

CIGI QUALITA MOSIM 2023

Chaîne de valeur pour la fabrication de murs-rideaux intelligents intégrant l'aluminium : Une revue de la littérature

BELVANIE JACHANY MOUZANDOU MBOU^{1,2}, NADIA LEHOUX¹, LOUIS GOSSELIN², CAROLINE CLOUTIER¹

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE, UNIVERSITÉ LAVAL

1065 avenue de la Médecine, Québec, QC Canada

Belvanie-jachany.Mouzandou-mbou.1@ulaval.ca; Nadia.Lehoux@gmc.ulaval.ca; Louis.Gosselin@gmc.ulaval.ca; Caroline.Cloutier@gmc.ulaval.ca

¹ Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT)

² Centre de recherche sur l'aluminium (REGAL)

Résumé - La fenestration étant la partie la plus faible d'un bâtiment d'un point de vue énergétique, les murs-rideaux sont un type de fenestration qui apparaît comme prometteur pour compenser cette faiblesse. Dans cet article, une revue de littérature basée sur le cercle herméneutique a été menée, dans le but d'investiguer différents aspects du mur-rideau, notamment sa structure, sa chaîne de valeur, ses problématiques et des pistes de solution pour améliorer sa performance énergétique. L'analyse des articles a permis de classer les problématiques liées aux murs rideaux et les solutions pour mieux y faire face en trois grandes catégories, soit la conception du produit, sa chaîne de valeur et son flux d'information. La recherche a ensuite permis de proposer une chaîne de valeur mieux adaptée à la réalité des projets de construction qui optent pour un système de construction comprenant des murs-rideaux. Ce cadre de référence pourrait être utile aux différents acteurs de la chaîne de valeur de la construction de même que pour les vendeurs ou fabricants de systèmes de murs-rideaux afin de recourir davantage à un tel produit.

Abstract – Fenestration being the weakest part of a building in terms of energy efficiency, curtain walls are fenestration systems offering various solutions to better address this weakness. In this article, a literature review based on the hermeneutic circle method was conducted in order to look at the various aspects of curtain walls, from its structure to its value chain, its challenges, and the solutions to address its weaknesses. The analysis of the articles led to the classification of these challenges and solutions into three categories related to its design, its value chain, and the information flow. The research then proposed a value chain well-adapted to the reality of construction projects which opt for curtain wall systems. The framework could be useful for the various actors in these types of projects and for the independent distributors or manufacturers of curtain wall systems so as to promote its use in construction systems.

Mots clés – Mur-rideau, façade, chaîne de valeur, mur intelligent, enveloppe du bâtiment

Keywords- Curtain wall, facade wall, value chain, concept process, smart wall, building envelope

1 INTRODUCTION

Selon *Statistiques Canada* (n.d), l'industrie canadienne de la construction représente une activité qui génère des revenus de plus de 140 milliards de dollars annuellement, en plus d'employer plus de 1,5 millions de personnes. Le nombre de projets d'infrastructures et de bâtiments en sol canadien a d'ailleurs augmenté de façon significative au cours des dernières années. En outre, l'énergie requise pour le fonctionnement des bâtiments représente à elle seule 35% de la consommation totale d'énergie du pays.

Plusieurs auteurs se sont donc penchés sur des façons concrètes de réduire la consommation énergétique associée à un bâtiment. Ils ont notamment tenté de proposer de nouvelles façons d'élaborer des systèmes de fenestration capables de contribuer à la réduction d'énergie nécessaire pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments (Boafa et al., 2019).

Alors que le gouvernement et l'industrie continuent de pousser vers des bâtiments à haute performance énergétique, et même vers des bâtiments à consommation énergétique nette zéro, il

devient de plus en plus urgent d'améliorer la performance des produits de fenestration Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (n.d)). L'objectif de cet article est d'investiguer les systèmes de fenestration appelés murs-rideaux à travers une revue de la littérature. Il est question ici de dresser un portrait clair des différentes problématiques liées aux murs-rideaux, puis de proposer des pistes de solutions pouvant aider à faire de ce produit une réponse prometteuse aux problèmes de coûts d'énergie dans le domaine de la construction. La revue de littérature a plus particulièrement porté sur une recherche documentaire basée sur l'approche du cercle herméneutique (Boell, S.K & Cecez-Kecmanovic, 2010). La méthode appliquée visait à permettre d'identifier des articles pertinents qui traitent des types de fenestration existant. Suite à l'analyse des articles retenus, il a été possible d'observer que le système de mur-rideau (SMR) apparaît comme un assemblage de fenestration répondant au besoin actuel de l'architecture moderne, en visant un haut niveau de transparence et des ratios fenêtres/murs élevés.

Suite à la revue de littérature, les problèmes liés aux SMR ont pu être regroupés en trois catégories, soit des problèmes touchant la conception du produit, des problèmes touchant sa chaîne de valeur et des défis touchant le flux d'information. Une telle analyse a permis de proposer des pistes de solution et d'établir un modèle de chaîne de valeur plus adaptée à la réalité de ce produit. Les prochaines sections décriront donc plus en détail la recherche menée et les résultats dégagés.

