'expliquent Pierrette et al. (2015), « L'intention de ces bureaux en aire ouverte est d'améliorer la communication entre collègues et donc de faciliter le travail d'équipe ou de projet, et d'être plus proche des gestionnaires » (p.4). Cependant, cette tendance commence à faire l'objet de plusieurs critiques qui soulignent que la stratégie vise, en réalité, la réduction des coûts de construction et d'opération des bâtiments. Les critiques notent de plus qu'il n'existe aucun impact réel sur la performance organisationnelle et que les aires ouvertes et partagées réduisent la productivité des employés et leur collaboration (Bernstein & Turban, 2018).

Dans la foulée de la réduction des coûts en immobilisation, une tendance actuelle dans le marché de l'immobilier corporatif est la densification des surfaces en vue d'économies d'espace et de coûts de construction. À titre de repères, l'aire de travail moyenne est passée de 500-700 pieds carrés par personne en 1970 (46-65 m²) à 150 pieds carrés (14m²) aujourd'hui (Financial Post). Les cabines de travail de nombreuses entreprises Fortune 500 sont réduites à 50 pieds carrés comparativement aux 80 pieds carrés de l'époque. Dans les cas les plus extrêmes de bureaux avec seuls des postes non-assignés, les calculs de densité ne se font même pas au pied carré. Ils se font à l'aide d'un ratio de sièges disponibles sur un nombre d'employés, ce allant de 1 : 1.2 à 1 : 1.5, signifiant, par exemple, qu'il y a 12 ou 15 employés pour 10 sièges disponibles (le reste des employés sont dans des espaces communs, en déplacement ou en télétravail).

Les aménagements des bureaux en aires ouvertes d'aujourd'hui, ainsi que des lieux de travail basés sur les activités, compensent partiellement la densification des espaces de travail avec plus d'espaces communs et de socialisation. De plus, ces bureaux sont souvent plus lumineux que les anciennes aires ouvertes au mobilier muni de cloisons hautes. Les meubles y sont souvent ajustables et plus ergonomiques. Ils offrent aussi souvent des environnements de travail plus stimulants donnant plusieurs options et des expériences variées aux employés.

Cependant, bien qu'elles soient au goût du jour en aménagement corporatif, les aires ouvertes et la densification des espaces de travail peuvent aussi comporter des désavantages. Ces espaces peuvent être sur-stimulants, pouvant dès lors nuire à la productivité des individus et de l'organisation elle-même (Bernstein & Turban, 2018). La densification des aires ouvertes peut poser des problèmes de bruit et d'intimité visuelle et exacerber l'effet sur-stimulant de l'espace. D'autres critiques de cette typologie soutiennent : qu'elle conduit à des difficultés de concentration, rend moins agréable la coopération entre collègues, n'augmente pas nécessairement les flux d'information et compromet la productivité et la satisfaction des employés. De plus, la densification des espaces ouverts peut produire des effets négatifs sur la qualité de l'air, une plus forte densité de personnes accroissant les polluants dans une pièce (K. E. Charles et al., 2005; Marchand & Newsham, 2004). Enfin en ce qui concerne l'intimité visuelle, dans le cas le plus extrême, les employés peuvent se sentir épiés comme décrit dans le livre *L'open space m'a tuer*.³⁴

D'importantes études ont récemment été réalisées à l'université Harvard et à Oxford Economics sur les effets négatifs des aires ouvertes. Celle de l'université Harvard démontre que les espaces ouverts peuvent ironiquement diminuer de 70 % la communication en personne et accroître la communication électronique entre collègues. Ceci serait dû à la trop grande visibilité ou l'effet de « transparence » des aires ouvertes. Les employés s'y sentant observés feraient appel à des

34. Isnards, A., & Zuber, T. (2008). *L'open space m'a tuer*. Hachette littératures.

stratégies pour préserver un certain niveau d'intimité, notamment via d'autres canaux de communication que les interactions en personne devant une vaste audience. Pour sa part, l'étude d'Oxford Economics révèle que « les bureaux ouverts peuvent générer des économies de coûts globales, mais ils nuisent à la productivité et au bien-être » des employés (Plantronics Inc., 2018). Ces études mettent en lumière les problèmes potentiels que posent les aires ouvertes et densément peuplées et le lien probant entre l'environnement et la perception de productivité et de satisfaction des employés.

3.3. Les indicateurs de performance

Après une revue de littérature et en concertation avec le client-occupant de la MDD, cinq indicateurs de performance (de qualité environnementale) ont ici été retenus : l'éclairage naturel et artificiel, l'intimité visuelle, le confort acoustique, la qualité de l'air et le confort thermique. Deux autres indicateurs ont servi à l'évaluation de la performance fonctionnelle, soit la productivité et le bien-être des occupants.

L'éclairage naturel et artificiel : Le bien être visuel est une dimension importante d'un lieu de travail. Un éclairage inadéquat a des conséquences à plus au moins long terme sur la santé : fatigue, irritation oculaire, et maux de tête. Inversement, un bon niveau d'éclairage contribue à la santé, sécurité, et à la bonne humeur des travailleurs. L'éclairage peut être naturel ou artificiel. La forme, la couleur et la texture des sources lumineuses devraient être esthétiquement agréables afin de maximiser les effets d'éclairage naturel et artificiel combinés. La performance d'un bâtiment en termes d'éclairage naturel et artificiel peut être typiquement mesurée en lux (pour les aires de bureaux où 300 à 500 lux sont recommandés) ou en sondant la satisfaction des usagers.

L'intimité visuelle : Les perturbations d'intimité créées par les distractions visuelles au travail constituent un problème majeur lorsque l'on évalue la performance et la satisfaction au travail (Kupritz & Bellingar, 2008). Bellingar and Kupritz (2011) identifient deux aspects de l'intimité au travail, soit d'être vu par ses collègues et réciproquement de les

voir. Dans les bureaux en aire ouverte, les employés peuvent éprouver plus de stress par la perception d'être surveillés par leurs supérieurs pendant qu'ils travaillent. Ce phénomène va dans le sens de la définition de l'intimité de O'Neill (1994) : « le degré auquel l'employé ressent le sentiment d'être exposé aux autres ainsi que la confidentialité auditive ». L'intimité visuelle se mesure difficilement de façon quantitative, elle est donc habituellement évaluée à l'aide de sondages auprès des usagers.

Le confort acoustique : Le confort acoustique dépend typiquement de la qualité acoustique des cloisons et du plafond, de la hauteur des cloisons, de la taille des postes de travail et de la disposition du mobilier (placé dans le même sens ou à contresens). Selon des standards de conception en matière d'espaces de travail en aire ouverte, l'orientation adéquate des ouvertures du poste de travail et des employés aide à réduire le volume sonore qui se propage autour des bureaux. Les aires ouvertes offrent souvent des environnements sonores plus bruyants, donc moins confortables. D'après Pierrette et al. (2015), le pourcentage d'employés en aires ouvertes se plaignant de nuisances auditives peut être jusqu'à dix fois plus élevé que celui d'employés en bureaux fermés. Le bruit peut diminuer la concentration des employés, augmenter le stress et la perte de motivation, restreindre la productivité et la satisfaction au travail et rendre les occupants plus susceptibles de dénoncer leurs conditions de travail. Le bruit dans des espaces de bureaux devrait idéalement être mesuré en Noise Criterion Balanced (NCB) qui prend en compte le spectre de bruit en bandes d'octaves. Entre 30 et 40 NCB ou 40 décibels sont recommandés pour les espaces de bureaux. Le sondage via questionnaire est également une forme efficace d'évaluation du confort acoustique des usagers.

La qualité de l'air : Dans des espaces de bureaux, la qualité de l'air intérieur (QAI) est largement déterminée par le système de ventilation de l'immeuble. Les espaces ont besoin d'être ventilés par un volume d'air extérieur permettant de fournir de l'air propre aux occupants. Une mauvaise gestion de l'alimentation en air, des contaminants et de la température ambiante peut entraîner de mauvaises conditions et produire

des impacts négatifs sur le bien-être et la satisfaction des occupants. Certains parlent même dans ce cas du syndrome des bâtiments malsains. En effet, la mauvaise qualité de l'air peut nuire à la concentration, conduire à des maux de tête, augmenter la somnolence et causer des irritations des yeux, du nez et de la gorge. La qualité de l'air peut être mesurée à l'aide de plusieurs indicateurs quantitatifs, tels que la concentration de CO₂, de CO, de contaminants et particules, la présence de moisissure, et les niveaux de composés organiques volatils. Il y a lieu de noter qu'à la MDD, on a opté pour un système mécanique doté d'un système de planchers surélevés à ventilation intégrée. Grâce à une alimentation en air par le bas, ce système est sensé provoquer un phénomène de stratification de l'air par l'élévation naturelle de l'air chaud, plus léger que le froid. En s'élevant dans le volume d'une pièce, celui-ci transporte un grand nombre de contaminants hors de la zone occupée, favorisant un air de meilleure qualité. Dans le cas d'un bâtiment pourvu de planchers surélevés à ventilation intégrée, une bonne stratification de l'air (des contaminants) est donc aussi un indicateur de la qualité de l'air. Comme pour les autres indicateurs de performance, il est également pertinent de sonder les occupants quant à leur satisfaction sur la qualité de l'air.

Le confort thermique : Le confort thermique est influencé par plusieurs facteurs, tels que la température ambiante, les vêtements, le niveau d'activité physique des occupants, le taux d'humidité, et la vitesse de l'air. Selon les standards déterminés par ASHRAE et d'autres organismes professionnels, un niveau de confort thermique optimal est atteint lorsqu'au minimum 80 % des occupants s'en disent satisfaits ou un maximum de 20 % s'en dit insatisfait. Les repères de l'industrie pour les espaces de bureaux incluent une température de 20 à 24 °C en hiver, de 23 à 26 °C en été (ASHRAE), un taux d'humidité de 30 à 60 %, et une vitesse de l'air inférieure à 0,15 ou 0,2 m/s (K. E. Charles et al., 2005). Or, il est important de souligner que le confort thermique est une expérience individuelle et subjective (Cole et al., 2010, p. 344; Davidson et al., 1984). Plusieurs études signalent, par exemple, que les femmes sont plus frileuses que les hommes. En conséquence, la façon la plus précise

de le mesurer est de sonder les usagers. Toutefois, il est également possible de mesurer la température, la vitesse de l'air et le taux d'humidité afin de vérifier s'ils se conforment aux repères de l'industrie. Il y a ici lieu de souligner que le système de planchers surélevés à ventilation intégrée a été choisi à la MDD en raison d'une meilleure qualité d'air et d'un meilleur confort. En effet, un tel système est doté de diffuseurs au plancher que les usagers peuvent manipuler à leur gré pour ajuster le débit de l'air et la température, permettant un niveau de confort personnalisé. De ce fait, la connaissance de cette fonctionnalité du système et la fréquence de manipulation des diffuseurs sont également, dans le cas particulier de la MDD, des indicateurs pouvant influencer le confort des usagers.

Tensions entre les indicateurs de qualité environnementale intérieure

Les cinq indicateurs de performance élaborés ci-dessus ne travaillent pas toujours ensemble de manière harmonieuse. Au contraire, ils peuvent parfois entrer en conflit les uns avec les autres. Ainsi, les solutions parfaites n'existent pas, elles émanent souvent de compromis.

Tension 1 entre l'éclairage, la ventilation et l'intimité : Plusieurs études et standards recommandent d'abaisser les cloisons dans les espaces à aire ouverte afin d'améliorer l'éclairage et la performance de la ventilation. Inversement, pour améliorer le confort acoustique, la confidentialité et l'intimité visuelle, il faut plutôt augmenter la hauteur des cloisons en plus d'agrandir les postes de travail. Marchand et Newsham (2004) résument ce problème : « Il est clair que la satisfaction complète des exigences dans un domaine risque d'être incompatible avec la satisfaction complète dans un autre domaine, l'exemple le plus flagrant étant la hauteur des cloisons » (p. 7).

Tension 2 entre la densification des espaces de travail et la qualité de l'air et l'intimité visuelle et acoustique : La densification des espaces de bureaux – une pression du marché immobilier – peut influencer négativement la qualité de l'air en y augmentant le

niveau de contaminants, ainsi qu'accroître l'inconfort des occupants par l'occurrence plus soutenue de distractions visuelles et sonores.

Tension 3 entre l'éclairage et le confort thermique : Les occupants assis à côté d'une fenêtre – qui bénéficient de la plus haute intensité lumineuse et des vues vers l'extérieur – ont tendance à être moins satisfaits des conditions thermiques à cause de plus grands écarts de températures qu'au centre de la pièce.

Tension 4 entre la qualité de l'air et le confort thermique : Dans le cas de bâtiments dotés de planchers surélevés à ventilation intégrée comme à la MDD, le phénomène de la stratification de l'air devant contribuer à une meilleure qualité de l'air a paradoxalement un effet inverse sur le confort thermique. La stratification de l'air englobe deux phénomènes interdépendants : la stratification thermique et la stratification des contaminants, cette dernière étant tributaire de la première. Alors que la stratification des contaminants contribue à une meilleure qualité de l'air – et est donc souhaitable, celle de la température peut causer plutôt de l'inconfort thermique – et donc non souhaitable.³⁵

Tension 5 entre les critères de performance de l'occupant-employé et ceux du propriétaire-gérant : Les occupants-employés ont parfois des définitions de la performance d'un bâtiment potentiellement opposées à celle du propriétaire-gérant. Depuis la perspective des occupants, les indicateurs de performance cités dans certains rapports sont de l'ordre de la satisfaction et de l'engagement au travail, du confort, du bien-être, et de la productivité. Pour plusieurs propriétaires et gestionnaires, ils sont plutôt de l'ordre du retour sur l'investissement et de la rentabilité. Ces indicateurs peuvent dès lors entrer en conflit. Par exemple, il peut être important pour l'employé de pouvoir personnaliser son environnement de travail alors que sous la pression du marché, le propriétaire-gestionnaire peut préférer

offrir des espaces plus flexibles, se prêtant moins à la personnalisation.

Ces tensions soulignent que dans un contexte de besoins et préférences subjectifs et parfois opposés des occupants, les designers et les opérateurs des espaces de bureaux doivent toujours faire des choix de conception qui satisferont certaines personnes selon certains critères, mais ne pourront jamais satisfaire l'ensemble des occupants et selon tous les critères. Dans ce contexte, l'adaptation à son environnement de travail et la sensibilisation des occupants à cet effet sont des dimensions importantes.

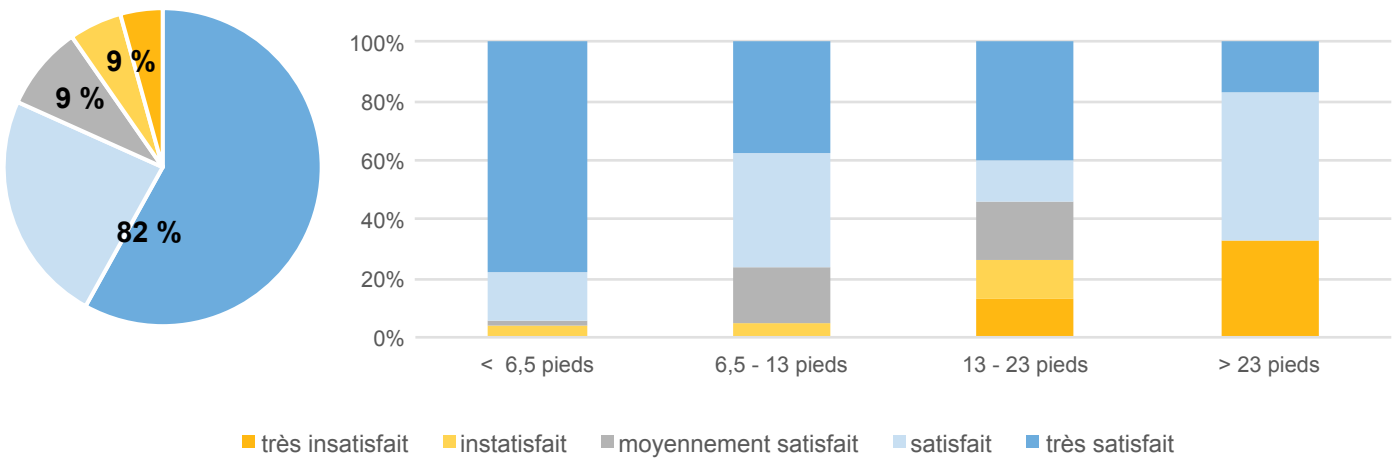
35. À noter que cet inconfort peut être compensé par le fait de pouvoir ajuster le débit de l'air et la température grâce aux diffuseurs ajustables et aux zones de ventilation munis de thermostats.

3.4. Résultats de l'étude

L'éclairage naturel et artificiel : Environ 82% des occupants de la MDD sont très satisfaits ou satisfaits des niveaux d'éclairage naturel dans leurs aires de travail (graphique 3). Or la distance aux fenêtres a une influence majeure sur cette satisfaction. Environ 30% des employés sont insatisfaits lorsqu'ils travaillent à plus de 23 pieds (7 mètres) d'une fenêtre.

GRAPHIQUES 3 ET 4

Satisfaction de l'éclairage naturel (gauche) et par rapport à la distance à une fenêtre (droite).



Environ 43 % des répondants sont *très satisfaits* de l'éclairage artificiel, 31 % en sont *satisfaits*, et 20 % en sont *moyennement satisfaits*. Plusieurs répondants (31 pour être exact) ont par ailleurs noté des problèmes avec l'éclairage³⁶ :

- Douze répondants ont signalé que les détecteurs de mouvement sont déficients et que les lumières s'éteignent fréquemment. Un répondant précise : « la lumière s'éteint trop régulièrement, c'est énervant de devoir gesticuler dans tous les sens pour rallumer la lumière » ;
- Trois répondants ont commenté sur les fluorescents brisés ou appareils d'éclairage des corridors parfois non-fonctionnels ;
- Quatre répondants ont signifié le manque d'éclairage dans les toilettes notamment les soirs ; en revanche, trois répondants ont mentionné qu'il y a trop de lumières allumées en permanence, notamment en soirée, ce qui est « inutile » et « du gaspillage » ;
- Deux répondants se disent frustrés par le fait que les lumières doivent demeurer allumées pour contrôler la ventilation et la température de l'espace. Un répondant explique, « J'ai un bureau fermé, avec fenêtre. Donc je ne veux pas avoir de néon puisque l'éclairage naturel me suffit. De ce fait, je ne peux pas contrôler la température ! Cela me choque de voir la quantité de néons allumés dans les escaliers alors que la lumière naturelle suffirait amplement, je trouve que c'est inacceptable ! » ;
- Deux répondants ont indiqué avoir trop d'éclairage naturel dans leurs bureaux, se disant parfois « éblouis » ou considérant l'éclairage parfois « aveuglant ».

36. À noter qu'un répondant puisse décrire plus d'un problème avec l'éclairage.

Ces résultats montrent que certaines améliorations pourraient être considérées par l'équipe de gestion et opération du bâtiment. Le tableau 8 croise les données qualitatives et quantitatives en comparant les niveaux de satisfaction avec les seuils de référence lumineuse, les niveaux d'éclairage prévus lors de la conception et la mesure réelle (in situ) de ces niveaux prise au cours de cette étude.

TABLEAU 8

Tableau récapitulatif pour l'éclairage à la MDD.

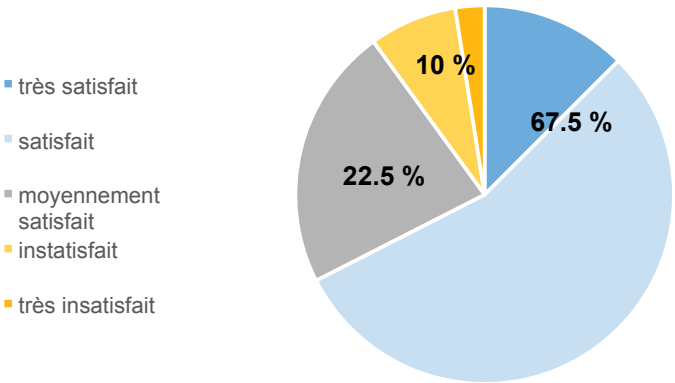
Type d'espace	Seuils de référence de l'industrie	Niveaux prévus pendant la conception	Mesure réelle préliminaire ³⁷	% d'usagers satisfaits ou très satisfaits
Bureau fermé	300 – 500 lux	350 lux	300 – 500 lux	71 % (éclairage naturel) 61 % (éclairage en général)
Aire ouverte	300 – 500 lux	350 lux	210 – 500 lux	85 % (éclairage naturel) 80 % (éclairage en général)

L'intimité visuelle : Environ 71 % des répondants travaillent en aire ouverte. Or les aires ouvertes diffèrent selon les organismes ; par exemple, chez Equiterre les cloisons les plus hautes ont été retirées afin de permettre plus de pénétration de lumière à l'intérieur des locaux (voir les figures 3.5 et 3.6) alors que d'autres organismes ont des cabines de travail avec des cloisons plus hautes.

Les répondants qui travaillent en aire ouverte avec du mobilier muni de cloisons sont *très satisfaits* ou *satisfaits* de leur intimité visuelle (67.5 %, voir graphique 5). Un autre 22.5 % se dit *moyennement satisfait* et seulement 10 % est soit *insatisfait*, soit *très insatisfait*.

GRAPHIQUE 5

Satisfaction de l'intimité visuelle dans les aires ouvertes avec mobilier muni de cloisons.



37. Des mesures approximatives et préliminaires ont été prises lors d'une journée ensoleillée dans différents locaux en aire ouverte ou fermés. Des mesures plus précises et systématiques devront toutefois être prises afin d'établir des résultats plus fiables. Les mesures prises dans les aires ouvertes dotées de mobilier à cloisons hautes sont de 115 à 280 lux plus faibles que celles avec mobilier doté de cloisons basses.

La question de l'intimité visuelle ne s'adressait pas aux occupants des bureaux fermés, supposant qu'elle ne leur était pas applicable (puisque'il s'agit de bureaux privés). Quelques occupants de bureaux fermés ont toutefois répondu à la question. Les résultats (considérés comme une erreur statistique) révèlent qu'ils sont presque 20% moins satisfaits de leur degré d'intimité visuelle que les occupants des aires ouvertes, un fait assez surprenant qui mérite l'attention du client-occupant.



Aires ouvertes chez Equiterre. Photo : Antoine Saito.

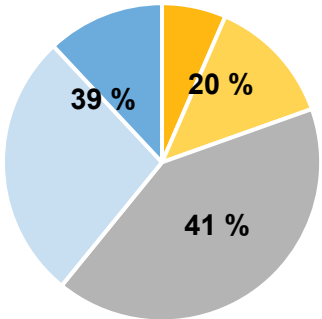


Bureau fermé chez Équiterre. Photo : Antoine Saito.

Confort acoustique des espaces de travail : De tous les indicateurs, le confort acoustique a reçu les pires évaluations des occupants. Seulement 39% des répondants sont *satisfaits* ou *très satisfaits* des niveaux sonores dans leurs espaces de travail (voir graphique 6). Les réponses varient très peu selon la typologie du poste de travail (aire ouverte ou bureau fermé). Là où les deux groupes se distinguent est au niveau de la satisfaction la plus élevée, avec 19 % des répondants en bureaux fermés étant *très satisfaits* comparativement à seulement 9 % en aire ouverte. Bien que cet écart ne soit pas extrême, il est toutefois suffisamment marqué pour laisser croire en un meilleur confort acoustique en bureau fermé.

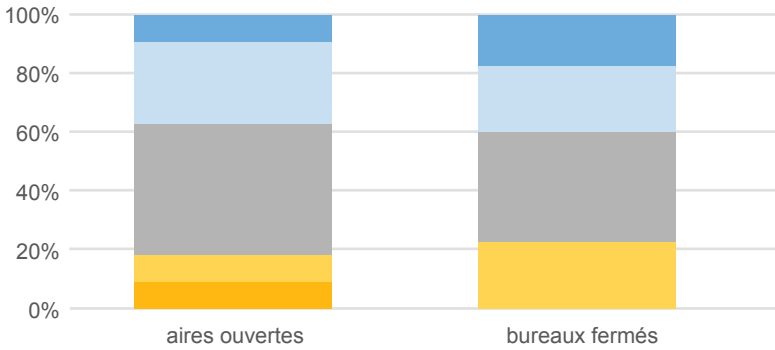
GRAPHIQUE 6

Satisfaction du niveau de bruit dans les espaces de bureaux en général



GRAPHIQUE 7

Niveaux de satisfaction dans les aires ouvertes vs les bureaux fermés



■ très insatisfait ■ insatisfait ■ moyennement satisfait ■ satisfait ■ très satisfait

Les plus grandes nuisances sonores proviennent d'aires ouvertes (72 % comparativement à 28 % de bureaux fermés). Les deux groupes se plaignent de bruits similaires : 32 personnes sont gênées par les conversations entre collègues ou par téléphone ; 25 répondants par les **bruits provenant des systèmes mécaniques du bâtiment** ; et 14 par les **bruits de construction**.

Les résultats concernant le confort acoustique ne répondent que moyennement aux attentes du client-occupant. Des mesures pour atténuer le bruit pourraient être introduites. Le tableau 9 présente les niveaux de bruit de référence, les niveaux prévus lors de la conception et le pourcentage de satisfaction des usagers. Ce tableau serait éventuellement à compléter avec des mesures sur place.

TABLEAU 9

Comparaison des niveaux de bruits de référence de l'industrie, les niveaux prévus lors de la conception et le pourcentage de satisfaction des répondants.