2 METHODOLOGIE

L'objectif de cette recherche est de dresser un portrait d'un SMR et de sa chaîne de valeur, tout en proposant des pistes de solutions pour favoriser son adoption. Pour ce faire, une revue de la littérature a été réalisée selon l'approche du cercle herméneutique (Boell, S.K & Cecez-Kecmanovic, 2010). Celle-ci a permis de mieux saisir, de façon globale, tout ce qui a trait au SMR et à la fenestration. Les bases de données bibliographiques *Compendex*, *Web of Science*, *Engineering Village* et *Google Scholar*, de même que les bases de données textuelles et la littérature grise ont été consultées pour dégager une base d'informations pertinentes. Pour démarrer la revue de littérature, une équation de recherche a été définie comme suit : "curtain wall" OR "facade wall" AND "value chain" AND "concept process" OR "manufacturing process". Les articles, les brevets et les rapports d'études liés à la fenestration et aux SMR dans leur ensemble ont dès lors pu être identifiés et consultés. Par la suite, les concepts « intelligent curtain », « light metal(s) » et « small wall » ont été ajoutés, afin d'investiguer l'aspect intelligent du mur.

La troisième étape a consisté à sélectionner et à analyser les articles les plus pertinents au sujet. Pour satisfaire les critères de sélection, l'article devait aborder au moins l'un des aspects suivants : information sur un type de SMR, matériaux ou composition, méthode de fabrication, forces et faiblesses, opportunités et menaces, chaîne de valeur, recommandations, normes et codes.

Chaque article retenu a été analysé et les références citées dans l'article soumises aux critères de sélection. Étant donné le peu d'information sur les SMR dans la littérature, certains rapports d'entreprises en construction ou d'architecture de même que des études de cas ont été consultés.

Pour mieux comprendre les SMR, leurs défis et leur portée, il était important de pouvoir répondre à quatre questions principales :

Q1. Quels sont les types de SMR qui existent actuellement sur le marché et de quels matériaux sont-ils constitués ?

Q2. Quelles sont les grandes forces et les faiblesses de chaque type de SMR ?

Q3. Quelles sont les étapes types, de la conception jusqu'à l'installation d'un SMR ?

Q4. Qui sont les acteurs impliqués dans la création d'un SMR ?
La prochaine section détaille les réponses à chacune de ces questions.

3 SYNTHÈSE DE LA REVUE

La revue de littérature nous a permis, à travers les articles consultés, de trouver des réponses pour chaque question de recherche, comme présenté dans cette section.

3.1 Types de SMR existants et matériaux les composant

Le mur-rideau peut aussi être appelé façade rideau. C'est un revêtement extérieur habituellement en verre et en aluminium, qui offre une fenestration maximale et qui se veut très efficace, notamment au niveau de la résistance thermique et de la

résistance à la pluie, à la condensation, à l'infiltration et à l'exfiltration de l'air. Selon l'Association de vitrerie et fenestration du Québec (AVFQ, 2022), il existe 2 principaux types de SMR, selon leur mode d'assemblage : le SMR à résille (assemblé en chantier) et le SMR en panneau ou ossature (assemblé en usine). Le SMR est constitué d'une partie externe et d'une partie interne. La partie interne est généralement composée de panneaux tympan, d'une feuille de verre, de vitrages isolants, de capuchons décoratifs et d'une plaque de pression. En ce qui concerne la partie externe, elle comporte une plaque métallique, de l'aluminium ou de l'acier galvanisé, des joints d'étanchéités, des joints de dilatation, des meneaux et du verre. D'autres éléments peuvent aussi s'ajouter aux parties internes ou externes en fonction du type de SMR. La figure 1 illustre un plan en coupe d'un SMR, adaptée du Conseil de l'enveloppe du bâtiment du Québec (CEBQ).

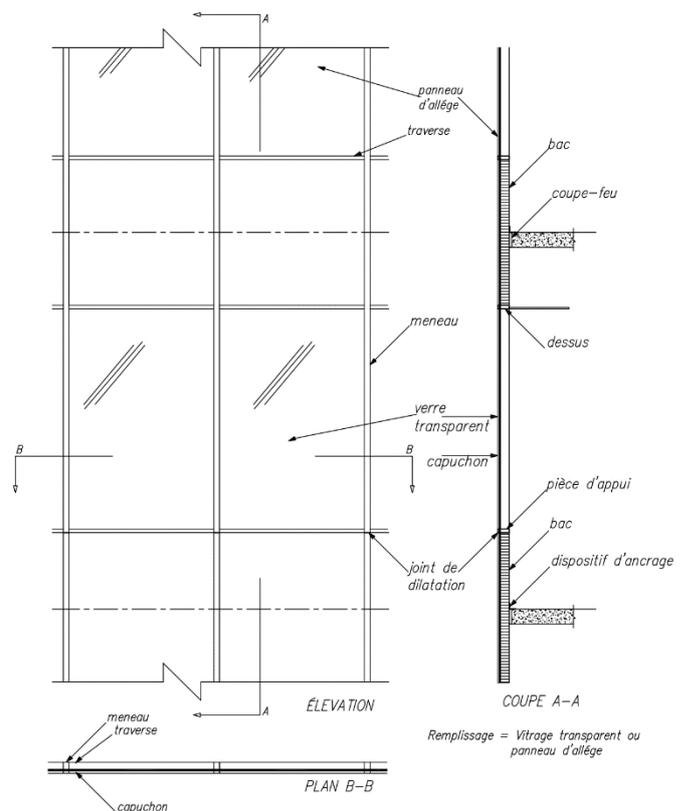


Figure 1. Exemple d'une représentation simplifiée d'un plan en coupe d'un SMR, adapté de CEBQ (2015)

La revue de littérature a révélé de grandes variations quant à la composition des SMR. Hormis l'aspect d'assemblage, il existe plusieurs variétés dont les SMR hybrides avec allège, les SMR unitaires avec combinaison d'acier et d'aluminium, ou encore les SMR en bois.