Type d'espace	NC ou NCB maximum de référence	NC ou NCB prévu pendant la conception	% d'usagers satisfaits ou très satisfaits
Bureau privé	30-35	NC-35	41 %
Aire ouverte	35-40	NC-35	38 %

Qualité de l’air : Un premier test de la qualité de l’air à la MDD a été réalisé en 2014 (Ouazia and Booth (2014). Les chercheurs-ingénieurs y ont mesuré cinq variables lors d’une visite en saison de refroidissement et d’une seconde en saison de chauffage : 1) la moyenne et/ou le pourcentage de personnes insatisfaites de leur confort thermique ; 2) la vitesse de l’air ; 3) la différence de température verticale de l’air (DTVA) ; 4) la concentration de CO² ; et 5) l’efficacité de l’élimination des contaminants (vitesse à laquelle un contaminant en suspension dans l’air est éliminé de la pièce). Les variables 1 à 3 mesurent le confort thermique alors que les variables 4 et 5 mesurent la qualité de l’air intérieur du bâtiment.

Les résultats des tests montrent que la stratification de la température et des contaminants et l’efficacité de l’élimination des contaminants ne fonctionnent pas à la MDD tel qu’attendu du système de planchers surélevés avec ventilation intégrée.³⁸ Les concentrations de contaminants sont distribuées de façon uniforme dans les pièces alors qu’elles devraient être plus élevées en partie haute et moins en partie basse. Cela signifie que la stratification de l’air est inopérante et que l’élimination des contaminants est inefficace. Malgré le manque de stratification observé, les niveaux de CO² sont en-deçà des limites prescrites par ASHRAE 62.1-2010. Ainsi, pour les fins de la présente étude, hormis une stratification de l’air optimale, il est possible de conclure que la concentration de CO² est satisfaisante à la MDD et que la qualité de l’air y est donc bonne.

Le second test de qualité de l’air a été commandé par l’équipe de recherche à la compagnie montréalaise EnviroParfait dans le cadre de la présente étude post-occupation. Alors que le principal objectif de ces tests était de comprendre l’impact du mur végétal sur la qualité de l’air du bâtiment de la MDD, le spécialiste a aussi généré de nouvelles données dans trois espaces de bureaux : les aires ouvertes d’Équiterre, le bureau partagé d’Environnement Jeunesse et à la réception des bureaux de la Fondation David Suzuki. Le tableau 3.4 compare la satisfaction des usagers de la qualité de l’air avec les repères de l’industrie, les niveaux prévus lors de la conception et les mesures relevées par EnviroParfait en 2018.

Suivant les paramètres de conception du système de ventilation de la MDD, il est important de souligner qu’en mode “occupé”, ce système distribue un minimum de 3500 litres d’air neuf extérieur par seconde. Il s’agit d’un débit requis pour 412 personnes selon la norme ASHRAE 62.1 – 2004 qui était en vigueur au moment de la conception du bâtiment. Or la fréquentation moyenne quotidienne de la MDD est de l’ordre de 353 personnes, soit nettement en-deçà de la population cible. C’est donc dire que le système est surdimensionné et qu’il fournit aux usagers de la MDD une qualité d’air exemplaire (Équiterre, 2018, p. 17). Les résultats suggèrent aussi que le bâtiment de la MDD est doté d’un système de filtration de l’air très performant.

Les résultats du sondage révèlent que 85% des répondants sont *très satisfaits* ou *satisfaits* de la qualité de l’air (voir graphique 8). 76 % des répondants savent qu’ils peuvent manipuler les diffuseurs d’air dans le plancher pour accroître leur confort. Les résultats révèlent que ceux qui le savent sont 16% plus « *très satisfaits* » que ceux qui ne le savent pas. En effet, 43 % des connaisseurs se disent *très satisfaits* de la qualité de l’air comparativement à 27 % pour les non connaisseurs. Ceci suggère qu’il pourrait exister un lien entre la connaissance du fonctionnement du système et la satisfaction en termes de qualité de l’air.

38. Pour plus de précisions sur celui-ci et sa performance, le lecteur est invité à consulter le Volet 2.

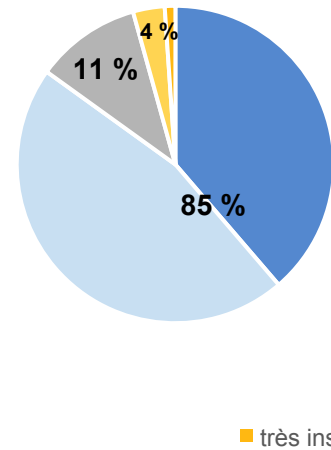
TABLEAU 10

Tableau récapitulatif pour la qualité de l’air à la MDD – les relevés de 2018 proviennent du rapport sur la qualité de l’air préparé par Thorpe (2018).

Aspect de qualité de l’air	Seuils de référence de l’industrie	Niveaux prévus lors de la conception	Mesures relevées à la MDD (gamme) en 2018	% d’employés de la MDD <i>satisfaits</i> ou <i>très satisfaits</i> avec « la qualité de l’air »
Concentration CO ²	600 à 800 ppm 11 ppm [8 h] (Santé Canada) Seuil de risque sanitaire = 5 000 ppm	n/a	< 850 ppm* * Il y’a souvent des inexactitudes dans ces mesures à l’ordre de +/- 50 ppm	85 %
Concentration moyenne de PTS	< 50 µg/m ³ (AHRAE 62-1999) < 75 µg/m ³ (Santé Canada)	n/a	10 µg/m ³ (bureaux Équiterre) 12 µg/m ³ (bureaux EnJEU) 16 µg/m ³ (bureaux Fondation David Suzuki) 40 µg/m ³ (couloir au 4 ^e étage)	
COV totaux	< 0,5 ppm (Santé Canada)	n/a	< 0,23 ppm	
Quantité d’air neuf	> 8,5 L/ sec /personne (ASHRAE)	5 pcm/personne 0,06 pcm/pi.ca.	Environ 10 L/sec/ personne	
Humidité	30 à 60% (ASHRAE 55-2004 et Santé Canada)	20 à 60 %	41 – 65 %	
Température	20-24 °C en hiver, 23-26 °C en été	22 à 25 °C	Pour la plupart, entre 22 et 25 °C (25,9 °C dans les bureaux d’Équiterre)	

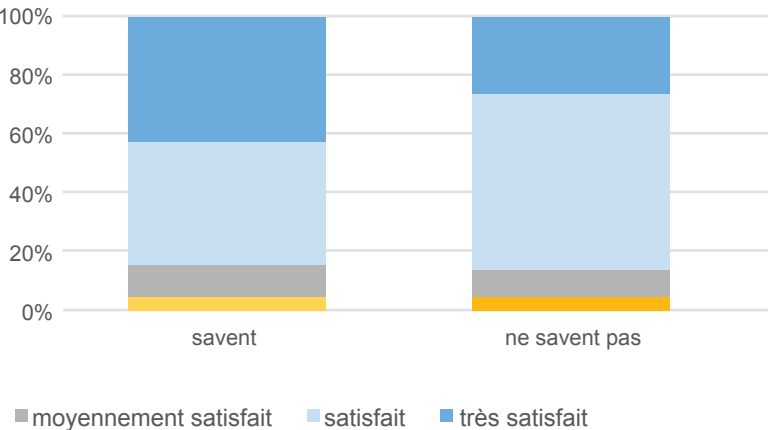
GRAPHIQUE 8

Satisfaction de la qualité de l'air



GRAPHIQUE 9

Satisfaction de la qualité de l'air pour les personnes qui savent qu'elles peuvent manipuler le débit d'air par les diffuseurs vs. les personnes qui ne le savent pas



Étant donné que la qualité de l'air du bâtiment de la MDD est conforme aux normes de l'industrie, que l'alimentation en air neuf y est supérieure aux normes ASHRAE et que 85 % des répondants du sondage sont satisfaits de la qualité de l'air dans leurs espaces de travail, la performance des aires de bureaux du bâtiment en regard de cet indicateur devrait répondre aux attentes du client-occupant.

Confort thermique : L'équipe de recherche a analysé des données provenant de deux études sur le confort thermique (Ouazia et Booth, 2014; et Mercier, 2012), ainsi que celles du sondage. Les indicateurs de performance de cette section sont : **la vitesse de l'air, la différence de température verticale de l'air (DTVA), le pourcentage d'insatisfaction et la satisfaction des usagers.**

Ouazia et Booth avaient émis l'hypothèse que la vitesse de l'air et la stratification de la température (se mesurant par la DTVA) issues du système de planchers surélevés auraient pu causer de l'inconfort. En effet, comme ce système injecte de l'air à une température inférieure à la température ambiante et directement dans le volume occupé (par le bas) plutôt que par le plafond, les occupants auraient pu sentir des courants d'air et avoir froid aux jambes. Ainsi, ils ont tenté d'évaluer l'inconfort pouvant résulter de la vitesse de l'air projeté par les diffuseurs d'air au plancher. Ils ont mesuré celle-ci à différentes hauteurs dans les espaces de bureaux en hiver (chauffage) et en été (refroidissement), et ils ont trouvé qu'en général elle était inférieure à la limite de 0,15 m/s fixée dans leur étude. Par ailleurs, la vitesse de l'air mesurée durant la saison de refroidissement dépassait cette limite. De ce fait, les résultats démontrent une vitesse de l'air satisfaisante qui ne devrait en général pas causer d'inconfort auprès des occupants sauf en été.

En termes de stratification de la température, Ouazia et Booth ont trouvé que les **différences de température verticale de l'air (DTVA)** mesurées étaient inférieures à 1 °C entre le plancher et le plafond durant la saison de chauffage, et inférieures à 0,2 °C durant celle de refroidissement. Ceci signifie une très faible stratification de la température (et donc de l'air), et de ce fait des niveaux de température uniformes dans le volume des pièces qui devraient contribuer au meilleur confort thermique des occupants.³⁹ Ce résultat de faible stratification de la température est un peu paradoxal. En effet on vise une faible stratification thermique pour

39. À noter que la norme ASHRAE 55-2010 recommande une DTVA maximale de 3 °C entre les niveaux du talon et de la tête (ibid) et de 5 °C entre le plancher et le plafond.

des raisons de confort (ici atteint), mais un haut niveau de stratification de contaminants pour une meilleure qualité de l'air, un phénomène qui dépend d'une bonne stratification thermique.

Enfin, Ouazia et Booth ont évalué le **pourcentage d'insatisfaction (PI)** de la norme ASHRAE 55-2010 en fonction de facteurs environnementaux thermiques (vitesse de l'air, humidité relative et température de l'air) et de facteurs personnels (niveau d'activité et vêtements). L'indice PI a été calculé à différentes hauteurs en saisons de chauffage et de refroidissement. Les auteurs ont noté un environnement confortable durant la saison de chauffage et moins confortable durant celle de refroidissement.

En résumé, l'étude de Ouazia et Booth a révélé que les indices relatifs au confort thermique (vitesse de l'air, DTVA, et PI) se situaient généralement à l'intérieur des limites acceptables lors des essais durant la saison hivernale (de chauffage), alors que les valeurs du PI obtenues durant la saison estivale (de refroidissement) étaient hors de la zone de confort recommandée par la norme ASHRAE 55-2010 (ibid).

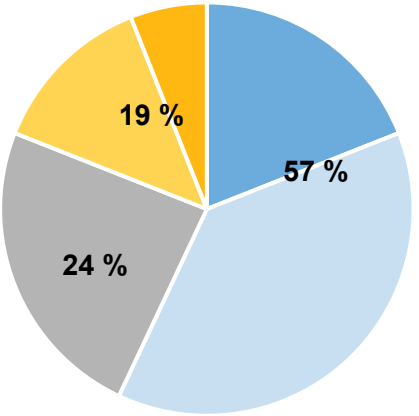
L'étude de 2012 (Mercier, 2012)⁴⁰ a pour sa part révélé des variations de température et de niveau de confort quotidiennes et saisonnières. D'une perspective quotidienne et dans les aires ouvertes, les occupants disaient se sentir *confortables* le matin tout en souhaitant plus de mouvement d'air. En après-midi, ils trouvaient l'espace un peu froid, souhaitant augmenter la température sans toutefois modifier le mouvement d'air. En termes saisonniers, l'étude indique que les occupants étaient légèrement inconfortables tant en été qu'en hiver, du fait d'avoir plus chaud en hiver et plus froid en été. Les répondants ont de plus noté des différences de température journalière importantes tout en jugeant les taux d'humidité et le mouvement d'air acceptables, tant en été qu'en hiver.

Les résultats du sondage sur le confort, bien-être et fonctionnalité des espaces de la MDD indiquent que 57 % des occupants sont *satisfaits* ou *très satisfaits* du niveau de confort thermique, 24 % en sont *moyennement satisfaits*, et 19 % en sont *insatisfaits* ou *très insatisfaits*. Ces résultats confirment que la satisfaction des occupants se trouve proche de celle du standard d'ASHRAE si l'on considère que moins de 20% d'usagers sont insatisfaits. Or, il ne faut pas négliger le fait qu'ici plus de 40 % des occupants sont *moyennement satisfaits* ou carrément *insatisfaits*. En termes d'inconfort hivernal, 45 % des occupants disent avoir froid et seulement 9 % ont chaud (le reste a coché « sans objet »). En termes d'inconfort estival, 39 % indiquent avoir froid et seulement 12 % avoir chaud (le reste a coché « sans objet »). Donc tant en été qu'en hiver, les employés ont tendance à avoir froid.⁴¹

GRAPHIQUE 10

Satisfaction des répondants en termes de niveau de confort (été et hiver combiné)

- très satisfait
- satisfait
- moyennement satisfait
- insatisfait
- très insatisfait

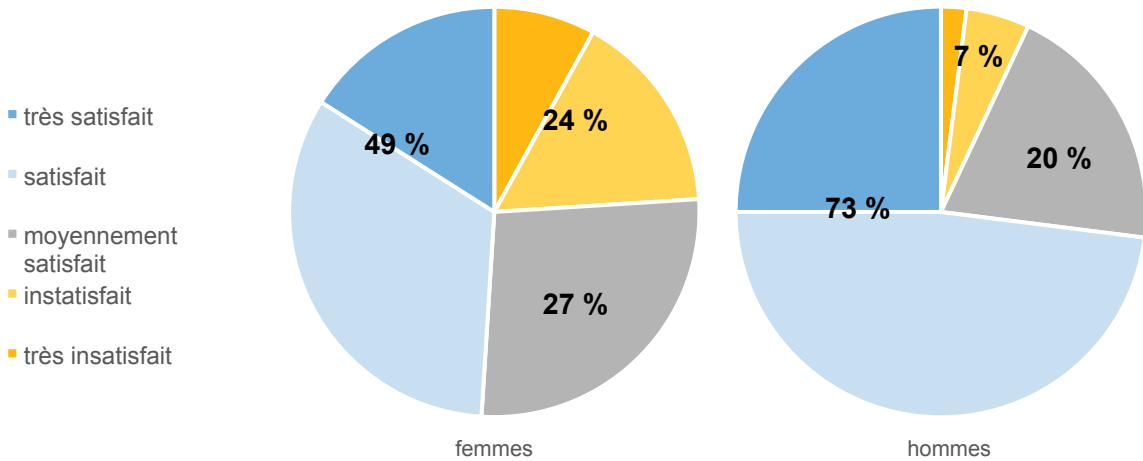


40. Réalisée par un étudiant de l'Université Laval.
41. Il faudrait préciser que ce sont des pourcentages pour l'ensemble des répondants. En excluant les répondants qui ont coché « sans objet », les résultats sont : En cas d'inconfort hivernal, 84 % des occupants qui ont coché « chaud » ou « froid » ont tendance à avoir froid et seulement 16 % ont chaud. En cas d'inconfort estival, 77 % des occupants ont tendance à avoir froid et seulement 33 % ont chaud.

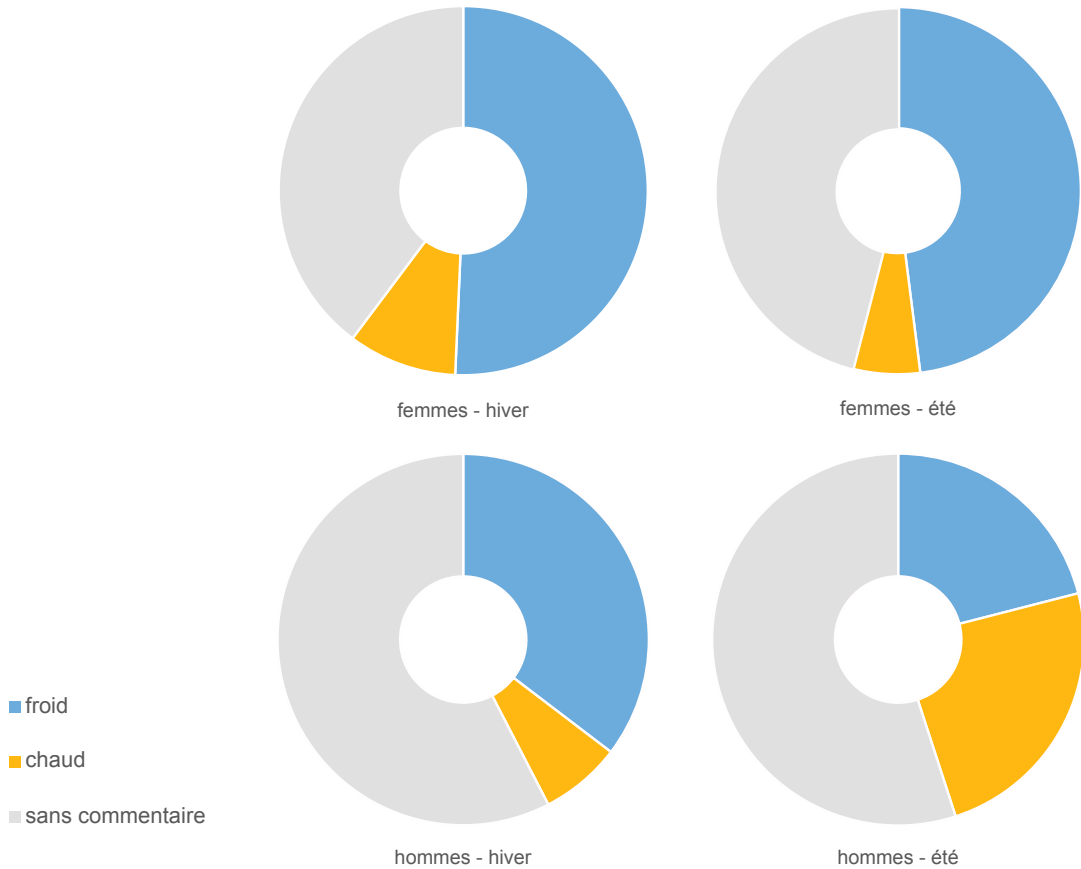
L'équipe de recherche a jugé opportun d'approfondir la compréhension du volet du confort thermique en cherchant à savoir quels facteurs et conditions en influencent les niveaux. Cinq variables ont été explorées : femmes vs. hommes, aires ouvertes vs. bureaux fermés, emplacement des organismes, manipulation des diffuseurs d'air et tranches d'âge. Le dernier a été éliminé par manque de corrélation.

Femmes vs. hommes : Les femmes sont moins satisfaites de leur confort thermique que les hommes : il existe un écart de 24 % entre les hommes *très satisfaits* ou *satisfaits* et les femmes *très satisfaites* ou *satisfaites*. De plus, 24 % des femmes sont *insatisfaites* ou *très insatisfaites*, comparativement à 7 % d'hommes *insatisfaits* ou *très insatisfaits*. En termes d'inconfort (hivernal ou estival), 50 % des femmes signalent avoir plutôt froid comparativement à seulement 28 % pour les hommes. De plus, 8 % des femmes ont chaud, comparativement à 16 % des hommes. Ces résultats gagnent en importance considérant que 67 % des répondants au sondage sont des femmes. Ils suggèrent que l'un des facteurs possibles de moindre confort à la MDD serait lié à une plus grande proportion de femmes, lesquelles semblent plus sensibles au froid.

GRAPHIQUE 11
Comparaison de la satisfaction du confort thermique entre femmes et hommes.



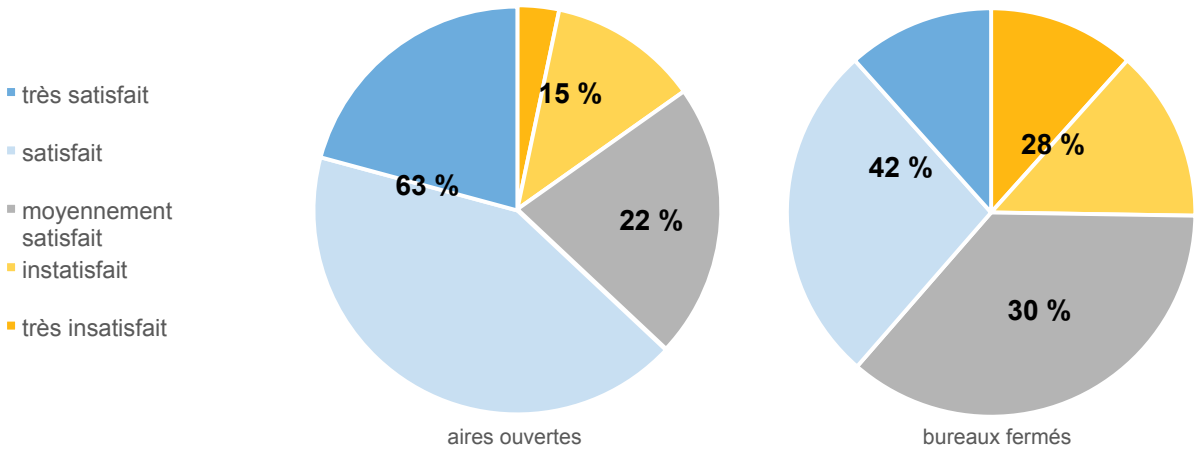
GRAPHIQUE 12
Tendance des femmes et des hommes à avoir froid ou chaud, en été et en hiver.



Aire ouverte vs. bureaux fermés : En général, les occupants qui travaillent en aire ouverte sont plus confortables que ceux en bureaux fermés. En effet, 63 % des occupants en aire ouverte sont *très satisfaits*, ou *satisfaits*, comparativement à 42 % pour les occupants en bureaux fermés. À l'autre extrémité, 15 % des occupants en aire ouverte sont insatisfaits alors que 28 % des occupants en bureaux fermés le sont (voir graphique 13). Ces chiffres démontrent qu'en bureaux fermés, le confort thermique tel que défini par ASHRAE n'est pas atteint. Ils sont de plus corroborés par le fait que plusieurs parmi ceux qui travaillent en bureaux fermés ont tendance à avoir froid tant en hiver qu'en été (soit 58 %).

GRAPHIQUE 13

Satisfaction du confort thermique des répondants en aires ouvertes vs bureaux fermés.



Emplacement des organismes : Il a également été possible de regrouper les données de confort thermique par organisme. L'équipe de recherche a ainsi pu repérer les organismes avec le moindre et le meilleur confort thermique (voir graphique 14).

Les organismes au moindre confort thermique sont :

- SPPMM – 54% sont *insatisfaits*, 17 % sont *moyennement satisfaits* et 29 % sont *satisfaits*
- Vivre en Ville – 54 % sont *insatisfaits*, 8 % sont *moyennement satisfaits* et 38 % sont *satisfaits*
- Fondation David Suzuki – 42 % sont *insatisfaits*, 17 % sont *moyennement satisfaits* et 42 % sont *satisfaits*

Les organismes au meilleur confort thermique sont :

- CDEC, Humanité et Inclusion et Trajectoire (avec 100 % de satisfaction)
- Aequo – 75 % sont satisfaits et 25 % sont *moyennement satisfaits*
- Conseil régional de l'environnement de Montréal – 67 % sont *satisfaits* et 33 % sont *moyennement satisfaits*
- La MDD – 67 % sont *satisfaits* et 33 % sont *insatisfaits*
- Il faut noter que 100 % des répondants de Regroupement des conseils nationaux et 71 % de ceux d'Amnistie Internationale sont *très satisfaits* de leur confort thermique en été, alors que 71 % des répondants d'Equiterre le sont en hiver. Le graphique 14 montre le niveau de satisfaction global (hiver et été combinés) pour les organismes du bâtiment de la MDD.

GRAPHIQUE 14

Satisfaction du confort thermique par organisme, hiver et été combinés.

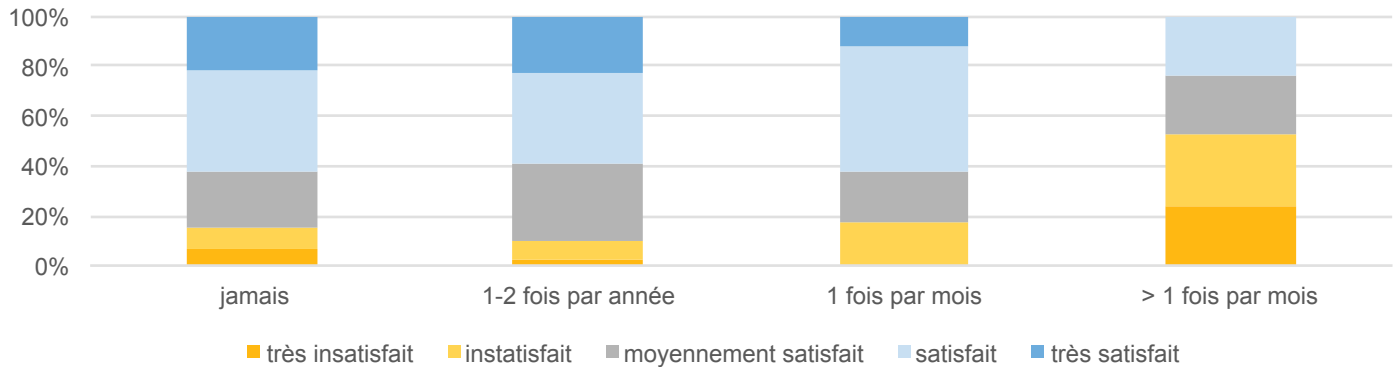


À défaut d’une étude plus approfondie, il est difficile de formuler une explication au fait que les occupants de certains organismes soient plus satisfaits de leur confort thermique que ceux d’autres organismes. Le même problème se pose en ce qui concerne la variabilité de perception de température (plus chaude ou plus froide) selon les organismes. Or cette étude en propose deux hypothèses. Premièrement, les organismes avec une prépondérance de femmes répondantes pourraient être ceux signalant un moindre confort thermique et où l’on aurait plutôt froid. Deuxièmement, les bureaux ayant subi des rénovations impliquant des changements aux contrôles électromécaniques et à l’emplacement des diffuseurs d’air pourraient avoir des niveaux de satisfaction thermique moindres ou plus élevés que la norme. Ces hypothèses pourront être validées lors d’une étude future.