Les SMR dits intelligents visent quant à eux à contrôler dynamiquement les propriétés du mur, dans le but d'améliorer la performance thermique et énergétique des bâtiments et ainsi réduire la demande en chauffage et en refroidissement. Ils contribuent également à l'amélioration de l'éclairage naturel tout en contrôlant le confort visuel. En plus des composantes habituelles d'un SMR, le mur-rideau intelligent peut intégrer du verre dont les propriétés sont modulées selon le contexte. On retrouve notamment quatre catégories de dispositifs chromiques qui peuvent être intégrés dans les verres intelligents : électrochromiques, gazochromiques, photochromiques et thermiques (Baetens et al., 2010). Ces dispositifs permettent

notamment de gérer les gains solaires thermiques dans le bâtiment tout au long de la journée.

3.2 Forces et faiblesses de chaque type de SMR

La deuxième question à laquelle cette recherche a permis de répondre concerne les forces et les faiblesses d'un SMR. Chaque mur-rideau, selon sa composition, a ses propres forces et faiblesses, mais il existe également des aspects communs à l'ensemble des murs-rideaux. D'après le Guide du mur-rideau (AVFQ, 2022), l'une des forces des SMR est le fait que leur alliage d'aluminium est plus léger que d'autres matériaux, permettant des portées beaucoup plus grandes. Par contre, leur grande faiblesse, que ce soit les SMR en résille ou en panneaux, est le niveau accru de lumière qui cause des reflets sur le mur. De plus, les SMR en résille sont plus propices aux défauts d'assemblage puisqu'ils sont assemblés sur le chantier. Pour les SMR de type panneaux à ossature d'aluminium avec vitrage structuré, Quirouette (2014) mentionne que ceux-ci résistent aux intempéries et qu'ils sont étanches à l'air. Par contre, ils seraient sujet à une humidité excessive fréquente en raison de l'absence de drainage ou d'aération des vides ou à l'excès de mastic d'étanchéité dans les vides du vitrage. En ce qui concerne les SMR unitaires avec combinaison d'acier et d'aluminium, Tong et al. (2021) mentionnent que ce système de mur-rideau peut améliorer la sécurité de la construction au niveau de la résistance des matériaux et les performances d'étanchéité. Il peut également réduire le coût des matériaux. Par contre, des études antérieures sur la méthode d'installation des murs-rideaux sont relativement peu nombreuses et il ne semble donc pas exister une documentation précise portant sur l'installation de ces derniers. Pour les murs-rideaux hybrides avec allège, Boafa et al. (2019) ont précisé que les performances thermiques et énergétiques des façades de ce mur-rideau peuvent être améliorées en incorporant des unités d'allège dans des zones telles que les dalles/plenums. L'amélioration des niveaux d'éclairage naturel et de l'esthétique augmenterait la vitesse et la qualité de construction et réduirait l'empreinte murale. Par contre, ces systèmes ont une résistance thermique plus faible que les murs opaques, conduisant à une grande demande en énergie afin d'assurer un environnement intérieur confortable.

3.3 Les différentes étapes de conception d'un SMR

D'après Kassem et al. (2012), les étapes de conception d'un SMR englobent la conception architecturale, le dessin d'atelier, la fabrication, l'installation et la maintenance. Après avoir fabriqué les murs, différents tests doivent être réalisés pour s'assurer que ces derniers répondent aux normes et critères de construction. Après vérification et validation, les murs sont soit assemblés en usine et transportés au lieu d'installation, soit assemblés directement sur le chantier afin d'être installés sur les façades d'un bâtiment. D'après l'AVFQ (2022), la mise en place d'un SMR est généralement l'œuvre d'un seul sous-traitant et les spécialistes de la conception interviennent peu dans le processus. Différentes parties du SMR (ossature, verre, etc.) peuvent être fabriqués par différents fabricants spécialisés.

3.4 Les acteurs impliqués dans la réalisation des SMR

Comme mentionné par Kassem et al. (2012), la conception du SMR passe par diverses étapes, impliquant ainsi différents acteurs. La division spécialisée du travail inclut : les architectes, les ingénieurs mécaniques, les ingénieurs structurels, les ingénieurs civils, les consultants acoustiques, les consultants de codes ou de normes, ainsi que les consultants en éclairage et en incendie (Kalmierczak, 2009).

L'architecte doit superviser le travail des ingénieurs structurels et mécaniques ainsi que celui des autres consultants. Le processus d'ingénierie du mur-rideau est aussi supervisé par un ingénieur spécialisé dans les façades, qui connaît les principes fondamentaux de l'ingénierie des façades et les solutions utilisées dans les SMR disponibles sur le marché. La construction des SMR est déléguée aux équipes de conception/construction pour l'ingénierie des systèmes respectifs. Selon l'AVFQ (2022), toute installation de mur-rideau doit suivre les recommandations du fabricant, en tenant notamment compte des tolérances des assemblages adjacents et des exigences de résistance au vent définies par le code de construction (Kalmierczak, 2009). Lorsque les interfaces des systèmes sont modifiées au cours du processus de fabrication, celles-ci devront être redessinées tout en respectant la conception architecturale initiale (Kalmierczak, 2009).

Dans un monde idéal, les équipes d'ingénierie recevraient à la fois les données de conception et les exigences de performance mentionnées pour permettre une ingénierie adéquate. Toutefois, Kalmierczak (2009) affirme avoir rarement vu les données de conception spécifiées dans les documents de construction, ce qui conduit souvent à des lacunes dans le flux d'information échangé entre les acteurs.

4 ANALYSE DES RÉSULTATS

Après avoir répondu aux questions de recherche, nous avons pu constater qu'il existait différentes problématiques liées au recours à un SMR dans un système de construction. Il semble en effet exister 3 types de problèmes majeurs liés à :

- la conception du SMR ;
- le flux d'information ;
- la gestion de la chaîne de valeur.

Ces problématiques et les pistes de solution pour y faire face sont détaillées ci-dessous.

4.1 Problèmes majeurs concernant les SMR

4.1.1 Problèmes liés à la conception du SMR

Phases de conception

En ce qui concerne l'étape de fabrication du SMR, plusieurs problèmes peuvent être observés au niveau des exigences techniques et du maintien énergétique.

Le SMR n'est pas conçu pour supporter des charges verticales autre que son propre poids (CEBQ, 2015). Selon Kalmierczak (2009), sachant que remplacer les murs porteurs rigides par un cadre ductile augmente la liberté de mouvement d'un bâtiment, la faible performance du SMR provient d'une mauvaise compréhension des principes fondamentaux de la conception des façades et du concept structurel des SMR. L'auteur a observé une tendance à détailler et à dimensionner les joints de revêtement d'angle d'une manière qui limite le mouvement du bâtiment et cela peut entraîner l'écaillage, la fracture et l'effondrement du revêtement aux angles du bâtiment. D'après Rezaei et al. (2017), un autre facteur essentiel qui empêche ce produit d'être plus présent sur le marché concerne le manque de méthodes de fabrication adaptées à celui-ci. Bien que les murs-rideaux existent depuis plus d'un siècle, ils représentent toujours un défi pour les concepteurs de bâtiments, les fabricants de murs-rideaux et les installateurs (Kalmierczak, 2009). Baofa (2019) souligne d'ailleurs qu'il semble exister une grande réticence quant à la mise en place de nouveaux prototypes de SMR et peu d'entreprises de fabrication de SMR semblent aptes à réaliser de nouveaux prototypes, notamment en raison de difficultés d'approvisionnement en matériaux et du manque

d'exemples de constructions antérieures (Eom et al., 2022). Jang et al. (2019) et Luo et al. (2020) abordent pour leur part différents problèmes liés aux lois et réglementations relatives à la conception des murs extérieurs. Quirouette (2014) aborde également les différentes normes à respecter concernant entre autres le contrôle des infiltrations d'air, la diffusion de vapeur, la pénétration de la pluie et la condensation.

Phase d'assemblage

En ce qui concerne l'assemblage, l'étude de cas de Chen and al. (2018) démontre que, malgré la présence d'une équipe multidisciplinaire, il peut y avoir un manque de connaissances quant à l'ordre d'assemblage du SMR. Dans leur étude, l'équipe qui comprenait du personnel de toutes les entreprises de conception impliquées dans le projet, utilisaient la méthode DfMA (Conception pour la fabrication et l'assemblage) pour la conception du SMR. Cependant, l'équipe n'a pas su répondre aux attentes. Les auteurs ont souligné qu'après l'assemblage du SMR, un espace s'était formé entre la cloison et le meneau du SMR. Si cet espace n'est pas surveillé pendant la phase d'installation, il peut facilement enclencher divers problèmes. Il semble également y avoir eu des enjeux en matière de protection d'incendies et de résistance au bruit, entraînant des coûts considérables pour y remédier à l'étape de maintenance et d'exploitation du bâtiment. La définition de temps de cycle plus réalistes, en cohérence avec les limites physiques des travailleurs, semble de plus être essentielle, afin d'éviter des rythmes de montage impossibles et des heures supplémentaires excessives (Dal et Meneghetti, 2019). Hong (2020) a souligné à son tour qu'il existe de nombreuses difficultés dans le processus d'installation du SMR, alors que Chen and al. (2018) ont constaté dans leur étude de cas que l'équipe de projet ne montrait pas beaucoup d'intérêt pour les opérations sur le site et ne respectait pas l'ordre d'assemblage.

Phase de maintenance

Des problèmes liés au maintien de la température dans les bâtiments peuvent être observés. En raison de la faible résistance thermique, il peut en effet y avoir une nécessité d'augmenter le chauffage ou la climatisation (Boafo et al., 2019). Tong et al. (2021) mentionnent aussi que les spécifications du SMR dans la conception originale doivent souvent être modifiées plus tard dans le projet, en raison de leur incapacité à répondre aux exigences techniques.

4.1.2 Problèmes liés au flux d'information

Les articles et rapports consultés soulignent le manque de partage d'information et de communication entre les acteurs de la chaîne de valeur. Cette problématique entraîne des délais de réalisation accrus, la redondance et l'inexactitude d'informations transmises, de nombreuses retouches, des erreurs et des informations manquantes dans la documentation de projet (Kassem et al., 2012). Eom et al. (2022) donnent l'exemple de certains fabricants qui ont mentionné avoir produit des SMR en se basant sur les dessins initiaux. Toutefois, l'installation sur le bâtiment de ceux-ci était impossible, car il y avait eu des changements de conception sur le bâtiment sans qu'ils en aient été informés. Kim (2017) mentionne que malgré la prolifération des systèmes d'information au cours de la dernière décennie, il n'existe encore aujourd'hui aucune application prête à l'emploi pour la sélection d'un SMR ou la mise en place de celui-ci.