Manipulation des diffuseurs d’air : Alors que 76 % des répondants savent qu’ils peuvent manipuler les diffuseurs au plancher pour ajuster la température et le débit d’air dans leur espace de travail, 30 % ne les manipulent jamais, 37 % les manipulent *une à deux fois par année* et 17 % environ *une fois ou plus par mois*. Cela signifie que très peu d’occupants se prévalent du contrôle sur leur environnement qui leur est permis par le système de diffuseurs ajustables. Or ironiquement, pour ceux qui le font le plus fréquemment, il semble y avoir un lien marqué avec l’inconfort thermique. En effet, ces 17% d’occupants connaisseurs qui manipulent le plus fréquemment les diffuseurs d’air sont insatisfaits de leur confort thermique à près de 53%, alors que pour les autres groupes (fréquence moins élevée), le taux d’insatisfaction est en-deçà de 20%. De plus, 61 % de ceux-ci ont froid en hiver et 67 % ont froid en été, indiquant que ces personnes sont significativement moins satisfaites de leur confort thermique (alors qu’elles le sont davantage avec la qualité de l’air). Ces résultats suggèrent d’une part que les employés n’exploitent pas à son plein potentiel le contrôle sur l’environnement de travail qui leur est permis.

GRAPHIQUE 15

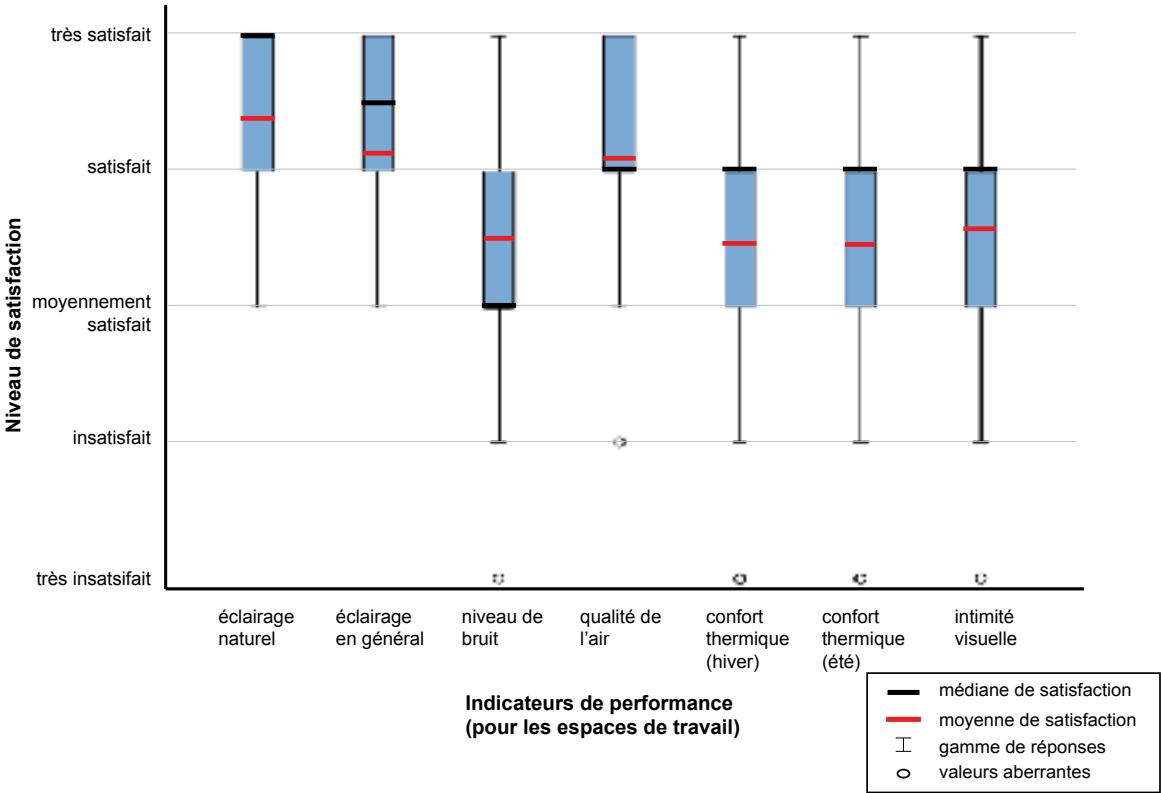
Satisfaction et fréquence de manipulation des diffuseurs d'air.



En conclusion, cette analyse démontre que les résultats sur le confort thermique seraient probablement moins positifs que ne le souhaiterait le client-occupant. Certes, les résultats obtenus seraient acceptables ou même bons dans le cas d'un bâtiment conventionnel (et ils se conforment en partie avec la définition de confort d'ASHRAE). Or la MDD n'est pas un bâtiment conventionnel. Il s'agit d'un édifice où des efforts considérables (économiques et non-économiques) ont été réalisés pour introduire un système de ventilation innovateur sensé offrir un niveau de confort supérieur. Or la performance de ce système n'est pas au rendez-vous à cet effet. Il y a ici lieu de considérer l'amélioration du confort thermique notamment des femmes et des occupants des bureaux fermés. Augmenter un peu la température et sensibiliser les occupants sur le contrôle possible de leur confort thermique grâce aux thermostats et diffuseurs d'air par le plancher en seraient de très simples mesures à y considérer. Il y aurait également lieu de mieux expliquer le fonctionnement de ces diffuseurs pour un usage optimal. Enfin, les résultats globaux des cinq indicateurs sont présentés au graphique 17.

GRAPHIQUE 16

Les médianes, gammes de réponses, valeurs aberrantes, distribution des données et moyennes de satisfaction pour 5 indicateurs de performance.



Productivité et bien-être des occupants : L'étude sur le confort réalisée par Mercier (2012) a démontré que les occupants de l'époque trouvaient que le bâtiment dans son ensemble avait un effet positif sur leur productivité. En moyenne, ils indiquaient que la MDD augmentait leur productivité de 10 % comparativement à un bâtiment standard (page 5). Or certains répondants de cette étude se plaignaient d'un inconfort thermique (épisodes de chaleur et de froid dans les aires de bureaux) affectant défavorablement leur productivité. Six ans plus tard, les occupants actuels de la MDD continuent à croire que le bâtiment contribue positivement à leur productivité et à leur bien-être. En effet, 76 % des occupants sont *d'accord* ou *totalement d'accord* que la MDD contribue à leur productivité et 80 % sont *d'accord* ou *totalement d'accord* qu'elle contribue à leur bien-être. De plus, 75 % des occupants affirment que la MDD a un impact positif sur leur santé.

L'équipe de recherche de la présente étude ne peut identifier les composantes architecturales et fonctionnelles (et autres facteurs) contribuant à cette très bonne évaluation. Néanmoins, des questions au sondage de 2018 ont été posées quant à l'impact du mur végétal et de la terrasse au toit sur le bien-être des occupants au travail, comme il s'agit de deux composantes jugées de grande valeur ajoutée à la MDD.

En ce qui concerne le mur végétal, 41 % des occupants sont *tout à fait d'accord* et 28 % sont *plutôt d'accord* qu'il contribue à leur bien-être alors qu'il n'y contribue *plutôt pas* pour seulement 10 %. De plus, 74 répondants ont élaboré sur les raisons pour lesquelles le mur végétal contribue à leur bien-être. (voir tableau 11). Les répondants ont également conféré plusieurs qualificatifs au mur : relaxant, apaisant, distinctif, innovant, amusant, énergisant, rafraichissant, revigorant, motivant, majestueux, vivant, calmant, et reposant.

TABEAU 11

La contribution du mur végétal au bien-être des occupants.

Nbre. de répondants	Raisons pour lesquelles le mur végétal contribue au bien-être au travail
37	La beauté ou les qualités esthétiques du mur végétal
14	La qualité de l'air à laquelle contribue le mur végétal
7	Le son agréable de l'eau
4	L'image de la MDD qui est renforcée par le mur végétal (un symbole qui donne du prestige)
5	L'atmosphère et l'agréable vue qu'il offre en entrant dans le bâtiment le matin

Quant à la terrasse sur le toit, 54 % des répondants sont *d'accord* ou *complètement d'accord* qu'elle contribue à leur bien-être, 13 % sont *assez d'accord*, 21 % disent *non, pas vraiment*, et les derniers 12 % pensent que *non, pas du tout*. Alors qu'un grand pourcentage d'occupants trouve que la terrasse favorise leur bien-être, elle est peu fréquentée. Le tableau 12 ci-dessous résume sa fréquence d'utilisation.

TABLEAU 12

Fréquence (par an) de l'utilisation de la terrasse sur le toit de la MDD.

Jamais / presque jamais	< 5 fois par an	6 – 10 fois par an	11 – 20 fois par an	21 – 40 fois par an	> 40 fois par an
12	41	13	14	4	4

Les motifs cités par les répondants pour qui la terrasse contribue *tout à fait* à leur bien-être sont qu’il s’agit d’un lieu ensoleillé, privé, et idéal pour relaxer ou se changer les idées. Par ailleurs, certains commentaires plutôt négatifs ont été énoncés : la terrasse n’est pas invitante, le mobilier y est trop réfléchissant, elle est trop petite, il y a trop de monde et il n’y a pas d’ombre. Ces résultats sur la contribution au bien-être des occupants du mur végétal et de la terrasse sur le toit offrent une opportunité importante au client-occupant d’apprécier les décisions prises lors de la conception du bâtiment.

Pour conclure, le client-occupant peut être satisfait des résultats concernant la productivité, le bien-être et la santé des occupants de la MDD. Les répondants aux deux sondages (2012 et 2018) ont évalué ces aspects très favorablement. Les résultats du sondage indiquent que la majorité des répondants sont d’accord avec le fait que le mur végétal et la terrasse sur le toit soient des éléments qui contribuent à leur bien-être. Il s’agit d’investissements apportant une plus-value à la MDD. Or certaines mesures pourraient toutefois être apportées pour améliorer la fréquentation de la terrasse.

Les bureaux à aire ouverte : L’équipe de recherche a comparé les moyennes de satisfaction pour 5 indicateurs de performance propres aux espaces de travail (voir la figure 3.19).

Il est surprenant de constater qu’à l’exception du confort acoustique (niveau de bruit), les répondants travaillant en aire ouverte sont plus satisfaits que les personnes en bureaux fermés. Quant à l’évaluation du niveau de bien-être et de productivité, les réponses étaient presque égales pour les personnes en aire ouverte et en bureaux fermés. Enfin, les répondants ont été invités à énumérer les avantages et les inconvénients des aires ouvertes sur la productivité et le bien-être (voir tableau 13).

GRAPHIQUE 17

Les moyennes de satisfaction selon les répondants en bureaux en aire ouverte versus bureaux fermés. Les occupants en bureaux fermés n’ont pas été sondés sur l’intimité visuelle.

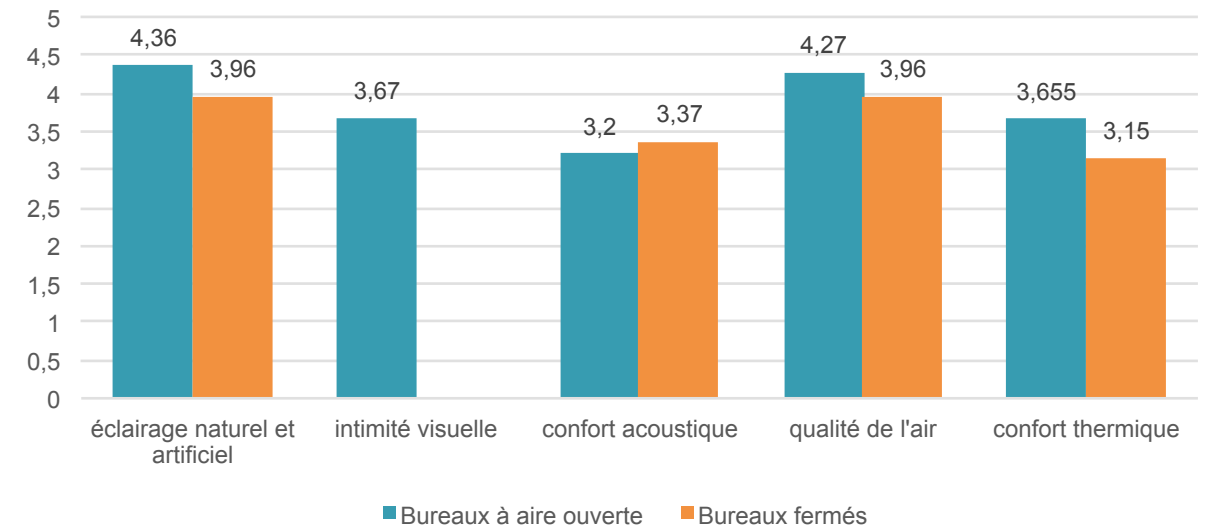


TABLEAU 13

Les avantages et inconvénients des aires ouvertes sur la productivité et le bien-être des occupants.

No. de réponses	Avantages des aires ouvertes	No. de réponses	Inconvénients des aires ouvertes
44	Proximité à ses collègues : aspects sociaux et conviviaux	51	Nuisances sonores (collègues qui parlent entre eux ou au téléphone)
21	Proximité à ses collègues : facilité de collaboration et travail en équipe	17	Manque d’intimité et de confidentialité
12	Luminosité, le sentiment d’ouverture, la ventilation ou aération de l’espace	2	Manque d’intimité visuelle et présence de distractions visuelles
2	Acquisition de connaissances par ses collègues	1	Mauvaises odeurs
1	Aplanissement de la hiérarchie	1	Vibrations des murs / planchers

Ces résultats indiquent qu’il n’existe aucun problème significatif avec les bureaux en aire ouverte au bâtiment de la MDD. Au contraire, les répondants travaillant en aire ouverte se disent en moyenne plus satisfaits de leur environnement de travail que les répondants en bureaux fermés. Il n’y a pas une diminution de leur productivité ou de leur bien-être tel que relaté dans des études récentes de Harvard et Oxford Economics. Ils l’évaluent plutôt de façon équivalente à ceux des répondants en bureaux fermés. Ces résultats suggèrent ainsi que le client-occupant devrait être satisfait des aires ouvertes telles que conçues à la MDD.

3.5. Conclusions et recommandations

Le bâtiment de la MDD est principalement un édifice à bureaux, offrant presque 40,000 pi.ca. d’espaces de bureaux à environ une vingtaine d’organismes. Dans ce contexte, le client-occupant a voulu évaluer les niveaux de confort, de productivité et de bien-être de leurs occupants. Comme la grande partie de ces bureaux a été conçue sous forme d’aires ouvertes – une typologie spatiale visant à promouvoir la collaboration et optimiser l’espace construit – le client-occupant a également voulu comprendre s’il existait des problèmes liés à cette typologie spatiale à la MDD. Ultimement, il cherchait à valider si les espaces de bureaux répondaient au premier objectif énoncé dans la charte du projet, soit d’offrir un environnement de travail de grande qualité.

Étant donné que la qualité des espaces de bureaux était un enjeu prioritaire pour le client, les questions suivantes ont été posées : Les espaces de bureaux répondent-ils aux attentes du client ? Comment les espaces de travail du bâtiment de la MDD performant-ils en termes d’indicateurs de qualité environnementale intérieure ? Comment les occupants évaluent-ils leur confort, bien-être et productivité ? Quels sont les problèmes, le cas échéant, liés aux espaces de bureaux en aire ouverte ? Et quelles recommandations pourraient être faites afin d’améliorer l’environnement de travail des occupants ? Afin de répondre à ces questions, l’équipe de recherche a réalisé une analyse de la littérature traitant d’espaces de bureaux, de confort et d’études post-occupation d’ordre qualitatif, ainsi qu’une revue de documents de la MDD et du projet. Elle a également conduit des entretiens avec des experts, et a généré de nouvelles données relatives à la qualité de l’air. Enfin, elle a analysé les résultats d’un sondage auprès des occupants du bâtiment. Les données recueillies ont donné lieu à la présentation de résultats à la fois d’ordre quantitatif et qualitatif.

Pour évaluer la qualité environnementale intérieure des aires de bureaux, l'équipe de recherche a retenu cinq indicateurs de performance: l'éclairage naturel et artificiel, l'intimité visuelle, le confort acoustique, la qualité de l'air et le confort thermique. Deux autres indicateurs ont servi à l'évaluation de leur performance fonctionnelle, soit la productivité et le bien-être des occupants. L'ensemble des résultats de l'étude démontre que la grande majorité des occupants apprécie le fait de travailler dans le bâtiment, évaluant son confort, bien-être et productivité très positivement. En général, les occupants sont satisfaits de l'éclairage, de la qualité de l'air et du niveau d'intimité visuelle dans les aires ouvertes. Le confort acoustique a quant à lui été évalué moins favorablement que les précédents indicateurs de performance. Enfin, alors qu'une récente littérature soulève plusieurs polémiques liées aux bureaux en aire ouverte, les résultats du sondage démontrent que dans le cas de la MDD, il n'existe aucun problème significatif à ce titre. En effet, les répondants travaillant en aires ouvertes se disent en moyenne plus satisfaits que ceux travaillant en bureaux fermés.

Le niveau de confort thermique répond en partie aux standards ASHRAE. Cependant, l'analyse démontre qu'il y a des déficiences importantes quant à ce critère. Certes, les résultats obtenus seraient acceptables ou même bons dans le cas d'un bâtiment conventionnel. Or la MDD n'est pas un bâtiment conventionnel. Il s'agit d'un édifice où des efforts considérables (économiques et non-économiques) ont été réalisés pour introduire un système de ventilation innovateur sensé offrir un niveau confort supérieur. Or la performance de ce système n'est pas au rendez-vous à cet effet, et ainsi, il est possible de conclure que la performance sur le confort thermique est déficiente. En langage de gestion immobilière, on pourrait se questionner à savoir si « le retour sur l'investissement » en termes économiques et non-économiques a été entièrement atteint.

L'étude révèle par ailleurs que certains aspects doivent être considérés dans la conception de ces aires ouvertes, incluant : l'accès à l'éclairage naturel, le contrôle de l'éclairage, du débit de l'air et de la température, la disponibilité des espaces pour des

appels et des rencontres à caractère confidentiel, la disponibilité d'espaces de socialisation, la fourniture de meubles ajustables et ergonomiques, la réduction du bruit, et la sensibilisation des occupants en ce qui concerne la personnalisation de leur espace de travail.

Recommandations pour le client-occupant : Certaines améliorations sont possibles dans le bâtiment. Concernant l'éclairage, les occupants ont signalé des problèmes avec les détecteurs de mouvement liés aux appareils d'éclairage dans les salles de conférence et les bureaux partagés, ainsi que des problèmes liés avec l'éclairage dans les corridors et les toilettes le soir. Il est possible de re-calibrer les senseurs ou d'étendre leur couverture afin qu'ils soient plus sensibles à la présence humaine. Les occupants ont également déploré le grand nombre d'appareils d'éclairage allumés en permanence, ce notamment en soirée. Il est donc souhaitable de s'assurer que les lumières ne demeurent pas allumées le soir en installant des détecteurs de mouvement dans les zones publiques de la MDD et de garder le nombre de lumières allumées nécessaires pour la sécurité incendie au minimum.

Afin de bonifier l'intimité des employés en aire ouverte, des cloisons ajustables translucides pourraient être fournies, de façon à créer au besoin un filtre visuel tout en laissant pénétrer la lumière naturelle. Au registre des niveaux de bruit dans les espaces de bureaux, plusieurs répondants ont soulevé des nuisances sonores, notamment les conversations téléphoniques et le bruit provenant des téléphones cellulaires. Pour remédier à ces problèmes, une solution ici possible serait d'aménager des cabines téléphoniques. Une seconde serait d'éviter de localiser les bureaux des employés requérant un maximum de concentration face aux aires communes et de circulation.

Concernant la qualité de l'air et le confort thermique, les résultats révèlent que les employés n'exploitent pas à son plein potentiel le contrôle sur l'environnement de travail qui leur est permis par la configuration du système mécanique. Pour maximiser leur confort, celui-ci offre notamment la possibilité d'ajuster la température et le débit d'air provenant des diffuseurs au plancher selon leurs besoins, ce que la majorité des occupants ne fait pas. Pour leur part,

ceux qui le font le plus fréquemment ne semblent pas le faire adéquatement, indiquant un niveau non négligeable d'inconfort. Il serait en ce sens souhaitable de rappeler aux employés le fonctionnement du système mécanique et les consignes afférentes en matière de contrôle thermique. Ceci leur conférerait un rôle plus actif dans l'atteinte et le maintien de leur confort individuel, soit l'un des objectifs sous-jacents au choix d'un tel système. Une légère augmentation de la température serait également à considérer afin d'accroître le confort pour les personnes plus frileuses. Pour les occupants des bureaux fermés dont l'un s'est plaint du fait que le système de ventilation soit lié aux détecteurs de mouvement (qui fonctionnent seulement avec les lumières allumées), il serait peut-être souhaitable de rendre ces deux systèmes indépendants l'un de l'autre.

En ce qui concerne plus spécifiquement l'aménagement de la terrasse sur le toit, plusieurs répondants ont signifié le désir d'avoir plus d'ombre et du mobilier moins réfléchissant. Il serait opportun d'apporter un peu plus de confort à cette terrasse pour accroître sa fréquentation.

En conclusion, cette étude de la performance du bâtiment de la MDD offre des réflexions pertinentes pour l'industrie de la construction. Dans un projet d'immeuble corporatif durable ayant obtenu la certification LEED du plus haut niveau qui soit, c'est-à-dire Platine, le client a priorisé avant tout l'être humain. L'analyse de certains critères dans d'autres volets de cette étude post-occupation a révélé que le choix de prioriser le confort et le bien-être de l'occupant pouvait nuire à la performance du bâtiment à d'autres égards (par exemple à son efficacité en termes d'occupation). Dans d'autres cas, on observe des écarts entre la performance attendue en vertu de choix de conception et la performance réelle du bâtiment (par exemple, en ce qui concerne la performance énergétique). Or la présente étude démontre et soutient que cette décision de mettre à l'avant plan l'être humain est une stratégie qui contribue grandement à la matérialisation d'un environnement de travail de haute qualité. Cet environnement bien pensé – et dès lors invitant – participe favorablement au bien-être de l'employé-occupant et à sa productivité. Il s'agit

d'une équation qui devrait ultimement se traduire en un accroissement de la performance organisationnelle des différents locataires de la MDD, une dimension non négligeable de la performance pour les divers organismes qui l'habitent. De ce fait, il est tout à fait opportun de conclure que – à l'exception des questions du confort thermique et acoustique – les espaces de bureaux de la MDD doivent entièrement répondre aux attentes du client-occupant en vertu de sa première préoccupation qu'est celle de privilégier l'humain. Ainsi, la conclusion la plus importante à tirer dans ce présent volet est que l'être humain ne devrait jamais être sous-estimé dans la conception d'édifices à bureaux écoresponsables.

Références

Baird, George, & Dykes, Clare. (2010). Acoustic Conditions in Sustainable Buildings—Results of a Worldwide Survey of Users’ Perceptions. *Building Acoustics*, 17(4), 291–304.

Baker, Nick, & Standeven, Mark. (1996). Thermal comfort for free-running buildings. *Energy and Buildings*, 23(3), 175–182.

Bellingar, Teresa A, & Kupritz, VW. (2011). Privacy matters. In Haworth (Ed.), *Knowledge + research* (Vol. 1, pp. 2014).

Bernstein, Ethan S, & Turban, Stephen. (2018). The impact of the ‘open’workspace on human collaboration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences*, 373(1753), 20170239.

Bertier, Marc, & Perin, Sandra. (2017). *Open space : entre mythes et réalités*. Paris: LE CAVALIER BLEU.

Brand, Jay L. (2009). Should Your Company Transition from Traditional Private Offices to an Open Office Plan? *Change/Transition Management White Paper*, 5.

Brown, Zosia, Cole, Raymond J, Robinson, John, & Dowlatabadi, Hadi. (2010). Evaluating user experience in green buildings in relation to workplace culture and context. *Facilities*, 28(3/4), 225–238.

Charles, Kate E, Reardon, JT, & Magee, Robert John. (2005). *Indoor air quality and thermal comfort in open-Plan offices: Institute for Research in Construction*, National Research Council of Canada.

Charles, K. E., Danforth, A., Veitch, J. A., Zwierzchowski, C., Johnson, B., & Pero, K. (2005). *Conception des postes de travail et productivité organisationnelle : recommandations pratiques tirées d’études sur la conception et la gestion de postes de travail (0-662-78205-4)*

Cole, Raymond J, Brown, Zosia, & McKay, Sherry. (2010). Building human agency: a timely manifesto. *Building Research & Information*, 38(3), 339–350.

Cole, Raymond J, Robinson, John, Brown, Zosia, & O’Shea, Meg. (2008). Re-contextualizing the notion of comfort. *Building Research & Information*, 36(4), 323–336.

Cole, Raymond J, Robinson, John, Brown, Zosia, & O’shea, Meg. (2013). Re-contextualizing the notion of comfort *Comfort in a Lower Carbon Society* (pp. 25–38): Routledge.

Davidson, Colin H, Gagné, Mario, & l'aménagement, Université de Montréal. Faculté de. (1984). *Le bureau de demain: actes du deuxième Colloque sur la qualité de vie au travail tenu les 6, 7 et 8 avril 1983 à Montréal*: Montréal: Université de Montréal, Faculté de l'aménagement.

Des Isnards, Alexandre, & Zuber, Thomas. (2008). *L’open space m’a tuer*: Librairie générale française.

Deuble, Max Paul, & de Dear, Richard John. (2012). Green occupants for green buildings: the missing link? *Building and Environment*, 56, 21–27.

Eppinger, Steven D. (1991). Model-based approaches to managing concurrent engineering. *Journal of Engineering Design*, 2(4), 283–290.

Equiterre. (2018). Bilan de la consommation énergétique: Analyse de la performance énergétique de la Maison du développement durable (Vol. 2, pp. 35). Montréal, Canada.

Huang, Yueng-Hsiang, Robertson, Michelle M, & Chang, Kuo-I. (2004). The role of environmental control on environmental satisfaction, communication, and psychological stress: effects of office ergonomics training. *Environment and Behavior*, 36(5), 617–637.

Kupritz, VW, & Bellingar, TA. (2008). *The impact of architectural design features on performance, stress, and informal learning*. Paper presented at the 39th Annual Conference of the Environmental Design Research Association (EDRA 39), Veracruz, Mexico (28 May–1 June).

Leaman, Adrian, & Bordass, Bill. (1999). Productivity in buildings: the ‘killer’variables. *Building Research & Information*, 27(1), 4–19.

Lee, So Young, & Brand, JL. (2010). Can personal control over the physical environment ease distractions in office workplaces? *Ergonomics*, 53(3), 324–335.

Marchand, Roger, & Newsham, Guy. (2004). Améliorer l’environnement intérieur des postes de travail à aire ouverte dans les édifices à bureaux. <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=f793ee42-1a0b-4a50-94b6-78f3db2071be>

Mercier, Silvestre Celis. (2012). Confort et qualité de l’air intérieur à la Maison du développement durable : la perspective des occupants (pp. 34). Québec, QC.

Ouazia, Boulem, & Booth, Daniel. (2014). Performance Assessment of Stratified Ventilation System in Equiterre Building. *NRC-CNRC, Project Report no, A1-003056 Final*, 33.

Pierrette, Marjorie, Parizet, Etienne, Chevret, P, & Chatillon, J. (2015). Noise effect on comfort in open-space offices: development of an assessment questionnaire. *Ergonomics*, 58(1), 96–106.

Plantronics Inc. (2018). A New Global Study Finds the Noise Epidemic Worsening at Work, With Employees in Noisy Offices More Likely to Leave Their Job Within Six Months. Retrieved August 15th, 2018, from <https://globenewswire.com/news-release/2018/06/12/1520603/0/en/A-New-Global-Study-Finds-the-Noise-Epidemic-Worsening-at-Work-With-Employees-in-Noisy-Offices-More-Likely-to-Leave-Their-Job-Within-Six-Months.html>

Spira, Jonathan B, & Feintuch, Joshua B. (2005). The cost of not paying attention: How interruptions impact knowledge worker productivity. *Report from Basex*.

Thorpe, Roderick. (2018). Rapport présenté à Equiterre concernant l’évaluation de la qualité de l’air à la Maison du développement durable (pp. 23). Montréal, QC: EnviroParfait.

Travaux publics et services gouvernementaux Canada. (2012). *Normes d’aménagement du gouvernement du Canada relatives à l’initiative Milieu de Travail 2.0 – 2012 Gouvernement du Canada*.



Photo montage schématique du facteur L/U de l'atrium. En orange : l'espace de circulation, non loué.

VOLET 4

LE FACTEUR « L/U » (LOCATIF VS. UTILISABLE) DE LA MDD

Auteurs : Amy Oliver, Anne-Marie Petter, Ricardo Leoto, Gonzalo Lizarralde, et Normand Roy | En collaboration entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre | Avec l'appui financier de MITACS. Contrat de recherche MITACS IT10752 | Certificat d'éthique No. CPER-18-001-D

Août 2018

Note sur les limites de l'étude

Ce rapport ne vise pas la production d'un contenu scientifique susceptible de produire des généralisations. Il vise à répondre à des questions spécifiques du mandataire (La Maison du développement durable/ Equiterre) concernant l'opération du bâtiment de la MDD. Il s'agit d'une étude de cas qui illustre les enjeux de planification, conception et opération d'un bâtiment spécifique. Il a été réalisé dans le cadre d'un projet de stage MITACS et d'une entente de collaboration de 8 mois entre la Chaire Fayolle-Magil Construction en architecture, bâtiment et durabilité et Equiterre. Cette section fait partie intégrante d'une étude plus large qui comporte 3 autres sections similaires. Les résultats présentés dans cette section doivent être compris et contextualisés en regard de l'ensemble des résultats de l'étude.

Résumé

Le facteur L/U (espace locatif vs. utilisable) est utilisé internationalement par les gestionnaires immobiliers afin de calculer le montant des frais que chaque locataire doit payer dans un édifice à bureaux. Il est calculé en utilisant une méthode développée par l'Association internationale des propriétaires et gestionnaires de bâtiments (BOMA). Ainsi, les locataires paient souvent non seulement pour les pieds carrés qu'ils occupent, mais aussi pour une partie des aires communes dont ils profitent, telles que les corridors, les salles mécaniques, les vestibules, et autres. Ce facteur constitue, pour les propriétaires, un critère d'efficacité d'occupation des édifices à bureaux.

En janvier 2012, les architectes ont calculé le facteur total L/U du bâtiment de la MDD. Arrivant à un facteur L/U élevé, leur calcul laissait croire que le bâtiment de la MDD était significativement moins efficace que la majorité des édifices à bureaux. Cette étude vise à réviser le calcul du facteur L/U du bâtiment et à comprendre les raisons qui contribuaient à ce facteur élevé. Elle est articulée autour des questions suivantes : Le facteur réel L/U du bâtiment correspond-il aux attentes de la MDD en tant que client, gestionnaire et occupant ? La MDD est-elle inefficace en termes d'utilisation de l'espace locatif ? Pourquoi son facteur L/U est-il élevé ? Et quels sont les impacts ou les conséquences de ce facteur L/U élevé sur les opérations de la MDD ?

L'étude adopte la méthode BOMA 1996 pour créer trois scénarios d'efficacité du bâtiment : 1) le calcul effectué par les architectes en 2012 (révisé) ; 2) le calcul ajusté à la situation actuelle du bâtiment; et 3) le calcul ajusté, excluant les espaces nécessaires afin d'atteindre les stratégies de durabilité, car plusieurs de ces espaces diminuent la surface locative du bâtiment.

Les résultats montrent que le facteur L/U du bâtiment devrait être de 1.356 et non pas 1.486 tel que considéré à l'origine. Ainsi, le bâtiment a un facteur L/U réel qui s'approche de celui des édifices à bureaux construits il y a quelques décennies à Montréal, ainsi que des nouveaux gratte-ciels. Certes, ce chiffre est plus élevé que celui de la nouvelle génération d'édifices à bureaux qui visent à atteindre un facteur L/U combiné (total) de 1.10 à 1.20. Or vu dans un contexte plus large qui prend en compte la mission et la vision de la MDD, cette étude montre qu'il n'existe pas de problème majeur avec l'efficacité d'occupation du bâtiment.

Le fait que la MDD soit un bâtiment écologique, et certifié LEED, diminue jusqu'à 6 % son efficacité en termes d'occupation. Ces résultats amènent à se questionner si l'approche à la sur-mécanisation des immeubles dits « durables » ne diminue pas leur efficacité en termes d'occupation. La raison serait que les équipements et les services déployés pour atteindre la performance écologique requièrent davantage d'espace construit non dédié à la location, tout en produisant paradoxalement une empreinte écologique importante. Or, d'autres études de cas devront être réalisées avant de répondre avec certitude à cette question.

4.1. Objectif de l'étude et procédure

Le facteur L/U (locatif/utilisable) est utilisé par les promoteurs et gestionnaires de bâtiments commerciaux pour calculer les montants de loyers de chaque locataire, considérant que les locataires paient non seulement pour les pieds carrés qu'ils occupent dans les espaces de bureaux, mais aussi pour une partie des aires communes (corridors, salles mécaniques, vestibules, et autres). Autrement dit, c'est un ratio qui détermine l'efficacité d'un bâtiment en termes d'occupation.

Au cours des premières étapes du projet, pour des raisons budgétaires il a été décidé de limiter la hauteur du bâtiment à cinq étages plutôt que six, même si la réglementation permettait un gabarit plus important. Une fois ce gabarit fixé, les architectes responsables du design de la MDD ont calculé en janvier 2012 son facteur L/U total suivant les standards de l'industrie, soit BOMA 1996. Arrivant à un facteur L/U élevé en raison de la grande quantité d'espaces communs, leur calcul laissait croire que le bâtiment était significativement moins efficace que la majorité des édifices à bureaux. La MDD avait un facteur L/U combiné (total) de 1.486 et un facteur L/U d'immeuble de 1.285 alors que les standards de l'industrie varient entre 1.10 et 1.20 pour le L/U combiné. Ce chiffre est considéré optimal pour la rentabilité de l'immeuble. Ces résultats suggéraient que la MDD était significativement moins efficace en termes d'occupation que les bâtiments standards dans le marché immobilier. Dans ce contexte, le client (Équiterre et la MDD en leurs rôles de donneurs d'ouvrage, gestionnaires du bâtiment, et occupants) avait des inquiétudes quant à l'efficacité du bâtiment et a demandé à l'équipe de recherche de la présente étude d'examiner cette question en profondeur.

Les sous-objectifs de l'étude étaient de a) valider si le facteur L/U du bâtiment de la MDD répond aux attentes du client ; b) comprendre si la MDD est inefficace en termes d'utilisation de l'espace locatif ; c) identifier les raisons pour lesquelles le facteur L/U est plus élevé que les standards du marché ; et d) mettre en perspective le facteur L/U de la MDD en termes de ses opérations et en comparaison avec des

édifices à bureaux plus standards à Montréal.

Cette étude a été articulée autour des questions suivantes : Le facteur L/U de la MDD répond-il aux attentes du client ? La MDD est-elle inefficace en termes d'utilisation de l'espace locatif ? Pourquoi son facteur L/U est-il élevé ? Et quels sont les impacts ou les conséquences de ce facteur L/U élevé sur les opérations de la MDD ?

Pour effectuer cette étude, des manuscrits et des articles sur le facteur L/U, ainsi que sur les méthodes BOMA ont été analysés. Des entrevues auprès de trois promoteurs et gestionnaires de bâtiments commerciaux et d'un courtier immobilier à Montréal ont été réalisées. Ensuite, la méthode BOMA 1996 a été utilisée pour créer trois scénarios L/U pour la MDD :

- **Scénario 1** : Les calculs effectués par les architectes en 2012 (révisés).
- **Scénario 2** : Incluant des ajustements à la méthode des architectes pour mieux prendre en considération la situation actuelle de la MDD (où les salles de conférence comptabilisées comme espaces communs en 2012 sont aujourd'hui des espaces locatifs)
- **Scénario 3** : Le fait que la MDD soit un bâtiment écologique et certifié LEED exige l'ajout de certains espaces communs, incluant la salle de vélos, la salle de géothermie, des douches, et la grande salle mécanique au 5^e étage. Ce scénario représente une simulation des calculs BOMA de la MDD actuelle (scénario 2) excluant ces espaces liés à des stratégies durables. Ce scénario permet de donner un repère comparable à ceux du marché immobilier.

4.2. Le facteur L/U

Pour calculer le facteur L/U d'un bâtiment, les promoteurs et gestionnaires immobiliers utilisent souvent une méthode développée par l'Association internationale des propriétaires et gestionnaires de bâtiments (une fédération de 89 associations américaines dont Boma Canada fait partie et de 18 filiales internationales). Fondée en 1907, BOMA représente les propriétaires et les gestionnaires de tous les types de propriétés commerciales (BOMA Canada, 2018).

La norme BOMA 1996 est conçue de manière à ce qu'un propriétaire puisse facturer le loyer pour presque toute la superficie d'un bâtiment. Ainsi, un calcul de superficie est effectué en accroissant la surface dont un locataire dispose (son unité de bureaux) par un facteur correspondant à une proportion des espaces que le locataire partage avec d'autres locataires, incluant les aires communes du bâtiment et de l'étage. Autrement dit, le facteur L/U devrait avoir un lien avec les frais d'opérations (telles que, sans s'y limiter, les factures d'énergie et les taxes). Par exemple, si le facteur L/U est de 1.15, les locataires vont payer le loyer de leur espace en \$/pi.ca plus 15%.

Le facteur L/U d'un bâtiment est calculé en plusieurs étapes :

1. Les espaces occupés par les locataires, les espaces communs de chaque étage et du bâtiment, et les vides techniques verticaux sont délimités selon des règles spécifiques établies par BOMA.
2. Les vides techniques verticaux tels que les ascenseurs et les escaliers sont par la suite soustraits de la superficie brute mesurée du bâtiment, et détermine ce que BOMA appelle la **superficie préliminaire**.
3. Un ratio entre la superficie locative de base (superficie occupée + superficie commune d'étage) et la superficie occupée est calculé, c'est ce qu'on appelle le **facteur L/U d'étage**.
4. Le **facteur L/U d'immeuble** est calculé en divisant la superficie préliminaire (superficie occupée + superficie commune d'étage + superficie commune d'immeuble) par la superficie locative de base (superficie occupée + superficie commune d'étage).
5. Pour calculer le **facteur L/U combiné** (ou total), il faut multiplier le facteur L/U d'étage par le facteur L/U d'immeuble. Par exemple, si le facteur L/U d'étage est 1.10 et le facteur L/U d'immeuble est de 1.18, le facteur L/U combiné (total) est de 1.10 x 1.18, soit 1.298.

Facteur L/U d'étage	=	Superficie occupé + superficie commune d'étage
Facteur L/U d'immeuble	=	$\frac{\text{Superficie préliminaire}}{\text{Superficie occupée + superficie commune d'étage}}$
Facteur L/U combiné	=	Facteur L/U d'étage x facteur L/U d'immeuble

Selon les lignes directrices de BOMA 1996, tout espace extérieur est exclu de ces calculs. Par ailleurs, une nouvelle tendance est d'ajouter une troisième composante au loyer des unités de bureaux, soit le « facteur de contingence immobilière globale » (*complex add-on factor*), ce qui inclut le terrain (privatif) autour du bâtiment. Cette composante permet aux propriétaires de recouvrer les frais liés à l'entretien des espaces extérieurs.

Comment savoir quel est un « bon » facteur L/U ?

Selon un article publié sur la plateforme immobilière *The Real Deal* à New York (Bockmann, 2015), les édifices à bureaux d’aujourd’hui sont de 30 à 40 % plus efficaces que ceux du milieu du siècle. Les auteurs Sev and Özgen (2009) expliquent que les tours à bureaux des années 1990 avaient typiquement des ratios de surface de plancher net/brut de 70 à 75 % (facteur L/U combiné de 1.25 – 1.3). Aujourd’hui, la plupart des bâtiments ont un ratio qui varie entre 80 et 90 % (avec des exemples allant même jusqu’à 95 %).

Certains auteurs expliquent qu’il existe une relation directe entre la hauteur d’un édifice à bureaux et son efficacité, et qu’il ne soit pas toujours vrai que plus d’étages égale plus d’efficacité. Selon Watts et al. (2007), l’efficacité de la surface de plancher est affectée défavorablement par la hauteur d’un gratte-ciel, car les éléments structuraux et mécaniques augmentent pour satisfaire les exigences de circulation verticale et de résistance structurale. Or, selon Yeang (1996), un ratio de 80 à 85 % est idéal pour les gratte-ciels (donc un facteur L/U combiné de 1.15-1.20).

L’efficacité d’un bâtiment varie dans chaque pays selon les codes de construction et les normes exigés. Par exemple, en Pologne, un édifice à bureaux de faible hauteur est considéré efficace avec un facteur L/U combiné de 1.15. (Rolfe Judd Architecture). Cependant, en Allemagne, quand les codes du bâtiment imposent des dalles de plancher étroites de 8.0 m, un facteur L/U combiné de 1.3 à 1.4 est courant (Sev et Özgen, 2009).

Le facteur L/U est souvent surveillé par les locataires potentiels, qui cherchent à se prévaloir de frais de location les plus bas possibles. Un article publié dans *The Globe and Mail* explique :

« Les locataires potentiels préfèrent généralement les étages ayant un pourcentage plus élevé d’espace utilisable aux aires communes. Autrement dit, les locataires ne veulent pas payer beaucoup pour ce qu’ils partagent. Par conséquent, les étages avec un facteur L/U inférieur se louent plus rapidement et parfois à de meilleurs tarifs» (Mockford, Fall 2010)

Le facteur L/U détermine donc l’habileté des gestionnaires immobiliers à obtenir des locataires. Il est dans l’intérêt des gestionnaires et des locataires d’avoir un plan le plus efficace que possible. Mais plus concrètement, que veulent payer les locataires à Montréal ? Quel est le portrait d’un édifice à bureaux de classe A⁴² en termes de facteur L/U, de frais de loyers, d’opération, etc. ?

Le facteur L/U combiné d’un édifice à bureaux à Montréal varie énormément. Or, il y a aussi un plafond à ce que les locataires vont payer. Daniel Peritz, vice-président de la compagnie Canderel à Montréal, explique que le l’efficacité d’un bâtiment peut varier selon le plan, la quantité d’aires communes, et où se trouvent les noyaux d’ascenseurs. Par exemple, « il faut minimiser les escaliers lorsqu’il y a une occupation multiple sur un étage. » Selon lui, plusieurs bâtiments anciens à Montréal « ont des facteurs L/U combinés de 1.25 ou 1.3 – un facteur considéré aujourd’hui trop élevé pour les locataires ». En conséquence, Canderel diminue parfois artificiellement ce facteur à 1.15. « Nous plafonnons le facteur L/U et cela signifie que nous réduisons nos revenus sur le bâtiment, » explique-t-il, « Nous n’avons pas le choix parce que le marché ne le soutient simplement pas, c’est très élevé. »

42. Le bâtiment de la MDD est considéré comme un édifice à bureaux de classe A. Selon BOMA Québec (2016), les édifices à bureaux de classe A sont définis comme étant les bâtiments les plus prestigieux et attrayants, situés dans les meilleurs secteurs et dotés de systèmes constructifs, matériaux et équipements de première qualité.

Malgré ces différences, les chiffres suivants sont courants dans le marché immobilier montréalais :

Facteur L/U combiné (total)	environ 1.10 à 1.20
Valeur de l’hypothèque	55 à 65% de la valeur du bâtiment
Taux d’intérêt	entre 6,5 et 7% brut « cash on cash »
Rendement	au début du projet vers 6,6% jusqu’à 10% après construction
Taux de location net	entre 15 et 27\$ / pi.ca. ⁴³
Taux de location brut	entre 30 et 50\$ / pi.ca.
Coûts d’opérations	environ 10 à 20\$/pi.ca. incluant amortissement de 1.75\$/pi.ca.
Incitatif de location	entre 33 et 50% des coûts de réaménagement de l’espace; 30 à 50\$/pi.ca. pour la construction des espaces sous un bail de 10 ans ; 5 à 10\$/pi.ca. sur renouvellement du bail ⁴⁴
Retour sur investissement	environ 8%

4.3. Résultats de l’étude

Les notes des rencontres du Processus de Conception Intégrée (PCI) montrent que l’équipe de conception savait depuis 2006 que le plan du bâtiment n’était pas optimal en termes d’espace net/brut. Alors que les ingénieurs en mécanique demandaient une salle mécanique d’un minimum de 300m² (3230 pi.ca.), les architectes leurs ont demandé de proposer des options pour réduire la surface de cette salle. L’équipe avait des inquiétudes concernant la taille et l’emplacement de la salle mécanique, un espace non-locatif qui augmente le facteur L/U. Lors de ces rencontres, l’équipe a discuté la possibilité d’abriter la salle mécanique dans un sous-sol, au dernier étage, ou dans une unité préfabriquée sur le toit (Equiterre et al., 2007).

Au cours de ces discussions, les architectes ont insisté sur le fait que les calculs BOMA ne tiennent pas compte des aspects de développement durable du bâtiment. Les professionnels savaient que située à l’intérieur du bâtiment, l’emplacement et l’emprise de la salle mécanique n’étaient pas optimaux. En effet, sans un sous-sol ou un espace sur le toit, les équipements occuperaient des espaces potentiellement exploitables en location. Malgré les demandes des architectes et du client, la décision a finalement été prise par l’équipe de conception de ne pas avoir un sous-sol ou d’espace sur le toit ⁴⁵ et de loger une grande salle mécanique au 5^e étage (200 m² ou 2164 pi.ca), ainsi qu’une salle de géothermie au RDC (70 m² ou 756 pi.ca).

43. Selon un rapport d’Avison Young, le loyer brut moyen pour un bâtiment de classe B au centre-ville de Montréal était de 30,61 \$/ pi.ca. brut et 13,52 \$ / pi.ca. net et respectivement 41,16 \$/pi.ca. et 19,46 \$/pi.ca. pour un bâtiment de classe A (Avison Young, 2017). D’après un article publié dans The Globe and Mail, la moyenne de loyer net du Canada est de 17.22\$ (Immen, 2017)

44. Selon l’article du Globe and Mail, les incitatifs de location ont augmenté de 10% en 2017 et sont plus élevés à Montréal qu’à Toronto, Calgary et Vancouver, où les marchés sont très compétitifs et les gestionnaires n’ont pas besoin d’être aussi « généreux » (Immen, 2017)

45. Selon une personne interviewée, il n’y a pas eu de sous-sol pour des raisons budgétaires et pas de salle mécanique au toit pour privilégier le toit vert ; cependant, il n’a pas été possible de valider cette explication dans les documents du projet.



De larges corridors permettent les échanges entre usagers. Photo : Antoine Saito.

Les enregistrements des rencontres du processus de conception intégrée (PCI) de la MDD et les notes prises pendant celles-ci témoignent aussi des réflexions sur la logique spatiale et organisationnelle de la MDD. Selon un architecte de MSDL, « le concept du bâtiment et la philosophie des organismes qui s'y installeront se rapprochent plus du bâtiment institutionnel que d'un édifice à bureaux conventionnel, de style promoteur. » (MDD équipe de conception, 2007). En effet, le client visait à favoriser les échanges entre les différents copropriétaires et colocataires du bâtiment, ceci exigeant des espaces de rencontres et lieux d'échanges additionnels qui ne se retrouvent pas nécessairement dans un édifice à bureaux conventionnel. Il faut donc tenir compte du fait que la MDD n'est pas – et n'a pas été conçue comme – un bâtiment de type « promoteur ».



Utilisation de l'atrium pour des événements. Photos : Antoine Saito.



Stationnement à vélo intérieur. Photo : Antoine Saito.

L'équipe de recherche de la présente étude a montré les plans du bâtiment de la MDD à deux experts en gestion immobilière pour avoir leur avis sur l'efficacité du plan. Selon eux, les corridors et les salles techniques de la MDD prennent trop d'espace. Selon un expert, dans le bâtiment de la MDD « il est difficile d'avoir un L/U efficace, car vous avez besoin de corridors pour rentrer dans les salles. Un bâtiment rectangulaire comme celui-ci avec un noyau désaxé, c'est difficile. Normalement, on essaie de mettre le noyau [technique et de circulation] au centre. » Il y a donc ici lieu de souligner que l'exiguïté du site pose un défi pour l'efficacité du plan.



Salle mécanique du 5^e étage. Photo : Bernard Fougère.

Puis, comme le facteur L/U joue sur le modèle financier du bâtiment, l'équipe de recherche a demandé aux interviewés ce qu'ils attendraient de la MDD sur le plan financier. Un expert a répondu qu'il s'attendrait à 15-16\$/pi.ca. de loyer net ou 32-33\$/pi.ca. de loyer brut, incluant les taxes et les frais d'opération, ce qui correspond à la gamme inférieure de taux de location à Montréal.

Est-ce que la MDD est inefficace ? La réponse à cette question dépend de la façon dont on calcule le facteur L/U et de ce que l'on considère comme superficie utilisable versus commune. Cela dépend également de si l'on tient uniquement compte du facteur L/U ou si l'on considère aussi les revenus de location et les frais d'opération de la MDD.

Le tableau 14 résume les résultats de l'étude selon les trois (3) scénarios étudiés. Dans la première colonne, les calculs effectués par les architectes en 2012 sont présentés. Dans la deuxième colonne, les résultats actuels, à savoir comment la MDD est réellement utilisée aujourd'hui en 2018, sont présentés, car certains espaces considérés comme espaces communs lors des calculs de 2012 sont aujourd'hui des espaces locatifs. Enfin, dans la troisième colonne les espaces liés à la certification LEED sont soustraits des zones non-locatives

pour présenter le facteur L/U hypothétique de la MDD excluant les espaces non destinés à la location, mais directement liés à la certification LEED. Ce scénario inclut les salles locatives qui font partie des activités génératrices de revenus de la MDD.⁴⁶

TABLEAU 14

Tableau comparatif des facteurs L/U selon 3 scénarios. Unités en pi.ca.