4.1.3 Problèmes liés à la gestion de la chaîne de valeur

Selon Sople (2011), la chaîne de valeur est le lien reliant un ensemble d'installations, d'entreprises, de points de demande, d'approvisionnement et de fournisseurs de services entre eux. Ce lien relie les fournisseurs en amont et les clients en aval aux flux de produits et de services. Une mauvaise gestion de la chaîne de valeur du mur-rideau peut donc avoir un impact considérable, notamment en matière de coûts et de calendrier de projets. Cette problématique de gestion est particulièrement liée aux caractéristiques des matériaux utilisés dans la fabrication des SMR (Eom et al., 2022). Les matériaux du SMR étant des matériaux d'ingénierie, ceux-ci sont fabriqués sur mesure, dans des usines de fabrication spécialisées, avec une variété de dimensions et de formes, pour un projet spécifique. Cela peut donc entraîner de longs délais de livraison et des coûts élevés. Ainsi, si un changement survient pendant la fabrication du SMR ou si le matériau est endommagé, cela peut créer des temps d'attente supplémentaires de sorte que le calendrier du projet peut être sérieusement miné (Dal Borgo et Meneghetti, 2019). Forsman et al. (2012) soulignent également l'importance d'établir des relations d'approvisionnement à plus long terme et une communication efficace pour améliorer l'approvisionnement des matériaux. La construction de SMR implique par ailleurs plusieurs parties prenantes. Il est donc nécessaire que ceux-ci coordonnent leurs activités et assurent une compréhension de projet commune, car les malentendus et les conflits causés par les différences de perception peuvent affecter considérablement le projet (Eom et al., 2022). Tong et al. (2021) ont observé que le contrôle inadéquat du flux de travail était une cause majeure des problèmes de gestion de la chaîne d'approvisionnement en ce qui concerne la non-conformité aux normes pour les façades préfabriquées. Pavitt et Gibb (2003) soulignent pour leur part le retard dans la prise de décision et des problèmes liés à une attribution inadéquate des responsabilités de chaque partie prenante, pouvant grandement affecter la bonne réalisation du projet de construction.

4.2 Pistes de solutions

D'après les problématiques observées, plusieurs pistes de solutions peuvent être proposées pour la résolution de celles-ci

4.2.1 Pistes pour la conception du mur-rideau

Phase de conception

La fabrication des SMR peut se baser sur un ensemble de principes issus de la méthode DfMA en fonction du projet, tels que la réduction du nombre de pièces du SMR, la réduction du nombre de fixations uniques nécessaires pour assembler le SMR sur le chantier, l'utilisation de matériaux économiques, la garantie que la taille et le poids des composants sont faciles à manipuler et la réduction du gaspillage de matériaux (Chen and al., 2018).

Au niveau des techniques de fabrication, Vigener et al. (2016) mentionnent que certains SMR peuvent être vitrés de l'intérieur ou de l'extérieur. Le verre d'allège peut être un verre monolithique, feuilleté ou isolant. Le verre d'allège peut être rendu opaque grâce à l'utilisation d'opacifiants. Comme la capacité de résistance du verre n'est pas uniforme et tend à être plus faible près des bords, la contrainte maximale le long d'un bord doit être prise en compte. Bien qu'il existe différents types de systèmes de vitrage, tels que les systèmes à treillis, les systèmes à câble et les systèmes à support en acier, les boulons sont souvent utilisés pour fixer les panneaux de vitrage

(Sivanerupan et al., 2021). En ce qui a trait à la faible résistance du cadre de l'aluminium, Tong et al. (2021) considèrent que la combinaison acier et aluminium possède des caractéristiques à la fois mécaniques et esthétiques, permettant de mieux porter et contrôler la forme.

Pour les problèmes liés au mouvement des bâtiments, cela peut être évité s'il y a un échange d'information entre l'ingénieur civil et l'architecte qui conçoivent les dessins des façades des murs-rideaux. D'après Kalmierczak (2019), la solution appropriée pour les mouvements des bâtiments repose sur la conception d'une bordure parallèle et un joint de mouvement de la toiture disposé au sommet de l'édifice.

Phase d'assemblage

Vigener et al. (2016) mentionnent que certains SMR utilisent des barres de pression (également appelées plaques de pression) qui sont fixées à l'extérieur des meneaux pour retenir le verre. Ces systèmes comprennent souvent des joints qui sont placés entre la barre de pression et les meneaux et fonctionnent comme des ruptures thermiques en aidant à l'isolation acoustique. Les connexions pour ancrer le SMR doivent être conçues pour permettre un mouvement différentiel tout en résistant aux charges appliquées. Il est recommandé d'embaucher des sous-traitants avec une expertise dans la conception de SMR pour les projets qui intègrent ces systèmes. Pour atténuer le rétrécissement des joints à partir des coins, l'utilisation de coins vulcanisés et d'épissures coupées en diagonale est recommandée. La capacité d'insonorisation des murs-rideaux peut être améliorée en installant un remplissage insonorisant et en rendant la construction aussi étanche que possible. D'après l'AVFQ (2022), tous les composants du mur-rideau doivent être chimiquement stables pour maintenir le niveau de performance. Le revêtement de finition doit résister à l'action physique ou chimique des agents atmosphériques et aux rayons. Toujours d'après l'AVFQ (2022), toute installation de SMR doit suivre les recommandations du manufacturier puisque la compartimentation des systèmes a fait l'objet de calculs et a été testée. En ce qui concerne les exigences d'installation, tenir compte des tolérances des assemblages adjacents et des exigences de résistance au vent fixées par le code de construction est essentiel (Kalmierczak, 2009).