		Scénario 1 MDD 2012	Scénario2 MDD 2018	Scénario 3 Comparable
A	Superficie brute mesurée		66,866.22	
B	Vides techniques verticaux		7,007.59	
C	Superficie préliminaire		59,858.63	
D	Superficie commune d'étage	7,535.29	8,243.54*	8,135.54*
E	Superficie utilisable	52,323.34	51,615.08	51,723.08
F	Superficie commune d'immeuble	12,043.24	7,482.33	4,982.99
G	Superficie occupée	40,280.10	44,132.75	46,740.09
I	Facteur L/U d'étage moyenne	1.156	1.187	1.174
J	Superficie locative de base	46,581.28	52,376.30	54,875.64
K	Facteur L/U d'immeuble	1.285	1.143	1.091
L	Superficie locative		59,858.63	
M	Facteur L/U combiné	1.486	1.356	1.281

* Notez que la superficie commune d'étage augmente après 2012 à cause des rénovations au rez-de-chaussée et la création de nouveaux corridors qui font partie de la superficie commune du rez-de-chaussée.

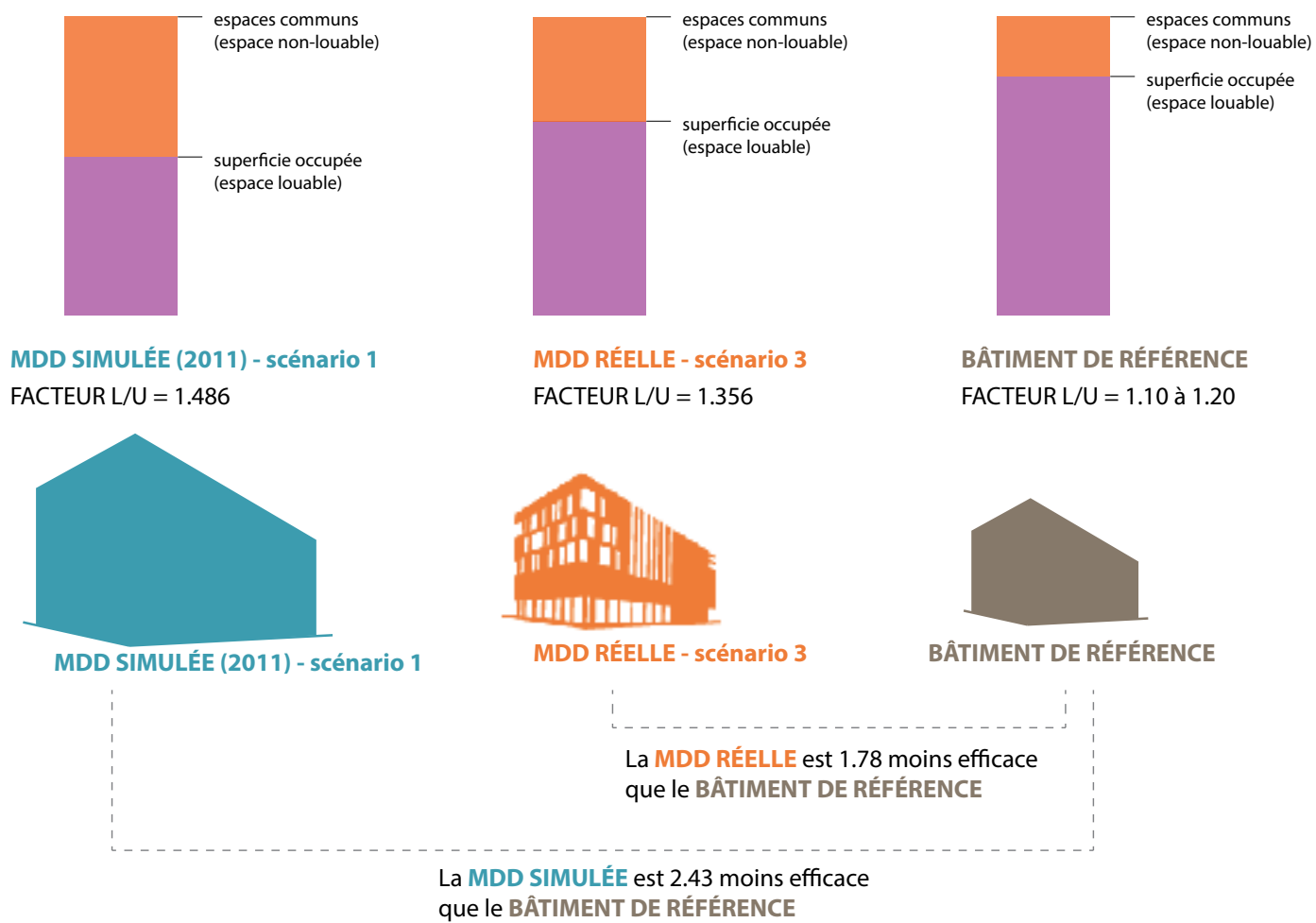
Scénario 1 : Les calculs effectués par les architectes en 2012⁴⁷ : La superficie occupée est de 40,280 pi.ca et la superficie commune de l'immeuble est de 12,043 pi.ca. MSDL a comptabilisé l'atrium et les salles de conférence comme étant des espaces communs de l'immeuble (voire des espaces non locatifs). Donc dans ce scénario, le facteur L/U moyen par étage est de 1.156 et le facteur L/U d'immeuble est de 1.285. Le facteur L/U combiné (total) dans ce scénario est donc de 1.486.

Scénario 2 : Situation actuelle : Alors que les architectes avaient considéré les salles de conférences au rez-de-chaussée et au 2^e étage⁴⁸ comme des espaces communs du bâtiment, elles sont en réalité plutôt des espaces locatifs. Il en va de même pour l'atrium, à l'origine comptabilisé comme un espace commun du bâtiment alors qu'une grande partie de l'atrium devrait être considérée comme espace locatif, car il est loué pour des évènements. Ils sont donc comptabilisés comme locatifs dans le présent scénario. Un détail des superficies

46. La MDD offre un service de location de salles, qui inclut l'atrium pour toute sorte d'événements ainsi que 8 salles de conférence de différentes tailles.
47. Alors que l'équipe de recherche a recréé les calculs effectués par les architectes en 2012, il est possible qu'il existe quelques petites différences entre ce tableau et leurs calculs bruts.
48. À l'époque, il n'y avait pas encore de salles de conférence au rez-de-chaussée.

globales du rez-de-chaussée est présenté à la figure 4.4 et du 2^e étage à la figure 4.5 à la fin de cette étude. Ainsi, la superficie occupée augmente de 40,280 pi.ca (scénario 1) à 44,133 pi.ca et la superficie commune d'immeuble diminue de 12,043 à 7,482 pi.ca. Par la suite, les facteurs L/U d'immeuble diminuent à 1.143 et le facteur L/U combiné diminue à 1.356. Actuellement, on devrait considérer le facteur L/U total de la MDD à 1.356 et non le facteur initial de 1.486. Le tableau 4.5 à la fin de l'annexe décrit les calculs plus en détail.

Scénario 3 : Simulation comparable : Ici, les espaces utilisés à des fins de « durabilité du bâtiment » – soit des espaces qui ont été nécessaires pour atteindre les objectifs de durabilité du client et pour l'obtention de la certification LEED v1.0, et qui ne seraient donc pas présents dans un édifice à bureaux non certifié LEED, ont été pris en considération. Ces espaces comprennent : la salle de géothermie au rez-de-chaussée, la salle de vélos, les douches au 3^e étage et la grande salle mécanique au 5^e étage (qui aurait pu être placée sur le toit ou en sous-sol). Elles sont comptabilisées comme locatives afin de montrer leur influence sur le facteur L/U. Ceci augmente la superficie occupée du bâtiment à 46,740 pi.ca et diminue l'espace commun de l'immeuble à seulement 4,983 pi.ca. Les résultats montrent que si la MDD n'avait pas eu ces espaces utilisés à des fins durables, le facteur L/U moyen par étage serait de 1.174, le facteur L/U d'immeuble serait de 1.091 et le facteur L/U combiné (total) serait de 1.281, ce qui représente une baisse assez significative et qui se rapproche davantage des facteurs communs pour un édifice à bureaux à Montréal. Voir le tableau 19 à la fin de l'annexe pour une synthèse de ce scénario.



Comparaison de la MDD réelle avec le bâtiment de référence et la MDD simulée par les architectes en 2012.

Quant aux espaces dédiés aux systèmes mécaniques (environ 3550 pi.ca. ou 5,4 % de la superficie totale du bâtiment), l'équipe de recherche de la présente étude a voulu comparer ces chiffres avec les moyennes dans l'industrie. Il faut noter cependant qu'il n'existe aucune règle de base ou façon de calculer de manière exacte le pourcentage moyen d'espace requis par les systèmes mécaniques d'un bâtiment⁴⁹. La taille des espaces de mécanique dépend des équipements choisis, du climat et des proportions du bâtiment. Or l'équipe de recherche a essayé d'établir une gamme des tendances dans l'industrie. Elle a identifié 4 exemples qui en offrent des indices :

- Premièrement, BOMA utilise un exemple d'un édifice à bureaux de 4 étages et 85,000 pi.ca à Miami où les espaces mécaniques prennent 1050 pi.ca ou seulement 1 % de la superficie totale du bâtiment. Il est à noter que Miami n'a pas le même climat que Montréal.
- Deuxièmement, un cabinet d'architectes à Montréal a laissé l'équipe de recherche étudier les plans de l'un de ses édifices à bureaux certifié LEED or. Ce bâtiment est situé sur un site moins contraignant (dans un contexte péri-urbain) que celui de la MDD et le bâtiment a une largeur d'environ 1000 pieds et une profondeur de 1800 pieds avec un noyau d'ascenseurs central et des aires ouvertes pour les aires de bureaux. La salle mécanique (qui ne comprend pas de systèmes de géothermie, mais plutôt des équipements hautement performants – mais assez conventionnels) est au toit; le rangement à vélos est au sous-sol ainsi que le stationnement. Dans ce bâtiment de 121,000 pi.ca. bruts, 1920 pi.ca. sont dédiés à la mécanique du bâtiment, soit 1,5 % de sa superficie totale.
- Troisièmement, le U.S. General Services Administration (GSA, 2017) estime qu'un édifice à bureaux a besoin de 4 % de sa surface de plancher brute pour les équipements de traitement d'air et de 1 % pour les équipements de chauffage / climatisation. En réalité, la MDD n'est pas très loin de ces chiffres.
- Quatrièmement, une étude réalisée à l'Université d'Illinois aux États-Unis (Facilities Standards, 2017) estime à 10 % la surface de plancher brute nécessaire pour les espaces mécaniques, ce qui semble un peu élevé.

Donc même si à première vue il semble y avoir trop d'espace dédié à ses systèmes mécaniques, en réalité les données montrent que la MDD se situe à l'intérieur de ce qui serait considéré « habituel » pour un édifice à bureaux. Cependant, si la salle mécanique du 5^e étage avait été placée sur le toit et si la salle mécanique du rez-de-chaussée était réduite sans recours aux pompes de géothermie, la MDD aurait plus de 2000 pi.ca additionnels en surface locative – ou 26,000 \$ de revenus de plus par année suivant le taux de loyers accordé à la majorité des locataires. La MDD serait ainsi jusqu'à 6 % plus efficace.

49. Par exemple, un ingénieur en mécanique consulté pour cette question explique : « Tout dépend des systèmes utilisés. Par exemple pour des magasins ou édifices de bureaux de 5-6 étages, on peut utiliser des unités en toiture sans espaces mécaniques avec seulement des puits avec des gaines verticales de distribution. Si on a du chauffage électrique on n'aura pas besoin de salle de bouilloires ». En somme, il existe trop de variétés de systèmes pour déterminer une règle de base.

4.4. Discussion

En considérant les usages actuels du bâtiment, le facteur L/U combiné (total) de la MDD est de 1.356 et non de 1.486 comme les architectes l’avaient calculé en 2012. Mais ce chiffre demeure beaucoup plus élevé que les facteurs L/U ciblés dans l’industrie (entre 1.10 et 1.20). Cette étude a fait comprendre les raisons pour lesquelles le facteur L/U est plus élevé que les repères de l’industrie :

a) Exigences LEED

- Les espaces liés à des stratégies durables (rangement vélos, salle de géothermie, douches, grande salle mécanique au 5^e étage, etc.) pour la certification LEED ajoutent plus de 2000 pi.ca. d’espaces communs au bâtiment. Sans ces espaces et avec les usages actuels, le facteur L/U total serait de 1.285 (scénario 3 dans le tableau 14) au lieu de 1.356 ; avec ces espaces, la MDD est de 6 % moins efficace.

b) Contraintes du site

- L’empreinte du bâtiment, qui est long et étroit, avec seulement 5 étages,⁵⁰ ne facilite pas un plan très efficace de style « promoteur », car il aurait été difficile d’introduire un couloir à double chargement avec un noyau d’ascenseurs centralisé dans cet espace restreint ;
- A cause de ce dernier point, la MDD a comparativement/proportionnellement plus d’espaces de circulation, surtout de corridors (les corridors prennent 5350 pi.ca. ou 8% de la superficie brute mesurée⁵¹) ;

c) Décisions lors de la conception

- Le vide de l’atrium sur les étages 2 à 5, une opportunité manquée pour un meilleur facteur L/U, apporte d’autres bénéfices importants aux usagers. Il est important de noter que ce vide est soustrait des calculs, comme il fait partie des « vides techniques verticaux » du bâtiment ;
- Des espaces communs importants au niveau du RDC (débarcadère, salle de déchets, salle de lavage, etc.) ;
- Une salle de photocopieur (au 4^e étage), deux salles de rangement (2^e et 5^e étage), et une salle d’entretien ménager à chaque étage augmentent aussi le facteur L/U et rendent le bâtiment moins efficace; mais en revanche, il ne faut pas oublier que ceci accroît l’efficacité de chaque bureau (partage d’espaces communs) ;
- Des corridors plus spacieux que le code ne l’exige⁵² ;

50. La réglementation aurait permis 6 étages, mais pour des raisons budgétaires, seulement 5 étages ont été prévus.
51. Pour donner un ordre de comparaison, l’édifice à bureaux certifié LEED or auquel les auteurs ont fait référence dans la section 1.6.3 dédie 5,6% de la superficie de chaque étage aux corridors
52. Le code du bâtiment exige un minimum de 1100 mm pour les corridors publics ou plus s’ils mènent vers les issues. Dans ce cas, l’article 3.4.3.2 s’applique (National Research Council of Canada Associate Committee on the National Building Code, 1990): la largeur sera un minimum de 1100 mm ou plus si le total du nombre d’occupants multiplié par 6.1mm/occupant donne plus de 1100mm. Selon le document BOD de la MDD, le nombre d’occupants pour les étages à bureaux varie entre 93 et 109 personnes par étage, donc le minimum de 1100 mm est applicable. Les corridors de la MDD aux étages à bureaux varient entre 1530 mm pour certaines parties et 1670 mm pour les parties qui s’ouvrent vers l’atrium. Les corridors sont donc de 40 à 50 % plus larges que les exigences minimales du code. L’équipe de recherche calcule qu’environ 3400 pi.ca ont été dédiés aux corridors aux étages 3 à 5 – un surplus minimum de 1200 pi.ca. ; une perte de revenus annuelles de 15,000 \$. Avec les exigences minimales du code aux étages 3 à 5, l’équipe estime que le facteur L/U total serait de 1.32 au lieu de 1.356.

Par sa mission et sa raison d’être – un bâtiment écologique conçu pour promouvoir et stimuler les échanges d’idées – la MDD devait être conçue différemment des édifices à bureaux typiques de style « promoteur. » Est-ce que les « bonnes décisions » ont été prises lors de la conception ?

Certaines décisions ont été prises lors de la conception du bâtiment (plus d’espaces partagés, de larges corridors qui donnent sur l’atrium avec une vue sur le parc, etc.) qui ont eu un impact sur son efficacité. Ces décisions ont parfois été la résultante de contraintes de design. Il est important de souligner que les bonnes décisions ne sont pas exclusives à seul le facteur L/U. Ainsi, certains espaces qui accroissent le facteur L/U apportent une meilleure qualité de vie aux occupants et une meilleure durabilité *au bâtiment*. De plus, alors que les corridors ont été conçus pour être plus larges que ce que l’exige au minimum le code de construction, et ce faisant nuisent un peu au facteur L/U, l’équipe de recherche observe que les occupants utilisent souvent ces espaces pour parler au téléphone, pour des rencontres spontanées, et pour enregistrer des vidéos devant le mur végétal. Par ailleurs, d’autres choix de design ne contribuent pas beaucoup à la qualité de vie des occupants. Par exemple, on peut conclure que la salle de lavage est trop grande par rapport à ce qu’elle apporte à la MDD, comme le suggère l’un des usagers interviewés.

Tout comme il est important de mettre en perspective le facteur L/U concernant les aspects environnementaux du bâtiment et la mission du client, il est également important de mettre ce facteur en perspective par rapport au modèle financier de la MDD. Il faut noter que même si le facteur L/U de la MDD est de 1.356, son gestionnaire utilise 1.15 comme base pour déterminer les frais de loyer de chaque organisme (ce qui représente une perte d’environ 118,377 \$ sur une base annuelle). Comme les entrevues avec des promoteurs et gestionnaires immobiliers l’ont fait soulever, ceci n’est pas du tout atypique : quand le facteur L/U est trop élevé, les gestionnaires lui imposent souvent un plafond parce que les locataires vont difficilement payer pour autant d’espace non-dédié aux bureaux. Le tableau 15 ci-dessous démontre la perte en superficie locative de base avec un facteur L/U plafonné de 1.15 vs 1.356. La différence entre les deux est de 9,106 pi.ca.

TABEAU 15

Démonstration de la perte en adoptant un facteur L/U de 1.150 au lieu de 1.356. Unités en pieds carrés. Source : auteurs.

Étage	Superficie préliminaire	Superficie occupée d'étage	Facteur L/U adopté	Superficie locative adoptée	Facteur L/U réelle	Superficie locative réelle	Différence
RDC	13,141.23	6,564.72	1.150	7,549.43	1.356	9,088.54	-1,539.10
2 ^e	11,068.80	8,857.53		10,186.16		12,601.18	-2,415.02
3 ^e	12,372.60	10,841.80		12,468.07		14,140.11	-1,672.04
4 ^e	12,379.40	10,687.90		12,291.09		14,079.43	-1,788.34
5 ^e	10,896.60	7,180.80		8,257.92		9,949.37	-1,691.45
Total	59,858.63	44,132.75		50,752.67		59,858.63	-9,105.96

Or la MDD diffère des édifices à bureaux de classe A typiques à Montréal sur les aspects suivants:

- Les frais de loyers pour les membres de la MDD sont peu élevés comparativement au marché montréalais : 13\$/pi.ca. par rapport à 15 à 27\$ / pic.ca.
- Au-delà des revenus des locataires (environ 365,000 \$ par année), le service de location de salles génère des revenus oscillant autour de 200,000\$ net par année, ce qui représente environ 35% des revenus de location du bâtiment par année ;

- La MDD est 78% plus performante que 11,000 bâtiments sur Portfolio Manager (Equiterre, 2018). Par conséquent, le coût en énergie de la MDD est de 17% moins élevé que celui du bâtiment de référence, ce qui se traduit par une économie d’un peu plus de 25,000\$ par année;
- L’organisme de la MDD est un organisme à but non-lucratif. Par conséquent, les frais d’exploitation sont ajustés pour pouvoir payer les dépenses du bâtiment, mais sans faire beaucoup de profit (alors qu’un édifice à bureaux de type « promoteur » vise un profit de 6 à 12%).

Dans le tableau 16 ci-dessous, certaines critiques à l’efficacité de la MDD et les résultats de la présente étude sont présentés.

TABEAU 16

Tableau synthèse des critiques sur l’efficacité de la MDD et les réfutations à ces critiques. Source : auteurs.

Critiques de l’efficacité de la MDD	Résultats de l’analyse	Type d’argument
Les corridors prennent trop de place à la MDD	...Mais les corridors donnent sur l’atrium et le parc Hydro-Québec. Les occupants utilisent le corridor pour des petites rencontres, pour parler au téléphone, et pour filmer devant le mur végétal.	Qualitatif
L’atrium prend trop de place	...Mais l’atrium est loué souvent pour des événements et contribue à 35% des revenus de location que rapporte le service de location des salles	Financier
Les salles de mécaniques sont trop grandes	...Si l’habituel est d’environ de 1 à 5 % de la surface de plancher brute dédiée à la mécanique, la MDD n’est pas loin de ça. De plus, la MDD économise en énergie et donc en coûts d’énergie, à la hauteur de 25,000 \$ par année	Financier et écologique
Les loyers et les frais d’exploitation sont trop bas	...Mais la MDD a un budget balancé à chaque année	Financier
Il y’a trop de salles communes (salles de conférence, salle de photocopieurs, salles d’entretien ménager)	...Mais ces espaces éliminent la nécessité de chaque bureau d’avoir sa propre cuisine, sa propre photocopieuse, et ses propres salles de conférences	Écologique

4.5. Conclusion

La MDD a un facteur L/U plus élevé que les édifices à bureaux standards, ce qui pourrait être décevant pour les gestionnaires du bâtiment qui trouvent que les gestionnaires sous-facturent pour les aires communes. Ce facteur ferait croire que les conditions de rentabilité du gestionnaire sont moins avantageuses. Dans cette étude, les calculs BOMA effectués par les architectes en 2012 ont été comparés avec deux scénarios : un scénario de l’utilisation actuelle (avec les salles de conférence et une partie de l’atrium comptabilisées comme espaces locatifs), et un scénario optimal pour comparaison dans lequel, en plus d’ajouter des espaces locatifs pour refléter les conditions actuelles, les espaces « durables » liés à la certification LEED sont soustraits. Cette étude a montré que la MDD est moins inefficace que l’on ne le pensait : son facteur L/U total actualisé est de 1.356 et non de 1.486 tel que considéré à l’origine.

La MDD reste inefficace comparativement aux standards idéaux de l’industrie, qui visent des taux de 1.10 à 1.20. Les espaces liés aux stratégies durables du bâtiment (salle de vélos, salle de géothermie, douches, et salle de mécanique au 5^e étage) augmentent le facteur L/U. De plus, l’empreinte du bâtiment (et donc sa géométrie) ne permet pas l’aménagement d’un corridor avec des aires de bureaux de part et d’autre, donc certaines contraintes du site affectent l’efficacité du plan. En troisième lieu, par certaines décisions prises lors de la conception et convenues avec le client :

- Un noyau d’ascenseurs qui n’est pas centralisé sur le plan ;
- Le vide de l’atrium sur les étages 2 à 5 ;
- Des espaces communs importants au niveau du RDC (débarcadère, salle de déchets, salle de lavage, etc.) ;
- Des espaces communs à l’étage (cuisine partagée au 2^e étage, salle de photocopieur, salles de rangement, salles d’entretien ménager, etc) ;
- La salle de géothermie au rez-de-chaussée (70 m² ou 756 pi.ca) et la salle mécanique (200 m² ou 2164 pi.ca.) au 5^e étage.

Cependant, il devient peu pertinent et même arbitraire de juger si des « décisions idéales » ont été prises lors de la conception du bâtiment. En réalité, toute décision prise lors d’un processus de conception est un compromis. Comme le dit Herbert Simon (1996) dans son célèbre livre *The Sciences of the Artificial*, il n’existe pas de solution de design « optimale. » En design, il n’existe que des solutions pouvant satisfaire à certaines personnes à certains moments, et considérant les limites d’information et les contraintes cognitives du processus de conception.

Il n’existe pas un problème majeur avec l’efficacité du bâtiment de la MDD, surtout quand l’on considère celui-ci dans un contexte plus large. Le facteur L/U combiné réel de 1.356 est similaire aux taux des gratte-ciels et édifices à bureaux typiques à Montréal construits il y a quelques décennies.

Il y a cependant des pertes en revenus locatifs dues à ce facteur L/U élevé. En effet, les pertes en efficacité avec un facteur L/U total de 1.356 (scénario 2) au lieu de 1.281 (scénario 3) sont plus importantes que les économies en coûts d’énergie. En plafonnant le facteur L/U à 1.15 dans le scénario 2, la MDD perd 118,000\$ par année et perdrait 79,000\$ par année avec un facteur L/U de 1.281, alors que les économies en énergie sont d’environ 25,000 \$. Ces chiffres sont expliqués plus en détail à la fin de cette annexe.

Il est important de mettre le facteur L/U de la MDD en perspective. Le facteur L/U ne prend pas en compte l’être humain. Si l’on revient à la vision du client pour la MDD et les stratégies élaborées dans la charte (par

exemple d’offrir un milieu de travail de grande qualité, de créer un pôle d’innovation sociale et environnementale, de renforcer la situation financière des organisations, et d’inspirer l’écologisation des bâtiments), il semble que la conception de la MDD répond à sa vision initiale. Dans le contexte d’une gestion à but non lucratif, la MDD rencontre ses objectifs financiers tout en offrant des espaces de qualité supérieure à ses occupants. Le facteur L/U est plus élevé à la MDD, car il s’agit d’un bâtiment écologiquement performant qui doit dédier plus d’espace aux équipements. Le bâtiment inclut aussi des espaces communs qui sont loués (salles de conférences et atrium) qui génèrent des revenus non négligeables.

La MDD n’est pas un édifice à bureaux typique et elle peut difficilement être comparée à un bâtiment réalisé par un promoteur immobilier aux objectifs de rentabilité maximale ; elle a un restaurant au rez-de-chaussée, des salles locatives et des espaces partagés comme la cuisine au 2^e étage, etc. Les bureaux s’ouvrent sur un majestueux atrium avec mur végétal, dont la vue donne sur le parc Hydro Québec. Il s’agit d’un espace architectural à grande valeur ajoutée. Or le taux d’inoccupation de la MDD est presque nul. Elle réalise de plus des économies en énergie d’environ 17 % comparativement à son bâtiment de référence. Les frais d’opération de ce bâtiment aux caractéristiques singulières sont dès lors difficilement comparables à ceux d’un édifice à bureaux standard à partir duquel le concept du facteur L/U a été conçu. Donc même si la MDD est moins efficace qu’un bâtiment standard en termes de facteur L/U (i.e. 1.356 plutôt que 1.20), ce facteur est ici de moindre importance que dans le cas d’un édifice à bureaux conventionnel.

Ces résultats apportent des contributions aux connaissances sur le facteur L/U des bâtiments écologiques et des bâtiments qui valorisent « l’économie de partage ». Ils mettent en évidence l’importance du facteur humain dans l’analyse de l’efficacité spatiale de bâtiments durables.

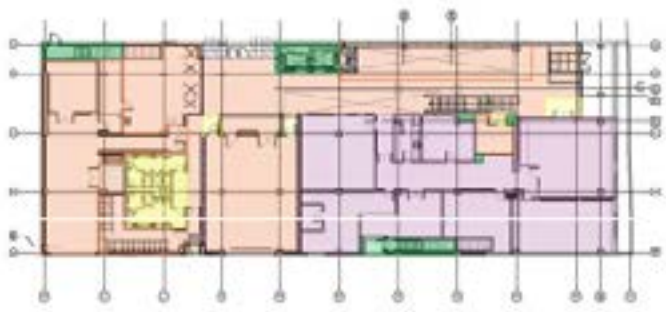
Annexe

TABLEAU 17

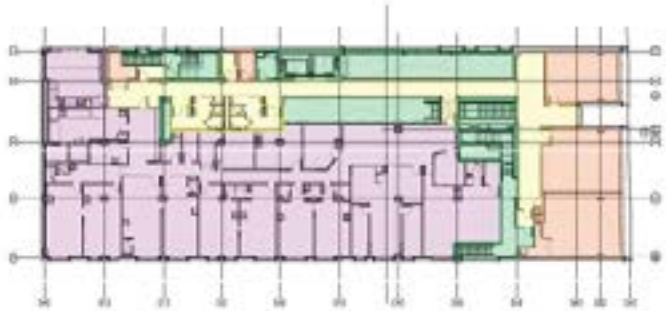
Les calculs effectués par les architectes en 2012 qui ont été adaptés pour cette étude. Unités en pi.ca.

Titre	A	B	C	D
	Mesuré	Mesuré	C = A - B	Mesuré
Étage	Superficie brute mesurée	Vide technique vertical	Superficie préliminaire	Superficie commune d'étage
RDC	13,771.80	630.57	13,141.23	679.49
2 ^e	13,415.40	2,346.60	11,068.80	2,168.50
3 ^e	13,691.22	1,318.62	12,372.60	1,530.80
4 ^e	13,682.60	1,303.20	12,379.40	1,631.60
5 ^e	12,305.20	1,408.60	10,896.60	1,524.90
Total	66,866.22	7,007.59	59,858.63	7,535.29

Rez-de-chaussée



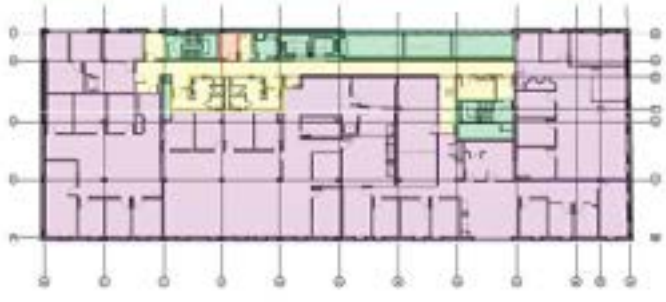
2^e étage



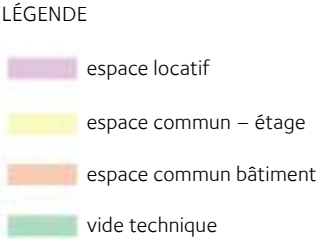
3^e étage



4^e étage

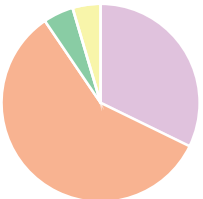


5^e étage



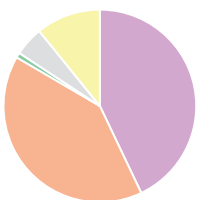
Scénario 1 : Les calculs effectués par les architectes en 2012. Plans de la MDD avec la méthode BOMA. Source : auteurs.

REZ-DE-CHAUSSÉE - SCÉNARIO 1 : 2011



RDC EN SCÉNARIO 1 : 2011

REZ-DE-CHAUSSÉE- SCÉNARIO 2 : 2018

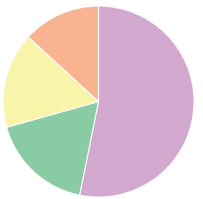
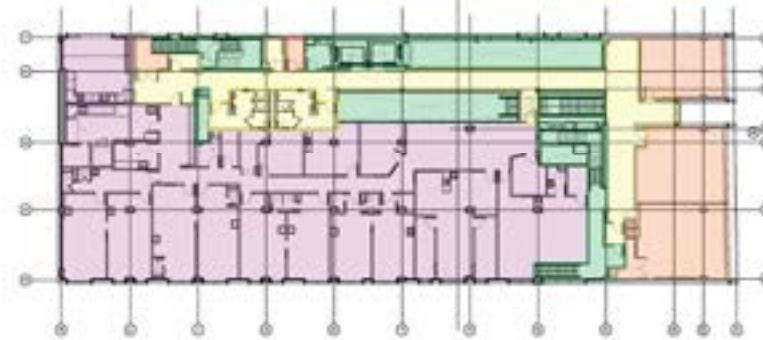


RDC EN SCÉNARIO 2 : 2018



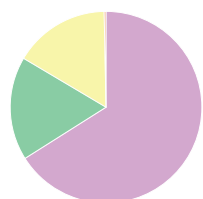
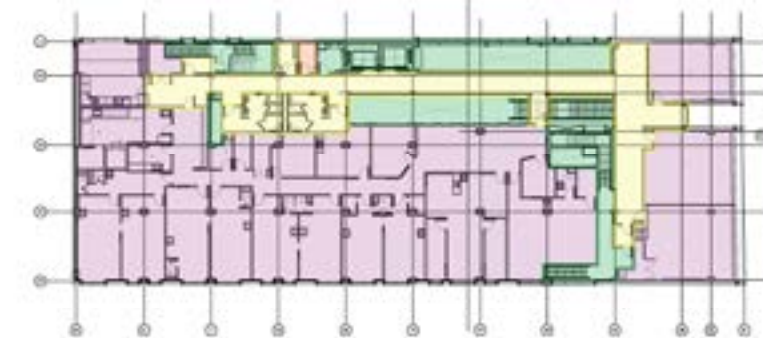
Plan de la rez-de-chaussée et division des espaces dans les scénarios 1 et 2. Source : Auteurs.

2E ÉTAGE - SCÉNARIO 1 : 2011



2e ÉTAGE EN SCÉNARIO 1 : 2011

2E ÉTAGE- SCÉNARIO 2 : 2018



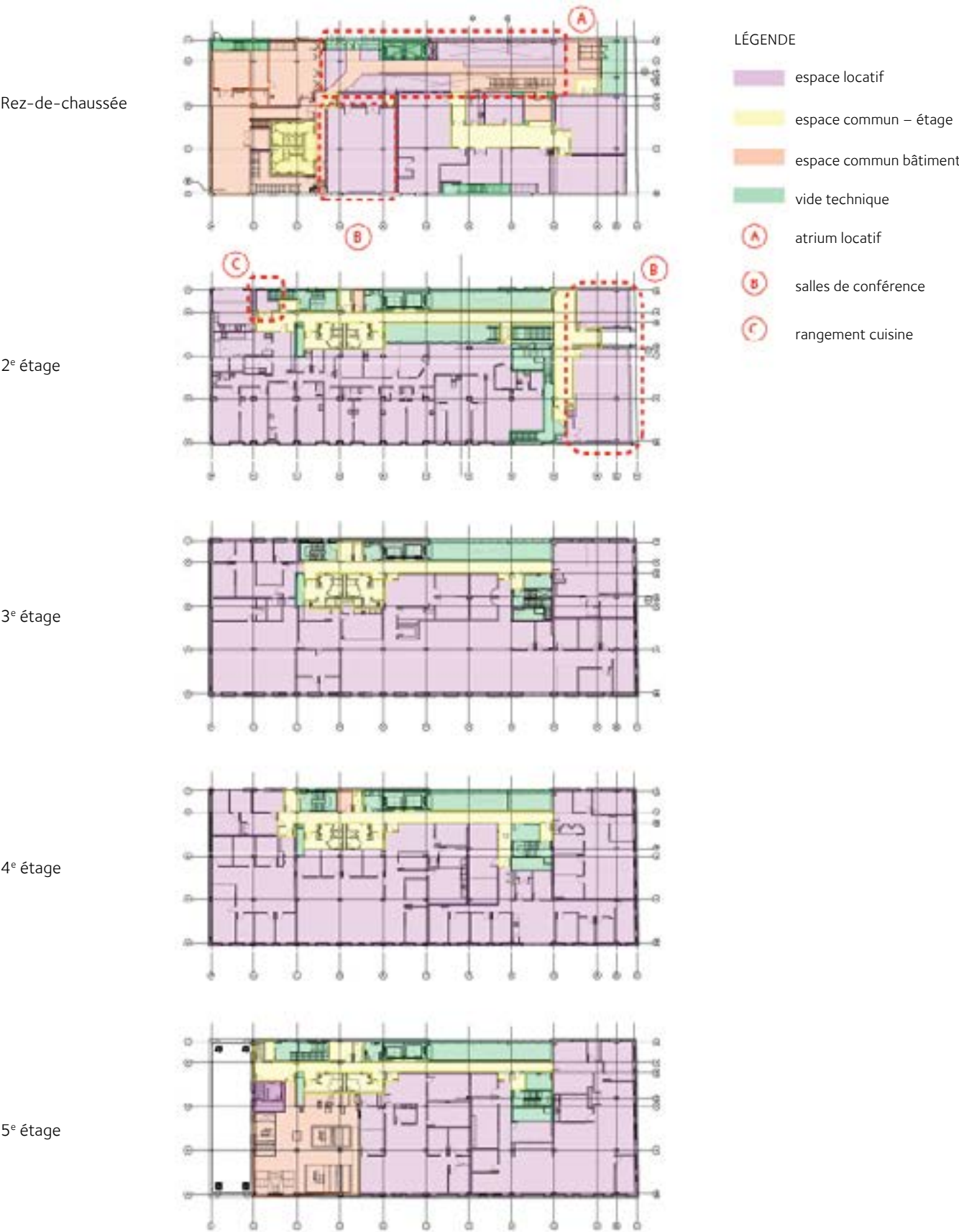
2e ÉTAGE EN SCÉNARIO 2 : 2018



Plan du 2^e étage et division des espaces dans les scénarios 1 et 2. Source : Auteurs.

TABLEAU 18
La situation actuelle de comment fonctionne la MDD. Unités en pi.ca. Source : auteurs

Titre	A	B	C	D
	Mesuré	Mesuré	C = A - B	Mesuré
Étage	Superficie brute mesurée	Vide technique vertical	Superficie préliminaire	Superficie commune d'étage
RDC	13,771.80	630.57	13,141.23	1,387.74
2 ^e	13,415.40	2,346.60	11,068.80	2,168.50
3 ^e	13,691.22	1,318.62	12,372.60	1,530.80
4 ^e	13,682.60	1,303.20	12,379.40	1,631.60
5 ^e	12,305.20	1,408.60	10,896.60	1,524.90
Total	66,866.22	7,007.59	59,858.63	8,243.54

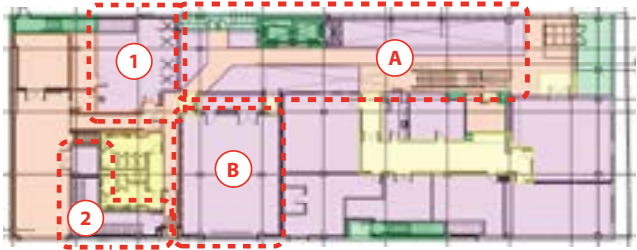


Scénario 2 : La situation actuelle de comment fonctionne la MDD. Plans de la MDD avec la méthode BOMA. Source : auteurs.

TABLEAU 19
Tableau détaillé pour scénario 3 : simulation comparable. Unités en pieds carrés. Source : auteurs.

Titre	A	B	C	D
	Mesuré	Mesuré	C = A - B	Mesuré
Étage	Superficie brute mesurée	Vide technique vertical	Superficie préliminaire	Superficie commune d'étage
RDC	13,771.80	630.57	13,141.23	1,387.74
2 ^e	13,415.40	2,346.60	11,068.80	2,168.50
3 ^e	13,691.22	1,318.62	12,372.60	1,422.80
4 ^e	13,682.60	1,303.20	12,379.40	1,631.60
5 ^e	12,305.20	1,408.60	10,896.60	1,524.90
Total	66,866.22	7,007.59	59,858.63	8,135.54

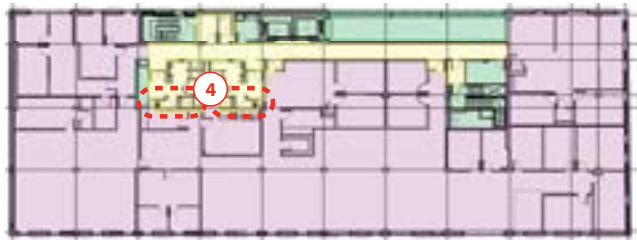
Rez-de-chaussée



2^e étage



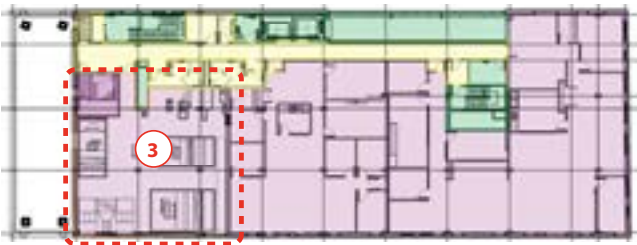
3^e étage



4^e étage



5^e étage



LÉGENDE

- espace locatif
- espace commun – étage
- espace commun bâtiment
- vide technique
- A atrium locatif
- B salles de conférence
- C rangement cuisine
- 1 salle de géothermie
- 2 rangement vélo
- 3 salle mécanique
- 4 douches

Scénario 3 : Simulation la plus efficace avec la méthode BOMA à partir des plans de la MDD. Source : auteurs.

TABLEAU 20

Pertes locatives liées à l’adoption d’un facteur L/U de 1,15. Unités en pieds carrés. Source : auteurs.

	Superficie occupée	Facteur L/U adopté	Superficie locative adoptée	Revenus de loyers (13 \$/pi.ca)	Par pi.ca occupée	Perte
Scénario 1	40,280.10	1.150	46,322.12	602,187.50 \$	14,95 \$	
Scénario 2	44,132.75		50,752.67	659,784.65 \$		-57,597.16 \$
Scénario 3	46,740.09		53,751.11	698,764.42 \$		-96,576.92 \$

TABLEAU 21

Différence de la

	Superficie occupée	Facteur L/U combiné	Superficie locative réelle	Revenu potentiel (13 \$/pi.ca)	Coût par pi.ca. occupé	Différence par pi.ca. occupé
Scénario 1	40,280.10	1.486	59,858.63	778,162.17 \$	19.32 \$	
Scénario 2	44,132.75	1.356			17,63 \$	- 1.69 \$
Scénario 3	46,740.09	1.281			16.65 \$	- 2.67 \$

TABLEAU 22

Les pertes locatives découlant de trois scénarios par rapport au montant initial établi en 2012 (facteur L/U adopté de 1,15 et 40.280 pi² de superficie occupée). Unités en pieds carrés. Source : auteurs.

	Superficie occupée	Facteur L/U adopté	Facteur L/U réel	Superficie locative adoptée	Superficie locative réelle	Différence	Perte
Scénario 1	40,280.10	1.150	1.486	46,322.12	59,858.63	-13,536.515	-\$175,974.70
Scénario 2	44,132.75		1.356	50,752.67		-9,105.965	-\$118,377.54
Scénario 3	46,740.09		1.281	53,751.11		-6,107.521	-\$79,397.77

Références

Avison Young. (2017). T1: Rapport du marché des espaces de bureaux T1 2017 Grand Montréal (pp. 12).

Bockmann, Rich. (2015). Efficiency proficiency: Today’s floor plans may be as good as they get. *The Real Deal*. <https://therealdeal.com/2015/11/16/efficiency-proficiency-todays-floor-plans-may-be-as-good-as-they-get/>

BOMA Canada. (2018). About BOMA Canada. Retrieved le 6 mars, 2018, 2018, from <http://bomacanada.ca/aboutbomacanada/>

BOMA Québec. (2016). Guide sur la classification des immeubles de bureaux (pp. 13). Québec.

Equiterre. (2018). Bilan de la consommation énergétique: Analyse de la performance énergétique de la Maison du développement durable (Vol. 2, pp. 35). Montréal, Canada.

Equiterre, MSDL, BPA, PSA, Teknika-HBA, PMA, . . . ETS. (2007). *Compte rendu de la réunion*. Montrela.

Facilities Standards. (2017). Mechanical, Electrical Space Programming. Retrieved July 18th, 2018, from <http://www.fs.illinois.edu/resources/facilities-standards>

GSA. (2017). 5.7 Arrangement of Mechanical Spaces. Retrieved July 18th, 2018, from <https://www.gsa.gov/node/82731>

Immen, Wallace. (2017, April 9th). Office renovation sticker shock: Getting the best bang for the budget, *The Globe and Mail*. Retrieved from <https://www.theglobeandmail.com/business/industry-news/property-report/article-office-renovation-sticker-shock-getting-the-best-bang-for-the-budget/>

MDD équipe de conception. (2007). Réunion de coordination 2 *Notes de rencontre*. Laboratoire GRIDD, Montréal, QC.

Mockford, Angela. (Fall 2010). One size does not fit all: the new BOMA Standard 2010 for office buildings. In W. F. LLP (Ed.). Toronto.

National Research Council of Canada Associate Committee on the National Building Code. (1990). *National building code of Canada*: Associate Committee on the National Building Code, National Research Council.

Peritz, Daniel. (2018). Informational interview. In A. O. a. R. Leoto (Ed.).

Rolfe Judd Architecture. Modern Office Standards Poland: A guide to practice in the design and specficiation for offices (pp. 36). Poland: Rolphe Judd.

Sev, Ayşin, & Özgen, Aydan. (2009). Space efficiency in high-rise office buildings. *Metu Jfa*, 2.

Simon, Herbert A. (1996). *The sciences of the artificial: MIT press*.

Watts, Steve, Kalita, Neal, & Maclean, Michael. (2007). The economics of super-tall towers. *The structural Design of tall and special buildings*, 16(4), 457–470.

Yeang, Ken. (1996). *The skyscraper bioclimatically considered: a design primer*: Academy Editions Ltd.



Photo : Antoine Saito

VOLET 5

REVÊTEMENT EN BÉTON

Auteurs : Hela Boussoffara et Normand Roy | Ce volet a été produit par l'équipe d'Équiterre.

5.1. Introduction

« La qualité finale du béton est le résultat harmonieux d'un béton de base et d'une couche de finition. Les critères requis pour le béton de base sont la résistance, la capacité portante du sol, l'ouvrabilité constante (fluidité et stabilité), le comportement au retrait, la collaboration avec les armatures et le diamètre maximal des granulats. En ce qui concerne la couche de finition, ce sont des critères de durabilité, de dureté de surface et d'esthétique qui priment » (FEBELCEM, 2011, p. 6).

La Maison du développement durable a opté pour un plancher en béton poli de couleur naturelle au rez-de-chaussée et pour une partie du deuxième étage. Ce choix a potentiellement des conséquences importantes puisque rien sur le plancher ne permettra de camoufler les défauts de la dalle structurale.

Dans ce rapport, nous mettrons en évidence les particularités de ce type de revêtement, les différents enjeux soulevés par son utilisation dans la MDD et les recommandations techniques spécifiques à son entretien.

5.2. Les avantages du béton poli

« Par une technique de meulage aux diamants, les parties friables (laitance) à la surface de béton sont éliminées pour faire apparaître la partie dure de celui-ci. Combinée à l'application de densifiant liquide, cette technique rend la surface de béton plus solide, résistante, brillante et anti-poussière. Au lieu d'appliquer un matériel plus faible sur le béton, nous affinons et augmentons les qualités de celui-ci » (Groupe JM Poulin, s. d.). Selon l'entreprise Béton Prestige, le béton poli se révèle être la meilleure solution de revêtement de plancher sans allergène puisqu'il est produit sans émission de COV. « La plupart des sols industriels sont constitués aujourd'hui par du béton. Un béton bien placé constitue une surface dure et durable capable de répondre à la plupart des exigences pour un prix relativement modeste » (H. B. Dickens, 1986). En réduisant considérablement la pénétration de l'humidité et par conséquent, la croissance des bactéries, le béton poli assure une bonne qualité de l'environnement intérieur.

Dans l'article *Efficacité énergétique : tirer profit du béton* publié en 2017 par Voir vert, Anik Shooner, architecte de la MDD, insiste sur l'avantage énergétique d'un plancher en béton. Durant l'été, le béton poli est naturellement plus frais ; en hiver, si le bâtiment a été conçu pour exposer le plancher à la lumière naturelle, celui-ci emmagasinera la chaleur. La nuit, il libérera cette chaleur et offrira un plus grand confort thermique. De ce fait, la facture énergétique pour le refroidissement et le chauffage descend considérablement. Un plancher de béton est donc un choix économique et écologique. Pour réaliser ces économies, Mme Shooner précise que le béton doit être exposé et non confiné entre d'autres matériaux de revêtement. Selon elle, la Maison du développement durable utilise bien cet effet de masse thermique avec une surface de plancher en béton poli exposé au rayonnement solaire par un mur-rideau en verre.

Dans le même article, Anik Shooner évoque un autre avantage du béton poli, soit l'économie de matériaux. En choisissant de garder la dalle de béton comme revêtement, nous évitons l'impact environnemental et les coûts associés à un revêtement de finition supplémentaire.

5.3. La mise en place du béton poli:

Pour obtenir un fini qui soit beau et durable, les étapes suivantes sont requises :

a. Polissage

Le béton peut être rendu lisse et brillant par la seule action abrasive de diamants très fins. Une opération devant être effectuée au minimum 28 jours après la coulée, soit quand la dalle a atteint 90% de sa résistance mécanique. Le meulage du béton s'effectue en trois passages, chaque fois avec une grosseur différente de diamant, en allant du plus gros vers le plus fin. Le résultat final donnera une surface propre et droite avec une apparence chatoyante. Pour une meilleure durabilité, la plupart des experts conseillent d'utiliser un scellant densificateur haute performance.

b. Densification

Un béton brut contient de nombreuses petites poches d'air, des pores, qui absorbent l'humidité et libèrent de la poussière dans l'air de manière constante. Il est possible de se représenter le densificateur comme du « verre liquide » que l'on verse sur les planchers afin de remplir et sceller ces pores. Le liquide les pénètre puis durcit, laissant une surface luisante plus durable et repoussant les taches. Cette opération, par le fait même, empêche le béton de libérer sa poussière dans l'air.

« Les densificateurs à base de silicate sont résistants, durables, non toxiques et peu dispendieux », (Écohabitation, 2017). Ils représentent une révolution dans l'industrie au point que tous les planchers de béton commerciaux et résidentiels devraient bientôt les avoir adoptés.

Le densificateur utilisé à la Maison du développement durable, le Pentra Sil (244+), est un produit à base de nano Lithium Silicate. Cet enduit joue le rôle d'un scellant durcisseur et densificateur procurant une protection contre le calcium et inhibant la poussière. De couleur transparente, sans odeur ni émission de COV, son application est rapide et le sol est prêt à l'usage dans les heures qui suivent. Pour son entretien régulier, le fabricant recommande un frottement mécanique ou manuel avec une eau au pH neutre. Il est déconseillé d'utiliser des détergents acides ou à base d'agrumes puisque ces derniers causeraient des colorations résiduelles.

Selon Écohabitation, chaque densificateur de silicate (sodium, potassium, lithium) pénètre le béton à une profondeur différente. Les silicates de lithium offrent un fini plus brillant que ceux au sodium et au potassium, mais pénètrent moins en profondeur, soit un millimètre. Les produits à base de potassium pénètrent le béton sur deux millimètres et ceux au sodium encore plus. « Pour un sol très lustré, on opte ainsi pour un fini au lithium, et pour moins de tracas à long terme, celui au sodium. Évidemment, tous les densificateurs sont très durables et offrent un beau fini lustré. On ne s'étend donc pas trop longtemps sur la question » (Écohabitation, 2017).

La publication d'Écohabitation intitulée *Dalles et planchers de béton : Sceller, protéger et faire briller d'un coup*, précise que les différents densificateurs ne sont pas équivalents pour ce qui est de la pose. Le silicate de sodium produit une poudre très fine qui peut être difficile à nettoyer, ce qui ne se produit pas avec le lithium. Les produits en lithium se nettoient plus facilement, mais ils sont légèrement plus coûteux à l'achat.

c. Le scellement du béton poli

Le scellant sert à imperméabiliser le béton pour le protéger des taches et limiter le dégagement de poussières. « Les produits de scellement sont généralement sans odeur et à base d'eau avec du Silane ou du Siloxane » (Centre de soumissions en Habitation du Québec, s.d).

Selon Yves Perrier, il est possible d'utiliser un scellant de surface ou un scellant qui pénétrera dans le béton en ne formant aucun film superficiel. « Le scellant de surface protège mieux le béton contre les taches provenant des aliments acides comme les agrumes, le vinaigre ou le vin. Le scellant pénétrant est recommandé là où il n'y a pas d'acides alimentaires, car il est plus durable. Il durera environ cinq ans avant un nouveau traitement alors que le scellant de surface doit être refait tous les deux ans » (Yves Perrier, 2015). Selon Perrier, même en présence d'une protection de surface, il ne faut pas attendre avant de nettoyer sinon la tache peut s'incruster.