Phase de maintenance

Une énorme quantité d'énergie est consommée pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Des technologies et des matériaux de vitrage appropriés peuvent toutefois être utilisés pour réduire la consommation d'énergie. Avec l'avancement de la technologie du vitrage, des fenêtres intelligentes, passives et actives ont été développées, pouvant réduire considérablement les besoins énergétiques des bâtiments tout en améliorant le confort intérieur (Rezaei, 2017). Selon Baetens et al. (2010), les fenêtres électrochromiques commerciales de pointe se sont avérées capables de moduler la transmission jusqu'à 68% du spectre solaire total. Leur efficacité a même déjà été prouvée pour des climats chauds californiens, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires pour valider les produits pour les climats froids. D'après Boafu et al. (2019), il est possible d'utiliser un panneau d'isolation sous vide (VIP) dans l'unité d'allège du SMR. Il est toutefois recommandé de l'intégrer soigneusement entre des matériaux de protection à faible conductivité pour assurer la conservation d'énergie car, lors du transfert de chaleur d'un mur extérieur, divers composants de transfert de chaleur couplés sont interdépendants, à savoir la convection, le rayonnement et la conduction.

Les échanges de chaleur radiatifs et convectifs se produisent à la fois sur les surfaces externes et internes, tandis que la conduction se produit à travers la paroi externe. Pour intégrer le VIP, on doit prévoir la modélisation initiale et la validation, la réduction des ponts thermiques dans le composant d'allège et l'évaluation de la zone vision-allège du mur-rideau sur l'énergie du bâtiment.

Les zones tampons dynamiques (DBZ), développées il y a une trentaine d'années, fonctionnent en ventilant, dans une cavité interstitielle à l'intérieur du mur, de l'air extérieur chauffé contenant peu d'humidité pour contrôler la migration de l'humidité à travers l'ensemble. En utilisant ce principe dans le panneau d'allège, une zone tampon dynamique solaire (SDBZ) peut être utilisée pour créer un SMR plus durable et pour gérer l'énergie solaire afin de réduire les coûts de chauffage et de refroidissement des bâtiments (Richman, 2009). Toutefois, l'auteur mentionne que compte tenu de la variation de l'amplitude et de la direction du flux de chaleur à travers les panneaux d'allège, cette approche n'est peut-être pas la plus efficace. À ce jour, peu de tentatives au Canada ou dans le monde ont été faites pour mieux gérer le flux de chaleur dans cet espace ou pour utiliser le gain solaire potentiel à travers le panneau d'allège.

En pressurant la cavité par rapport à la pression d'air intérieure et extérieure, les fuites d'air peuvent être contrôlées à travers l'ensemble mural. De plus, étant donné les quantités relativement faibles d'humidité et par conséquent la faible humidité relative de l'air extérieur réchauffé, toute fuite d'air de cavité vers l'intérieur ou l'extérieur pose peu ou pas de menace de condensation interstitielle.

D'après Boafu et al. (2019), il y aura alors une amélioration au niveau de l'éclairage naturel et de l'esthétique, une augmentation de la vitesse et de la qualité de construction et une réduction de l'empreinte murale.

Le développement d'unités de vitrage à haute performance comprenant plusieurs espaces d'air, des revêtements spéciaux, des entretoises thermiques à « bords chauds » et du verre photochromique, a résulté de cette orientation. De plus, des dispositifs d'ombrage mécaniques ont été développés. Tous ces développements visent à contrôler le flux de chaleur à travers les zones de vision. Pourtant, peu de travaux ont été réalisés sur les zones d'allège en termes de flux de chaleur, l'accent ayant été mis ces dernières années sur les zones de vision du mur-rideau (Richman, 2019).

Les zones d'allèges méritent qu'on s'y attarde, car lors du chauffage, la chaleur est perdue de l'intérieur vers l'extérieur à travers ces panneaux. Lors du refroidissement, le flux est inversé. En isolant les panneaux d'allèges, des tentatives sont faites pour minimiser la perte ou le gain de chaleur à travers le panneau d'allège.

La recherche de SMR améliorés a conduit les ingénieurs concepteurs à concentrer leurs efforts sur la gestion de l'humidité et le contrôle du flux de chaleur.

Un compromis entre la performance énergétique et le confort visuel doit être fait lors du choix du type de SMR, notamment au niveau de la position et de la taille des fenêtres dans un bâtiment (Dussault et al., 2016). Le problème lié à l'éblouissement de lumière généré par le mur-rideau peut être réglé selon Chen et al. (2018) en utilisant un double verre argenté à faible émissivité. Cela réduit la quantité de rayonnement solaire entrant dans le bâtiment, ce qui pourrait contribuer à la réduction de l'énergie nécessaire pour maintenir le confort et le refroidissement à l'intérieur. D'après Boafu et al. (2019), les ponts thermiques 2D/3D sont importants en raison

des cadres, des supports et des boulons. Ils peuvent réduire l'énergie de chauffage et de refroidissement toute l'année.

4.2.2 Pistes pour le flux d'information

Afin de résoudre les problèmes liés à un flux d'information déficient, la solution peut, entre autres, passer par la création d'une base de données ou d'une plateforme pour collecter et stocker les informations relatives aux SMR. L'idée serait ainsi de faciliter la comparaison et l'analyse des différents processus (Kassem et al., 2012). Ce système pourrait permettre une gestion tridimensionnelle : gestion de la production, gestion de l'organisation et gestion de l'information.