Une couche de PENTRA-FINISH (LI), anciennement PENTRA-GUARD HP, a été appliquée sur le plancher de la Maison du développement durable après le polissage. Selon son fabricant, ce produit combine la protection durable d'un durcisseur pénétrant avec la haute performance d'un revêtement transparent et brillant. Il rendrait le béton plus résistant aux taches en formant une micro couche de surface résistante à l'abrasion, qui respire, ne pèle pas et ne s'écaille pas, réduisant ainsi les coûts de nettoyage et les réparations coûteuses.

5.4. L'entretien d'un plancher en béton poli: le cas de la MDD

« Alors que plusieurs des produits alimentaires que nous consommons sont de nature acide – café, agrumes, tomates, etc., la plupart des produits de finition pour béton sont de nature alcaline. Lorsque les produits acides se déversent sur un plancher alcalin et y sont laissés assez longtemps, ils neutralisent l'alcalin, ce qui produit une tache grise. Dans l'industrie, on appelle ce nouvel élément décoratif une « gravure » (Écohabitation, 2017)

Selon l'entreprise Politech, spécialiste des planchers en béton, les méthodes d'entretien suivantes devraient s'appliquer à la MDD :

- Laver à l'eau seulement ou avec un savon recommandé par le fabricant (HTC)
- Éviter d'appliquer de la cire ou tout autre produit similaire
- Utiliser une machine Tennant (type 5700 ou T3) pour le nettoyage
- Repolir la dalle une à deux fois par année avec une polisseuse à haute vitesse (3 000 tr/min)
- Effectuer un entretien quotidien pour contrer l'effet des sels de déglacages et du calcium
- Utiliser du sable comme antidérapant au lieu d'agents de déglacages à base de calcium

- Installer des tapis aux entrées en période hivernale
- Nettoyer les tapis quotidiennement à l'eau
- Utiliser un produit de nettoyage non mordant pour l'entretien courant
- Éviter une eau trop chaude et l'eau de Javel

5.5. Inconvénients du béton poli : Le cas de la MDD

Pour limiter les risques relatifs à la dalle en béton poli, un échantillon témoin a été réalisé puis inspecté par les architectes. Le résultat du test a été jugé généralement satisfaisant à l'exception de l'apparition de taches grises et de cavités à la surface du béton.



Échantillon de polissage pour approbation par le client.

Des taches de couleur gris foncé de forme carrée mesurant approximativement 150x150 mm sont apparues à certains endroits et semblent correspondre à la localisation des vérins servant de support temporaire aux dalles durant leur murissement. Cette défaillance ne pouvant être corrigée, elle a été jugée acceptable par les architectes et son client.



Taches de vérin. Photo : Antoine Saito.

À la suite de l'étape du polissage, des cavités sont aussi apparues à la surface de la dalle témoin. Alors que les architectes demandaient de tester une méthode de réparation sur la dalle témoin, l'entrepreneur a réparé l'ensemble de la dalle du CPE. Les architectes ont qualifié le résultat d'inacceptable et ont demandé à ce que les réparations soient reprises. Des discussions avec les entrepreneurs impliqués et des représentants commerciaux ont mené à l'identification de deux approches pouvant permettre de combler ces cavités sans augmenter la visibilité des défauts de finition. Impliquant une intervention individuelle sur chacune des cavités, cette stratégie s'avérait donc très dispendieuse pour l'entrepreneur. C'est sans doute pour cette raison que cette déficience est disparue des listes de déficiences à régler par l'entrepreneur.



Tentative de réparation des cavités.

Le béton poli de la MDD présente aussi deux importantes taches brunes qui se sont vraisemblablement produites par le déversement d'un liquide quelconque sur la dalle lors de sa cure. L'impossibilité de connaître à l'avance la profondeur des tâches empêche de prédire le résultat d'une tentative de réparation. Le responsable du polissage du béton et son fournisseur de matériaux, présents lors de l'inspection, ont recommandé de ne pas intervenir. Dans l'éventualité où une intervention doit absolument être réalisée, il est proposé de polir davantage les zones présentant des taches. Les résultats suivants pourraient être obtenus :

- La tache persiste et les agrégats du béton refont surface
- La tache disparaît partiellement ou complètement en laissant une légère dépression à la surface de béton
- La tache disparaît, mais les agrégats du béton se retrouvent exposés

Ainsi, la seule certitude relativement à une tentative de réparation est qu'il sera impossible d'obtenir un fini uniforme dans les secteurs touchés. Sur cette base, ces taches n'ont pas fait l'objet de tentative de correction.



Tache brune présente dès la fin des travaux. Photo : Antoine Saito.

Parmi les fissures apparues au rez-de-chaussée, celles situées dans le restaurant ont causé de plus vives préoccupations puisqu'elles sont situées dans un secteur vulnérable à l'accumulation de saletés et de corps gras. Une inspection visuelle réalisée par l'équipe de construction a permis de constater que les matières grasses s'accumulaient bel et bien le long de la fissure et s'infiltraient dans celle-ci. L'ingénieur chargé du projet a par contre confirmé qu'elles ne constituaient pas un danger d'un point de vue structural et a proposé d'effectuer des injections d'époxy. Le représentant en matériaux de construction a quant à lui recommandé d'ouvrir les fissures sur une profondeur suffisante pour permettre la pose d'un scellant à haute adhérence. Au premier abord, la première solution a été privilégiée puisqu'elle semblait permettre une réparation plus discrète. Il a donc été décidé d'effectuer un essai sur une portion d'une des fissures et de compléter la réparation lorsque la solution serait validée. Cette réparation n'a jamais été effectuée.



Fissure dans la dalle du rez-de-chaussée. Photo : Antoine Saito.

La finition des dalles de béton par polissage a aussi pour conséquence d'exposer les fissures de retrait. Dans ce contexte, deux approches principales sont possibles : le développement aléatoire des fissures issues d'une non-intervention ou la « gestion » du processus par l'aménagement de joints de retrait sciés permettant d'imposer un schéma de fissuration structuré et planifié. L'inconvénient principal de l'approche aléatoire est qu'elle rend les fissures particulièrement difficiles à protéger contre la saleté qui a tendance à s'y accumuler. Le nettoyage requis s'avère alors très fastidieux.

Entretien

« Le béton est réputé durable. L'expérience de cette durabilité est toutefois fort limitée en termes d'échelle temporelle : nombreux sont les facteurs – internes et externes – qui peuvent amener une dégradation parfois très rapide du matériau. Fort heureusement, ces dégradations n'ont que très peu souvent d'effet irrémédiable sur le comportement structural de l'ouvrage en béton » (L. Courard, 2006, p. 39)

« Depuis une dizaine d'années, les magasins ayant fait réaliser des planchers de béton poli ont été aux prises avec des coûts astronomiques pour refaire annuellement le lustre du béton. En effet, le béton poli est affecté par les savons et tampons d'entretien ménager qui lui enlèvent son lustre. De plus, la surface polie s'use rapidement sous les souliers des clients. Jusqu'à récemment, les planchers de béton poli et leur protecteur devaient être refaits régulièrement pour maintenir leur lustre ce qui engendrait des coûts importants, des odeurs, de la poussière et des soucis de gestion du plancher. Le problème était tel que plusieurs architectes déconseillaient l'usage du béton poli pour les magasins et ce produit commençait à perdre de sa popularité » (Perrier, 2015).

Taches de surface (café, vin, eau, etc.)

Déjà, après seulement quelques semaines d'occupation, la MDD exposait à son équipe de professionnels ses inquiétudes concernant l'état général du béton poli et la présence de taches difficiles à éliminer. Le représentant d'un équipementier pour béton, présent à cette occasion, a confirmé que les surfaces réalisées à la MDD étaient parfaitement comparables à celles réalisées dans d'autres projets de cette envergure. Réagissant à la présence de taches, il a expliqué que la méthode d'entretien de ce type de fini, telle que décrite dans le manuel d'entretien transmis par l'entrepreneur, devait être respectée à la lettre. Le gestionnaire de l'immeuble a indiqué que depuis le début de l'occupation de l'immeuble, seul du nettoyage à l'eau avait été réalisé puisque la polisseuse récemment achetée n'était pas encore livrée. L'équipementier a précisé que toute tâche qui n'est pas nettoyée rapidement risque de rester apparente ou d'être difficile à nettoyer. Il a recommandé à ce moment la réalisation d'un nettoyage avec une polisseuse à disque afin que le plancher revienne à son état d'origine. Selon lui, la grande majorité des tâches de surfaces relevées lors de l'inspection devraient alors disparaître. Le nettoyage recommandé n'a jamais été effectué.

Après 7 ans d'utilisation (et aucun nettoyage autre que le passage d'une mope), de nombreuses taches indélébiles sont apparues. Selon l'équipe responsable de la tenue d'événements dans les salles pourvues de tels planchers, les produits suivants sont plus susceptibles de faire apparaître des taches récalcitrantes : liste des causes de taches.

Dans certaines conditions, sans doute dues principalement à l'accumulation fréquente d'eau chargée de sels de déglacage dissouts, le béton poli peut se dégrader sérieusement. Ce type de dégradation est apparue aux endroits les plus fréquentés du bâtiment, mais non protégée par des tapis, comme les côtés des grilles gratte-pieds de l'entrée principale, face à la caisse enregistreuse du restaurant et au pied de l'escalier principal. Les surfaces dégradées, criblées de crevasses peu profondes, mais présentes en grand nombre, ont perdu leur aspect lisse et homogène.



Détérioration dû au sel de déglacage. Photo : Antoine Saito.

Pour limiter le danger de chutes les jours de pluie, un tapis a été installé aux diverses entrées du bâtiment. En période hivernale, des tapis similaires sont installés jusqu'aux ascenseurs. Ceux-ci sont nettoyés deux fois pendant la saison hivernale en utilisant de l'eau et un détergent neutralisant (Neutrac Auto).

Les tapis hivernaux, installés par notre entreprise d'entretien ménager, sont maintenus en place à l'aide d'un ruban adhésif qui laisse des marques de colle sur le plancher une fois les tapis retirés. Ces traces sont particulièrement difficiles à enlever, voire impossibles à faire disparaître. Des essais de polissage au diamant avec une machine rotative à grande vitesse n'ont pas permis de faire disparaître complètement de telles marques.



Traces de ruban adhésif. Photo : Antoine Saito.



Tentative de nettoyage par polissage.

Budget d'entretien du plancher en béton poli

L'entreprise Politech, chargée du polissage initial des dalles de la MDD, recommande de repolir les dalles au moins une fois par année avec une polisseuse à haute vitesse (3 000 tr/min) en plus d'un nettoyage quotidien effectué à l'eau. À deux reprises, soit en 2011 et 2016, la MDD a fait évaluer les coûts d'un tel repolissage par l'entreprise chargée à ce moment de l'entretien ménager quotidien du bâtiment. L'estimation de 2016 a été produite après la réalisation de deux séries de tests visant à évaluer la performance des tampons offerts par deux entreprises différentes (3M et HTC).

Les deux soumissions reçues pour le polissage d'une surface moyenne de 8033 pi² (les deux projets n'étaient pas similaires en tous points) s'élevaient respectivement à 4934 \$ (tampons exclus) et 8045 \$. Trois types de tampons de polissage sont nécessaires pour réaliser le travail. Selon le premier de ces deux fournisseurs, l'achat de trois boîtes de quatre tampons aux diamants constituait à ce moment une dépense estimée à 2500 \$, mais valable pour 20 polissages complets.

L'ampleur des coûts de l'opération a fait en sorte que les dalles de la MDD n'ont pas été repolies entre 2011 et 2018.

Références

Groupe JM Poulin. (2015). Annexes: Est-ce que les planchers de béton sont faits pour vous?, p1-6. Repéré à <http://groupejmpoulin.com/images/pdf/annexe-beton.pdf>

Hardy.P, Eng.Ms. (2011). Sols intérieurs en béton lissé destinés au secteur résidentiel. FebelceM Fédération de l’industrie cimentière belge. p.18. Repéré à https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-2008/fr/A3-FR-SolsBetonLisse.pdf

Perrier, Y. (2015). Poli et apparent : le béton pour planchers durables. Repéré à <http://guideperrier.ca/beton-poli-planchers-radiants/>

Dickens, H. B. (1963). Finition des dalles de béton. Division des recherches en construction, Conseil national de recherches Canada. Repéré à <https://nparc.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/accepted/?id=6b9a4cd2-6478-4359-b916-b093e280a1ad>

Garon, J. Efficacité énergétique : tirer profit du béton. Repéré à <http://www.voirvert.ca/nouvelles/dossiers/efficacite-energetique-tirer-profit-du-beton>

Courard, L. (2006). Durabilité des réparations du béton: entre théorie et pratique. Compte-rendu des Journées Scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B. Repéré à https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/134815/1/ULg_LC_texte_vf.pdf

Harmony Béton.(2014). Béton ciré sur sol : avantages et inconvénients. Repéré à <https://www.harmony-beton.com/blog/sol-en-beton-cire-avantages-inconvenients/>

Association béton Québec. (2014). *Les joints dans les dalles de béton*. Techno béton : bulletin technique No. 6. Repéré à https://www.agrireseau.net/banqueplans/Feuilles/Techno-Béton_no6.pdf

Baribeau, L. (2011). Les soins à apporter à la finition d’une dalle de plancher en béton. Conseils techniques : Bétonnage et fondation. P. 28-29. Repéré à http://www.jemeconstruis.com/admin/datas/Conseil_technique/Polissage_plancher_de_beton.pdf

Association béton Québec. (2014). Techno béton: bulletin technique No. 10: La finition des dalles de béton. 3^e édition, 2014-V0. Repéré à https://betonabq.org/wp-content/uploads/techno-beton/tbnumero10_2014_v01.pdf

Écohabitation. (2017). Dalles et planchers de béton: Sceller, protéger et faire briller d’un coup. Repéré à <https://www.ecohabitation.com/guides/1062/dalles-et-planchers-de-beton-sceller-protger-et-faire-briller-dun-coup>

Convergent. (2007). Pentra-Sil (244+) Salt protection and Dust Proofer, Hardener, Densifier, Sealer. Convergent Concrete Technologies. Repéré à <https://www.concretetreatments.com/Canada/EN/Curing-Hardening-Densification/p22-Pentra-Sil-244-Salt-Protection-Dust-Proofer-Hardener-Densifier-Seale>

Convergent. (2007). Pentra-Finish (Li), Advanced High-gloss Stain and Wear Protection Finish.

Convergent. (2007). Pentra-GuardTM, Durcisseur de surface industrielle de haute performance et revêtement protecteur transparent. Repéré à http://www.betonlc.com/pdf/pentra-guard/Pentra_Guard_HP_FR.pdf

Centre de soumissions en Habitation du Québec. Planchers de béton: les secrets du polissage. Repéré à <https://www.cshq.ca/chroniques/planchers-de-beton-les-secrets-du-polissage-55335.html>

PV-01 (fini de béton BE02) (2011). Préparé par Michel Tessier, chargé de projet, MENKES SHOONER DAGENAI LETOURNEUX Architectes

PV-39 Réunion de chantier (2011). Préparé par Michel Tessier, chargé de projet, MENKES SHOONER DAGENAI LETOURNEUX Architectes

PV-28 Réunion de chantier (2011). Préparé par Michel Tessier, chargé de projet, MENKES SHOONER DAGENAI LETOURNEUX Architectes

PV-29 Réunion de chantier (2011). Préparé par Michel Tessier, chargé de projet, MENKES SHOONER DAGENAI LETOURNEUX Architectes



Photo : Antoine Saito

VOLET 6

LE MUR VÉGÉTAL BIO-FILTRANT

Auteurs : Hela Boussoffara et Normand Roy | Ce volet a été produit par l'équipe d'Équiterre.

6.1. Introduction

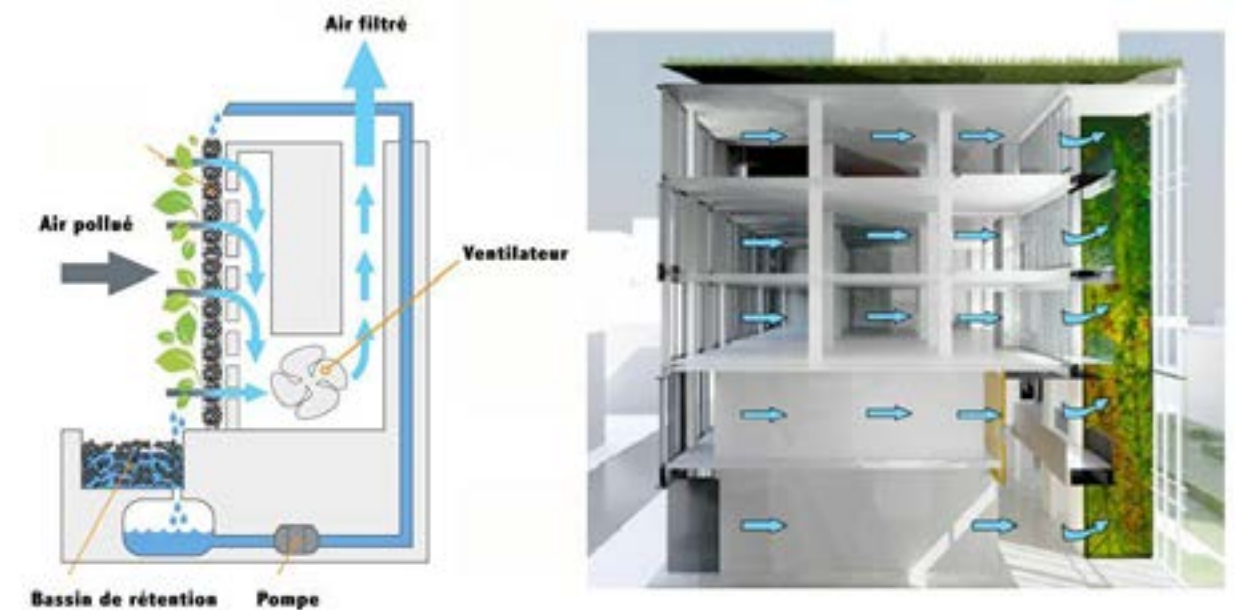
Dans le domaine des projets de bâtiments durables, plusieurs questions se posent quant à l'aptitude des innovations à contribuer positivement au bilan réel des projets. La présente étude vise justement à évaluer la contribution de l'une d'elles, soit le mur végétal biofiltrant de la MDD. En plus de tests de qualité de l'air inédits, cette étude repose sur des données de sondage et sur l'ensemble de la documentation relative à la mise en place et l'opération de cette technologie innovante. Ce travail fait ressortir plusieurs conclusions primordiales pour quiconque envisage la mise en place d'une telle installation.

6.2. Principe et description du système du mur végétal de la MDD

Le mur végétal installé dans l'atrium de la MDD, haut de 24 m, couvre une superficie de 48 m². À l'origine, il abritait 15 espèces de plantes sélectionnées en fonction de leur capacité à bien se développer dans un environnement intérieur.

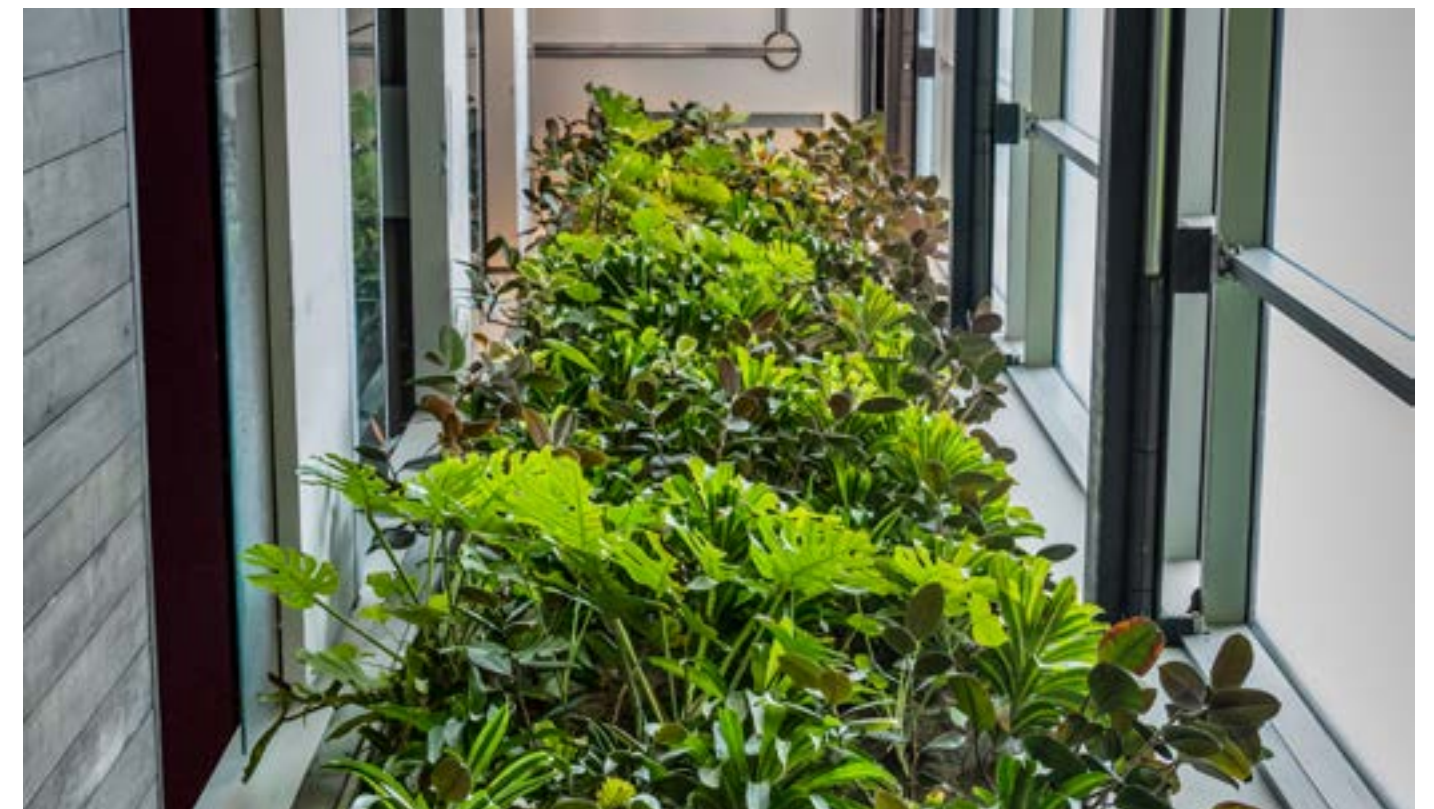
«Cela a commencé avec les biosystèmes et l'habitat extra-atmosphérique et s'est transformé en une technologie de biofiltration qui nettoie l'air que nous respirons», déclare Alan Darlington, fondateur et vice-président senior chez Nedlaw, fabricant du mur végétal de la MDD. Liée aux recherches spatiales réalisées par Darlington pour le compte de la NASA, l'idée est née de la recherche d'une technologie visant à purifier l'air des astronautes et produire des aliments lors de missions spatiales de longue durée. «Bien qu'il ait été difficile pour les biomurs de respecter les restrictions techniques des voyages dans l'espace, ils étaient totalement viables sur Terre, nous avons donc déplacé l'application vers les utilisations terrestres», déclare Alan Darlington. Les résultats remarquables de ce concept ont été étudiés en détail à l'Université de Guelph avant que le chercheur ne commercialise l'idée par l'entremise d'une entreprise fusionnée avec Nedlaw, spécialiste en toitures.

Selon l'architecte Donald Schmitt, designer des premiers murs végétaux, ces derniers ne sont pas simplement une collection de belles plantes cultivées sur une surface verticale, mais constituent plutôt une partie intégrante du système de ventilation des bâtiments qui les accueillent. En effet, l'air vicié d'un bâtiment est aspiré à travers le système racinaire des plantes. Celles-ci contiennent des micro-organismes capables de consommer des polluants chimiques tels que ceux émis par la peinture, les adhésifs et scellants, les meubles, les nettoyeurs ménagers et les produits de soins personnels.



Principe de fonctionnement du mur végétal bio-filtrant

Selon Nedlaw, ces systèmes ont aussi des propriétés hypoallergènes puisqu'ils réduisent la concentration de poussières, de spores et de bactéries atmosphériques dans l'air. Cette caractéristique explique par ailleurs pourquoi ces murs contiennent rarement des fleurs, qui sont plus souvent porteuses d'allergènes « et causent parfois pas mal de dégâts quand elles fanent », selon Ashley DeMarte.



Mur végétal de la MDD. Photo : Antoine Saito.

La capacité filtrante des murs végétaux bioactifs permet en principe de réduire le volume d'air extérieur nécessaire à l'assainissement de l'environnement intérieur des bâtiments, occasionnant par le fait même des économies énergétiques et monétaires significatives. L'évapotranspiration leur étant associée contribue d'autre part au refroidissement et à l'humidification du bâtiment, contribuant aux économies.

6.3. L'entretien du biomur Nedlaw et son coût d'exploitation

Un mur végétal nécessite un entretien équivalent à celui requis pour un jardin ou une plante d'intérieur normal, ce qui se traduit, selon Nedlaw, par au moins une session mensuelle d'entretien. Les contrats d'installation de Nedlaw incluent un programme d'entretien d'un an. Pour les années ultérieures, le propriétaire doit prévoir des coûts d'entretien représentant environ 10 % du coût d'installation. Toujours selon Nedlaw, environ 70 % des besoins en entretien d'un tel mur sont de nature horticole, les autres ressources devant être allouées à la vérification, l'entretien et la réparation des éléments techniques, tels que les pompes, les filtres et les contrôleurs.