D'après Dal Borgo et al. (2019), cet outil pourrait servir d'aide à la décision pour les projets de gestion, de base pour la conception de modèles d'optimisation supportant la planification de la production, ainsi que de source pour faciliter l'apprentissage pour un assemblage durable des SMR. Il faudrait également privilégier la répétition à travers la production d'un même ensemble de SMR, afin de favoriser l'apprentissage tout en atténuant les oublis et les ajustements répétés de production. Le concept tridimensionnel a aussi été évoqué par Kim (2009). Pour l'auteur, la dimension concernant la gestion de la production vise à clarifier les exigences de performance pour les SMR et à réduire les retouches de conception grâce à un examen de la façon de le fabriquer et de l'assembler. La dimension de gestion de l'organisation concerne les questions non techniques telles que la nécessité de changer les attitudes du propriétaire et de l'architecte et la nécessité d'un arrangement contractuel approprié. Enfin, la dimension de gestion de l'information s'efforce de présenter une « solution alternative basée sur l'information » pour chaque problème pouvant émerger.

Au niveau de la connaissance des SMR, Kassem et al. (2012) parlent de la connaissance des capacités du système, la connaissance et la valeur des conseils disponibles. Pour eux, cela réduit le temps nécessaire pour identifier une solution à l'étape de conception, diminue la probabilité d'erreurs, implique les parties prenantes dans la décision de sélection du SMR et offre de multiples options commerciales et techniques. Kim et al. (2017) ont mené une étude sur le recours au BIM (*Building Information Modeling*) pour les SMR. Le BIM se veut une nouvelle méthode de collaboration et de partage d'informations pour un projet à l'aide d'un modèle 3D. Les auteurs ont donc investigués l'idée de mettre sur pied une base de données centrée sur les SMR, intégrant les informations requises pour chaque étape de conception et pour les nombreux éléments du bâtiment. Les composants, la forme et les propriétés des SMR ont été obtenus en analysant les directives BIM et les normes de construction des SMR. Grâce à un tel outil, les informations sur les SMR pourraient alors être gérées systématiquement, de la conception, en passant par la construction, jusqu'à la maintenance.

4.2.3 Pistes pour la gestion de la chaîne de valeur

Plusieurs mécanismes de collaboration sont à mettre en place pour le bon fonctionnement de la chaîne de valeur des SMR, dont le partage d'information et de connaissance, une sélection soignée des partenaires selon leur connaissance des SMR, une centralisation de la prise de décisions, l'établissement d'une base de données commune, la mise en place d'un ordonnancement des activités et le recours à un modèle semblable au BIM.

Le partage d'information et de connaissances constitue le mécanisme clé de la chaîne de valeur des SMR car un flux d'information inefficace semble occasionner, d'après Kassem

et al. (2012), la difficulté à impliquer les bonnes personnes au bon moment. A travers un modèle ou un logiciel de gestion d'information, on pourrait résoudre également les problèmes liés à la gestion de la chaîne de valeur dans son ensemble. Chen et al. (2018) mentionnent par exemple qu'en profitant d'une communication tôt dans le processus, entre l'entrepreneur et le fabricant, les probabilités d'erreurs de production seraient considérablement réduites et, par conséquent, la logistique pour l'assemblage des composants du SMR sur le site pourrait être gérée plus efficacement.

Le tableau 1 résume les pistes de solutions proposées pour chaque catégorie de problématiques abordées.

Tableau 1 : Synthèse des problèmes liés aux SMR et des solutions proposées

Problèmes	Solutions
Structure (conception et réalisation)	Identifier les critères de sélection des SMR et appliquer toutes les règles et techniques en vigueur
Flux d'information	Créer une base de données pouvant regrouper toute la littérature liée au choix, aux réglementations, aux connaissances des SMR
Gestion de la chaîne de valeur	Gestion tridimensionnelle : gestion de l'information, de l'organisation et de la production

5 SYNTHÈSE ET PROPOSITION DE VALEUR

Cette revue de littérature a mis en relief plusieurs problèmes liés aux SMR, dont la gestion de sa chaîne de valeur. Contrairement à la plupart des chaînes de valeur où le produit est fabriqué et mis à la disposition du client pour la vente, la chaîne de valeur du SMR est basée sur un flux tiré par la demande du client. Les SMR sont en effet fabriqués pour répondre à une demande spécifique en fonction d'un type de bâtiment particulier.

Les problèmes soulevés et les pistes de solutions proposées dans la littérature ont donc mené au développement d'un cadre de référence identifiant les acteurs nécessaires à chaque étape d'un projet de construction qui inclut un SMR. La figure 2 illustre cette chaîne de valeur, qui semble la mieux adaptée considérant les nombreux intervenants et les risques liés à ces types de projets de construction. La chaîne de valeur d'un SMR proposée est composée de six grandes étapes :

-Le projet : celui-ci peut être un projet de construction d'un bâtiment, ou encore un projet de fabrication des SMR par une entreprise indépendante.

-La conception architecturale : il s'agit de la représentation architecturale de toutes les fenestrations du bâtiment. C'est à cette étape qu'il est question de déterminer les critères favorisant le choix du SMR plutôt qu'une simple fenestration. C'est à l'architecte que revient une telle tâche, en fonction des besoins du client. Dans le cas où les SMR sont retenus, il est question de déterminer la bonne composition du SMR en fonction du projet. Pour une entreprise indépendante de SMR préfabriqués, cette dernière fait ses propres designs architecturaux pour sa production et peut, lors d'une commande, interpréter les dessins qui lui sont apportés par son client.