Selon les fiches techniques de Nedlaw intitulées « Maintenance Programs » et « Operating Costs and Considerations for a Nedlaw Living Wall Biofilter », chaque visite d'entretien doit comprendre les tâches décrites ci-dessous. Selon l'entreprise, il faut compter 2,5 heures par mois pour maintenir un biofiltre de murs vivants de 200 pieds carrés.

Inspection, nettoyage, taille et remplacement des plantes

Une taille périodique, le retrait des matières végétales mortes et le remplacement des plantes mortes ou moribondes. L'expérience de Nedlaw indique qu'environ 90 % des plantes survivent chaque année (Nedlaw, 2017).

Vérification et remplacement des composantes techniques

La durée de vie de l'éclairage, des pompes et des

ventilateurs est généralement de l'ordre de trois à sept ans dans des conditions de fonctionnement normales. Le support de croissance, quant à lui, aurait une durée de vie encore plus longue. Nedlaw précise n'avoir encore jamais remplacé un support de croissance complet sur un biomur (le premier mur de Nedlaw ayant été installé en 2004). L'entreprise prévoit conserver 75 % des plantes existantes lors d'une éventuelle opération de remplacement du support de croissance.

Lutte antiparasitaire

Selon Nedlaw, l'un des meilleurs moyens de lutter contre les organismes nuisibles consiste à « laver » systématiquement les plantes avec une solution de savon diluée (proportion eau-savon de 40-1). L'ajout d'une petite quantité d'alcool à friction ou de jus de citron à la solution protégera davantage les plantes.

Inspection du système d'éclairage artificiel

Alors que certaines plantes peuvent tolérer aussi peu que 75 pieds-bougies, la plupart des murs vivants ont besoin d'au moins 125 pieds-bougies pendant 18 heures par jour, ou l'équivalent de 100 watts de lumière (non incandescente) par mètre carré. La lumière naturelle n'est pas essentielle à la croissance des plantes, Nedlaw ayant installé plusieurs biofiltres se développant adéquatement sous une lumière artificielle. L'éclairage devra être rectifié si l'environnement immédiat a été altéré au point d'atténuer la quantité de lumière reçue par le mur.

Les autres tâches nécessaires à la bonne marche des biofiltres sont : l'inspection du débit d'eau, la régulation de niveau et les drains, le nettoyage de la surface de l'eau et du bassin, l'analyse et l'ajustement de la qualité de l'eau pour le pH et la salinité, le suivi des systèmes de contrôle environnementaux et des équipements informatiques associés.

Le design et l'installation du mur végétal de la MDD ont coûté 81 486 \$, excluant les travaux préparatoires de base pour l'électricité, l'éclairage et la plomberie. Dans sa soumission de 2008, Nedlaw estimait les frais annuels d'entretien du mur végétal à 11,098 \$ (contrat Équiterre-Nedlaw, 2008).

Depuis sa mise en service en août 2011, l'entretien du mur végétal de la MDD a entraîné les dépenses suivantes:

Entretien régulier : 52 817 \$ (moyenne annuelle 2013-2017 = 9 990 \$)

Remplacement des plantes : 8 659 \$ (moyenne annuelle 2013-2017 = 1 732 \$)

Réparation et remplacement des pompes : 5 025 \$

L'entreprise Alphaplantes est responsable de l'entretien du mur végétal depuis le mois d'octobre 2012.

En plus des coûts énumérés ci-dessus, plusieurs milliers de dollars ont aussi été dépensés pour résoudre un problème technique ayant perturbé le fonctionnement des pompes entre le mois d'août 2011 et décembre 2014. Ces montants, intégrés aux dépenses d'entretien électrique général, n'ont pu être retracés avec précision dans le cadre de notre étude.

6.4. Enjeux relatifs à l'utilisation du mur végétal de la MDD

Plusieurs inconvénients techniques sont survenus depuis l'installation du mur végétal. Les plus notables sont :

Deux épisodes de mortalité sévère ont requis le remplacement de la majorité des plantes du système. L'un a eu lieu immédiatement après l'implantation, soit en août 2011, et l'autre à l'hiver 2012. Les raisons exactes de la première vague de mortalité sont inconnues, mais elle pourrait être attribuable à une surchauffe durant la purge du bâtiment. La purge, associée à la certification LEED, implique de ventiler exagérément le bâtiment durant plusieurs jours alors que celui-ci n'est pas occupé ; une opération ne permettant pas l'utilisation de la climatisation. La seconde vague de mortalité, survenue durant l'hiver, pourrait avoir été causée par la température de l'eau d'alimentation du mur. À ce moment, en raison du mauvais fonctionnement des pompes, le mur végétal était alimenté directement par l'eau municipale.

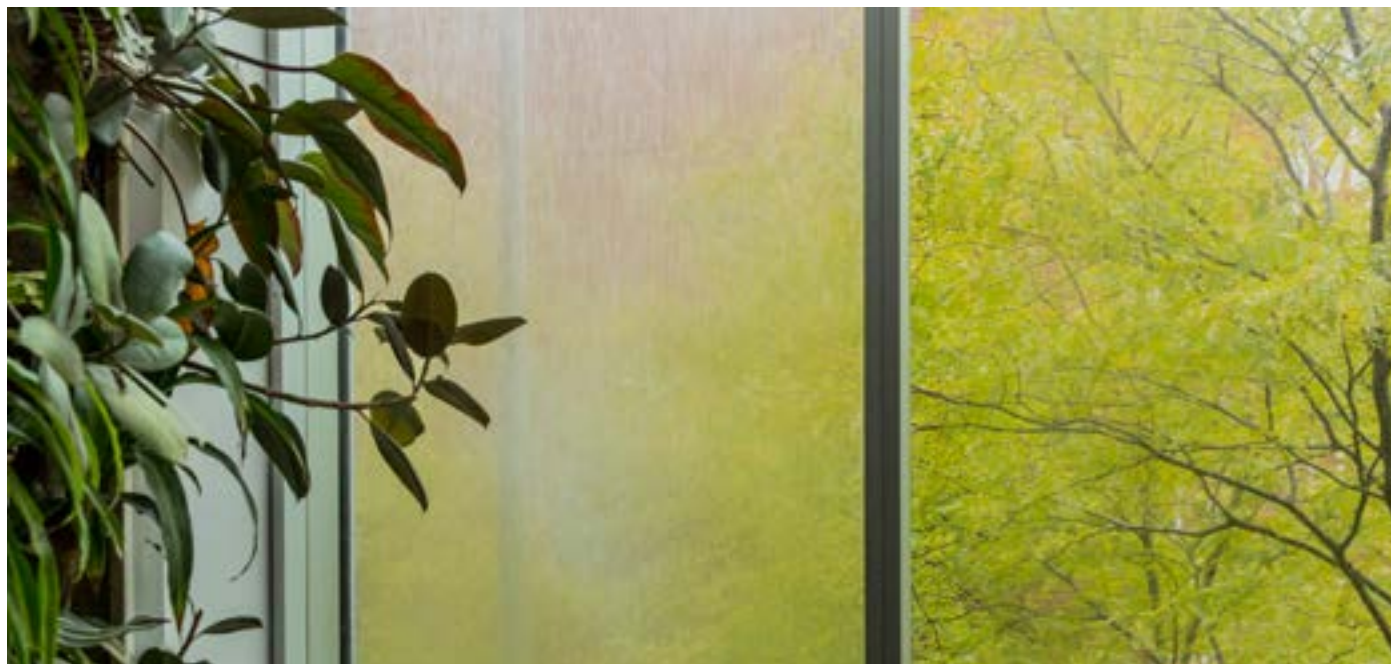
Bien que la soumission-contrat de Nedlaw pour le projet inclut des services de consultation en vue d'une bonne planification de la finition des surfaces adjacentes au mur végétal, de nombreux inconvénients associés à l'humidité sont apparus. Vraisemblablement tributaire de la croissance des plantes, il est fréquent que l'eau, devant percoler à l'intérieur du système, s'en échappe en suivant une tige ou une feuille, arrosant par le fait même les surfaces périphériques. Les surfaces en gypse, en acier, en verre et en bois souffrent toutes, dans différentes mesures, de ces fuites.



Détérioration peinture et gypse. Photo : Antoine Saito.



Détérioration de la poutre d'acier. Photo : Antoine Saito.



Tâches sur le verre adjacent au mur végétal. Photo : Antoine Saito.

Le guide d'utilisation et d'entretien fourni par le fabricant du mur stipule que l'introduction de nouvelles plantes doit se faire en limitant au minimum l'introduction de terre dans le système. La technique optimale pour y arriver consiste à agiter les plantes pour en faire tomber la terre pour ensuite tremper les racines dans l'eau pour les laver. L'équipe responsable de l'entretien du mur ayant omis de réaliser cette opération durant plusieurs années, l'espace entre les deux membranes de support se trouve « contaminé ». La présence de terre à cet endroit nuit à l'écoulement de l'eau, au passage de l'air, et favorise le développement de maladies et de moisissures pouvant contaminer l'air et causer des odeurs. On compte 340 plantes ayant été remplacées entre mai 2012 et septembre 2018.

Des problèmes de pompes, soit le déclenchement de leur disjoncteur, sont apparus dès la mise en marche du système. Nedlaw et le fabricant des pompes, Grundfos, ont analysé l'une des pompes en laboratoire sans qu'il soit possible d'identifier la nature du problème. Les problèmes survenant de façon aléatoire et souvent après de longues périodes de bon fonctionnement, la recherche d'une solution a souvent été remise à plus tard. Sur les conseils de divers électriciens, la MDD a remplacé le câblage électrique servant à l'alimentation des pompes et a fait refaire les connexions sous-marines entre les pompes et les câbles d'alimentation. Les disjoncteurs ont aussi été remplacés par des modèles d'un ampérage plus élevé. Sans succès. Des recherches documentaires sur Internet ont finalement permis de déterminer que la sensibilité des disjoncteurs GFCI utilisés pour les pompes (5mA) était beaucoup plus basse que celle recommandée par le fabricant des pompes (25mA).

L'entreprise mandatée pour l'entretien du mur de la MDD affirme que l'eau d'alimentation du mur était trop froide en hiver, une condition nuisant sensiblement au développement des plantes, une condition inévitable en raison de l'eau nécessaire provenant de l'aqueduc municipal (le mur requiert 400 à 600 litres de nouvelle eau par jour). À l'automne 2017, la MDD a installé un système tirant profit des excès de chaleur de la boucle d'eau chaude du bâtiment et de l'air ambiant dans la salle mécanique pour préchauffer l'eau d'alimentation du mur.

6.5. Le mur végétal, bien-être et productivité

De nombreuses études ont démontré les divers avantages physiques et psychologiques des bâtiments qui intègrent des caractéristiques naturelles et/ou de la vie végétale. Certaines d'entre elles montrent que l'inclusion des plantes à l'intérieur des bâtiments contribue au bien-être des personnes en réduisant le niveau de stress et en augmentant la productivité.

Le rapport Human Spaces commandé par l'entreprise Interface et dirigé par le psychologue organisationnel Cary Cooper, traite de l'incidence globale du design biophilique sur l'environnement de travail et analyse l'apport des végétaux dans le quotidien des employés de bureau. Selon cette étude réalisée auprès de 7 600 employés de bureau de 16 pays (Australie, Brésil, Canada, Chine, Danemark, France, Allemagne, Inde, Indonésie, Philippines, Pays-Bas, Espagne, Suède, Émirats arabes unis, Royaume-Uni et États-Unis), les environnements dotés d'éléments naturels provoquent une hausse de 15 % du sentiment de bien-être, de 6 % de leur productivité et de 15 % de leur créativité.

Or, les coûts et les implications logistiques associés à un déménagement ou aux aménagements pour installer un jardin intérieur au sein d'une entreprise constituent un frein à la végétalisation des espaces. C'est dans ce contexte que le jardin vertical prend tout son sens. Grâce aux murs végétaux, il est possible d'utiliser des surfaces jusque-là inoccupées pour créer des jardins, et par le fait même, générer du bien-être.

À la question *Est-ce que le mur végétal contribue à votre bien-être au travail ?*, 41 % des répondants ont répondu *tout à fait* ; 28 % *oui, plutôt* ; 21 % *assez* et 10 % *non, plutôt pas*. 73 des 92 répondants au sondage ont qualifié en termes narratifs l'influence du mur végétal sur leur bien-être. Leurs réponses peuvent être regroupées ainsi :

- 37 répondants ont mentionné la beauté ou les qualités esthétiques du mur. Des commentaires tels que ceux-ci se retrouvent dans cette catégorie : « Utile,

très beau, rend fière de son espace de travail », « un soupir de bien-être chaque fois que je passe les portes. Une merveille pour les yeux et l’âme ! », « La beauté de la nature est un rappel d’une des raisons pourquoi nous travaillons en environnement. »

- 14 répondants ont mentionné la qualité de l’air que le mur végétal peut apporter, comme le démontre l’exemple suivant : « Cette verdure est apaisante, énergisante, rafraîchissante, le poumon de notre environnement. »
- 7 répondants font référence positivement au bruit de l’eau, comme dans ce commentaire : « La végétation et le bruit de l’eau apaisent et incitent à la sérénité ». Deux autres répondants affirment par ailleurs être dérangés par le bruit.
- 4 répondants disent que le mur fait partie de l’image de la MDD, que c’est d’un symbole.
- 5 répondants réagissent positivement à la présence générale du mur. À titre d’exemple : « Le mur végétal donne de l’énergie positive surtout en hiver », « J’aime bien voir ce mur quand j’arrive, ça fait oublier le béton. »
- 4 personnes indiquent que le mur est beau, mais qu’il n’a pas d’impact sur leur travail. Les termes suivants ont été utilisés : « Le mur est beau, impressionnant, mais n’a pas d’impact sur mon travail », « c’est agréable en passant, mais je ne dirais pas que ça améliore mon bien-être au travail. »

Le narratif utilisé par les répondants pour décrire le mur ou son effet sur leur environnement est riche. Les qualificatifs suivants ont aussi été utilisés : relaxant, apaisant, amusant, énergisant, rafraîchissant, revigorant, motivant, majestueux, calmant et reposant. Les commentaires suivants ont aussi été formulés : « Il est assez dégarni du 5^e étage », « Il est un peu défraîchi », « La piètre santé des plantes ne donne pas à penser qu’elles sont heureuses dans cet environnement ».

6.6. La qualité de l’air

Dans un article publié par le Centre de collaboration nationale en santé environnementale, les auteurs précisent que les Canadiens passent environ 90 % de leur temps à l’intérieur. Selon eux, la qualité de l’air à l’intérieur d’un édifice « étanche » pourrait être encore plus dégradée que celle de l’extérieur, une condition pouvant entraîner des répercussions sur la santé, l’apprentissage et la productivité des occupants. Les sources de pollution de l’air intérieur sont les agents physiques (poussière, radon, amiante), chimiques (monoxyde de carbone, formaldéhyde et autres composés organiques volatils) ou biologiques (moisissures, acariens, bactéries, virus).

Un groupe d’experts de l’Organisation mondiale de la Santé (OMS) intéressés par ces questions a élaboré le concept du « Syndrome du bâtiment malsain » (Barthe, Y.; Rémy , C., 2010: 2), qui consiste en un ensemble de gênes respiratoires ou des maladies associées aux bâtiments, mais dont il s’avère difficile de découvrir l’origine exacte. Ce syndrome semble provenir de plusieurs sources, mais il est certainement lié à la quantité importante d’agents chimiques émis par de nombreux objets du quotidien tels que les meubles, les peintures, les matériaux de construction, des appareils électroniques et certains cosmétiques.

La norme 62 de l’American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) définit le niveau acceptable de qualité de l’air intérieur comme celui correspondant à « l’air qui ne contient pas de contaminants connus à des concentrations dangereuses, telles que déterminées par les autorités en la matière, ou qui sont susceptibles d’indisposer la grande majorité (80 % et plus) des personnes qui y sont exposées ». Cette norme peut être atteinte par la mise en place de l’une des trois procédures proposées par l’ASHRAE. Celle utilisée par la MDD consiste à réaliser un débit de ventilation d’air neuf minimal de 10 L/s/personne pour les espaces à bureaux.

Nedlaw affirme que ses murs végétaux améliorent l’environnement intérieur des bâtiments en réduisant les niveaux de contaminants dans l’air. Ainsi, un seul

passage de l’air à travers le mur éliminerait 75 % des produits chimiques nocifs accumulés dans l’air vicié, et cela, en utilisant 90 % moins d’énergie que les systèmes conventionnels de ventilation, tant dans la chaleur de l’été que dans le froid hivernal. Selon la compagnie, la liste de COV qui peuvent être partiellement éliminés par l’installation d’un mur végétal compte les composés suivants : 1,2,4-triméthylbenzène; 1,3-diméthylbenzène; 1,4-dichlorobenzène; α-pinène; Benzène; Cumene; Décane (C10); δ-limonène; Éthanol; Acétate d’éthyle; Ethyl Benzène; Formaldéhyde heptane; alcool iso-propylique (IPA); m + p-xylène; Méthyléthylcétone (2-Butanone, MEK); Naphtaline; Octane (C8); o-xylène; p-Cymene; Styrène; Toluène.

Lorsqu’il est conçu de façon optimale, chaque pied carré d’un biomur peut « nettoyer » 100 pieds carrés d’espace intérieur. Ce ratio implique que le mur de la MDD serait apte à traiter l’air d’approximativement 51 000 pi² d’espaces intérieurs, alors qu’elle en compte un total de 62 000 p² (dont des espaces techniques ventilés directement à l’extérieur).

Qualité de l’air de la MDD

Un mandat d’analyse a été confié à l’entreprise ENVIROPARFAIT afin de mesurer l’impact du mur végétal sur la qualité de l’air intérieur du bâtiment. L’expert mandaté a utilisé trois appareils de marque Airboxx possédant chacun six senseurs mesurant la température, l’humidité relative, le dioxyde de carbone (CO²), le monoxyde de carbone, les particules fines et les composés organiques volatils (COV). Ces mesures ont été prises entre le 29 mai et le 1^{er} juin 2018.

Pour cette analyse, des échantillons d’air ont été prélevés directement avant et après son passage à travers le mur végétal. Pour fins de comparaison, des échantillons ont aussi été collectés à d’autres emplacements à l’intérieur et à l’extérieur du bâtiment. Parmi les variables mesurées, on retrouve les particules totales en suspension (PTS), les PM10, PM7, les composés volatils totaux (COVT) et des décomptes microbiens.

TABLEAU 23
Résultats de mesurage des particules en suspension

	PTS	PM10	PM7
Bureau 2	10	5	2
Bureau 3	16	8	4
Bureau 5	12	5	3
Moyenne	12,7	6,0	3,0
↓ Filtration conventionnelle ↓			
Avant mur végétal	8	5	3
Après mur végétal	3	3	2
Extérieur	36	21	12

Les données récoltées, présentées ci-dessus, indiquent que le mur végétal réduit effectivement la quantité de particules dans l’air qui le traverse. Il est à noter que le mur semble plus efficace pour réduire le taux de particules fines dans l’air que les filtres (MERV 8), disposés entre les espaces à bureau et l’atrium ; l’air vicié des bureaux dans la MDD est transféré à l’atrium pour permettre la filtration par le mur végétal. Il est aussi intéressant de constater la différence importante entre la quantité de particules fines dans l’air extérieur

et l'air intérieur, sans doute due à la performance des filtres installés à l'entrée de l'air neuf (MERV 14) et à l'absence de fenêtres ouvrantes.

Il semble pertinent de noter que les concentrations de PM10 récemment mesurées dans les espaces à bureaux (moyenne de 6 µg/m³) sont semblables à celles mesurées par l'entreprise Exp. Celle-ci avait été mandatée pour évaluer la qualité de l'air du bâtiment immédiatement après la réalisation d'une importante purge d'une quinzaine de jours (100 % de ventilation extérieure sans présence humaine à l'intérieur) et avant l'occupation des locaux, soit une moyenne de concentrations de PM10 de 5,4 µg/m³ sur 9 échantillons.

TABLEAU 24
Résultats de mesurage des composés organiques volatils totaux

	COVT (mg/m³)	Limite de détection (mg/m³)
Bureau 2	<0,23	0,23
Avant mur végétal	0,17	0,14
Après mur végétal	<0,19	0,19
Extérieur	<0,18	0,18

La plupart des concentrations de COVT aux endroits stratégiques désignés du bâtiment n'ont pas pu être mesurées puisqu'elles sont inférieures à la limite de détection de l'appareil utilisé (la limite de détection varie en fonction du temps d'échantillonnage). Il n'est donc pas possible de tirer des conclusions sur la capacité du mur végétal à réduire la concentration de composés organiques volatils dans l'air de la MDD. Il est toutefois intéressant de noter que les valeurs sont égales ou sous la limite supérieure de confort de 0,2 mg/m³ établie par le Centre Commun de Recherche de la Commission européenne et la « valeur cible » de 1 mg/m³ recommandée par Santé Canada.

Les concentrations de COVT pour les espaces à bureau présentées ci-dessus, inférieures à 0,23 (mg/m³), sont nettement inférieures à celles mesurées par l'entreprise Exp, mandatée pour évaluer la qualité de l'air du bâtiment immédiatement après la réalisation de l'importante purge d'une quinzaine de jours (100% de ventilation extérieur sans présence humaine à l'intérieur) et avant l'occupation des locaux, lesquelles présentaient une moyenne de 0,76 mg/m³ sur 6 échantillons. Cette baisse importante de concentrations semble indiquer les effets conjugués de deux phénomènes : les niveaux d'émissions relatives à un bâtiment neuf dans le contexte d'une certification LEED platine où les sources d'émissions sont fortement régentées, ou un bon contrôle des sources d'émission de COVT dans les opérations courantes de la MDD.

TABLEAU 25
Identification et dénombrement des spores de moisissures viables

	Spores Par m³	<i>Aspergillus- Penicillium</i>	<i>Basidiospores</i>	<i>Ascospores</i>	<i>Cladosporium</i>	<i>Fusarium</i>	Non identifié
Bureau	200	100	0	0	0	0	
Avant	210	47,6	38,1				14,3
Après	430	76,7	23,3				
Extérieur	22450	90,4	1,3	4,9	2,9	0,4	

L'exercice de dénombrement des spores de moisissures viables démontre que le mur végétal entraine une augmentation sensible des concentrations de celles-ci. Or, la différence très importante entre les décomptes intérieurs et extérieurs semble démontrer un excellent contrôle des moisissures à l'intérieur du bâtiment, et ce même si le mur végétal représente une source génératrice de spores.

6.7. Impact énergétique

Le principe de fonctionnement du mur végétal biofiltrant implique divers mécanismes qui, en soi, pourraient générer des économies d'énergie. Ainsi, nonobstant les économies potentielles annoncées par Nedlaw relativement à la diminution éventuelle de la quantité d'air neuf introduit dans le bâtiment, il est possible de croire que les capacités d'humidification et de refroidissement de l'installation peuvent aussi produire des impacts intéressants en termes énergétiques. Dans les faits, le passage de l'air vicié du bâtiment à travers le système permet de faire grimper son taux d'humidité de 30 % et descendre sa température de 8 °C.

Les ingénieurs de la firme Bouthillette Parizeau (BPA), concepteurs des systèmes de la MDD, ont été mandatés en 2011 pour générer des équations devant permettre d'utiliser les données du système de contrôle du bâtiment pour calculer les économies d'énergie associées à l'utilisation du mur végétal. Ces équations sont reproduites ci-dessous :

Économie relative à l'humidificateur :

$$Q_{\text{électricité}}(kW) = \frac{571.454}{(T_{\text{blowall}} + 272.19)} * (\phi_{\text{blowall}} * 1.069^{(T_{\text{blowall}})} - \phi_{\text{bâtiment}} * 1.069^{(T_{\text{piece-0100}})})$$

Surcoût en chauffage :

$$Q_{\text{gaz}}(kW_{eq}) = \frac{718.6}{(T_{\text{blowall}} + 272.193)} * (T_{\text{blowall}} - T_{\text{piece-0100}})$$

$$\text{coût}(\$) = Q_{\text{électricité}} * \text{prix}_{\text{électricité}} + Q_{\text{gaz}} * \text{prix}_{\text{gaz}}$$

Selon ces équations, le mur végétal de la MDD aurait généré des économies approximatives de 8 000 \$ par année.

6.8. Conclusion

Le mur végétal de la MDD présente des avantages et des inconvénients.

Le propriétaire d'un mur végétal doit prévoir, en plus de son entretien régulier, les risques liés au développement d'une technologie qui n'est pas encore arrivée tout à fait à maturité. Dans le cas de la MDD, cela s'est concrétisé en dépenses additionnelles pour la réparation du mur, par du temps supplémentaire de la part de ressources humaines et par un stress important vécu par le personnel responsable de son entretien. Il est par contre primordial de souligner que le mur entraîne des économies d'énergie presque équivalentes aux dépenses d'entretien, rendant son implantation possible dans certaines circonstances à coût net neutre dans un projet.

Les effets globaux du mur sur la qualité de l'air, l'argument de vente principal de Nedlaw, n'ont pu être confirmés. Certaines variables ont influencé positivement la qualité de l'air alors que d'autres semblent l'avoir influencée négativement. La variable principale, celle des COVT, n'a pu être analysée avec succès pour des raisons techniques. Il est envisageable que l'excellente qualité de l'air de la MDD rende plus difficile l'analyse des impacts de cette technologie et en diminue aussi la pertinence.

Notre sondage portant sur la perception des employés à la présence du mur végétal dans l'atrium de la MDD semble toutefois confirmer les prétentions de son fabricant concernant ses bienfaits psychologiques. En effet, les occupants de la MDD ont montré leurs intérêts vis-à-vis du mur en insistant sur son apport à leur bien-être, leur productivité et leur santé. Représentant un symbole de fraîcheur et de nature, qui reflète bien l'image de la MDD, il n'est pas impossible que cette « machine naturelle » serve aussi les intérêts de relations publiques de son propriétaire.