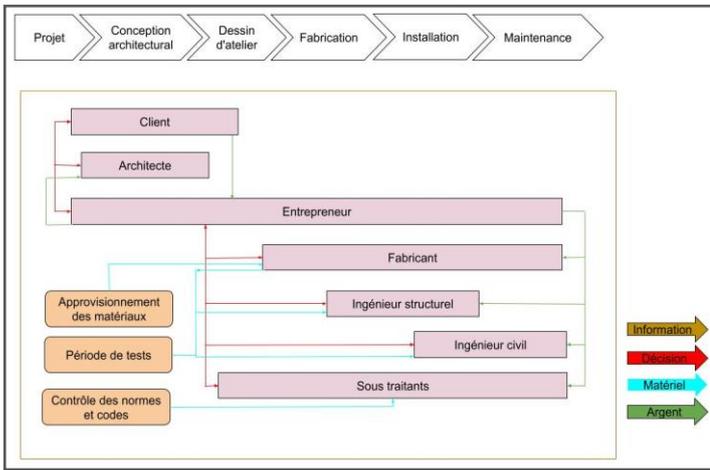


Figure 2. Proposition d'une chaîne de valeur pour les projets de construction avec un SMR.

-Le dessin d'atelier : il est ici question de réaliser les dessins techniques, le calcul des dimensions des façades des murs-rideaux, de vérifier et de veiller à ce que le SMR respecte la réglementation et soit le mieux adapté par rapport à l'environnement dans lequel il se trouvera.

-La fabrication : cette phase regroupe l'approvisionnement en matière première, la fabrication des composants du SMR, l'assemblage suivant le type de SMR et la période de tests réalisés par les différents sous-traitants, afin de s'assurer que les murs-rideaux répondent aux normes et codes de construction établis.

-L'installation : celle-ci peut être faite, dans le cas d'un projet de construction en cours, par l'installateur spécialisé associé au projet qui recevra soit un ensemble préfabriqué qu'il devrait assembler avant l'installation, ou des structures de SMR prêtes à être installées sur le bâtiment. Le fabricant indépendant peut aussi faire appel à son installateur spécialisé si cela a été mentionné dans son contrat.

-La maintenance : peut être faite soit par l'équipe du fabricant ou de l'ingénieur civil en charge du projet sur le site d'installation, ou encore par les sous-traitants.

L'appellation sous-traitant regroupe plusieurs corps de métiers, ceux-ci pouvant faire partie d'une même firme ou provenant de différentes entités. Parmi eux, on peut citer un spécialiste en mécanique des bâtiments, un ingénieur structurel, un spécialiste en acoustique, en étanchéité des façades, en normes, en code, en électricité, en isolation, en conservation d'énergie, et enfin différents fournisseurs.

Un entrepreneur ou médiateur est recommandé dans la chaîne de valeur s'il s'agit d'un projet de construction de bâtiments incluant des SMR intelligents pour éviter les problèmes cités en amont. Ce dernier servirait de médiateur ou de coordonnateur entre les différentes parties prenantes en charge de la fabrication des SMR intelligents et de la construction du bâtiment. Dans le cas d'un projet de fabrication des SMR intelligents par une entreprise indépendante, la médiation serait plutôt faite directement entre l'entreprise et son client.

-Le flux d'information : ce flux est déployé de sorte que l'information puisse circuler entre tous les acteurs de la chaîne de valeur du SMR, dans le but d'éliminer les nombreuses problématiques qui découlent d'un manque de connaissance et de communication.

-Le flux de décision : ce flux concerne les décisions et modifications relatives aux SMR. Il lie l'entrepreneur, le client,

l'architecte et tous les autres acteurs de la chaîne. Ainsi, une fois que le client opte pour un SMR, une décision guidée par l'expertise de l'architecte, la décision est transmise à l'entrepreneur qui se charge de valider le choix et de transmettre la décision aux autres participants.

-Le flux de matériel : ce flux concerne les matières premières et éléments qui contribuent à la conception du SMR, circulant entre les acteurs chargés de fabriquer le produit.

-Le flux d'argent : ce flux lie le client et les acteurs de la chaîne. Pour éviter toute litige, une surveillance adéquate, notamment de la part de l'architecte et de l'entrepreneur, est nécessaire tout au long du processus de conception, fabrication et installation du SMR.

6 CONCLUSION

Dans ce travail, il était question de mettre en lumière les grandes questions concernant les murs-rideaux et les murs-rideaux intelligents, afin de mettre en relief ce qui existe, les aspects à améliorer et montrer l'étendue et les limites d'un tel système.

Cette revue de littérature a permis de regrouper les problématiques et les pistes de solutions, de proposer une chaîne de valeur appropriée aux SMR, ainsi que de donner des lignes directrices pour son pilotage.

D'après toutes les lectures faites, il semble que la recherche portant sur la véritable connaissance des murs-rideaux est un sujet important qui offre de grandes opportunités en ce qui a trait à la conception de nouveaux prototypes de SMR, en particulier ceux intégrant des systèmes intelligents, possiblement plus performant que ceux actuellement sur le marché. La création d'outils permettant d'appuyer ce choix de système et de démocratiser son utilisation reste à faire. Une analyse critique de sa chaîne de valeur ne semble pas non plus avoir encore capté l'attention des auteurs et gagnerait certainement à être davantage poussée dans le futur.

7 REFERENCES

- AVFQ. (2021). Guide du mur-rideau, <https://www.guidemurrideau.com/> (visite février 2021)
- Baetens, R., Jelle, B. P., & Gustavsen, A. (2010). Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: a state-of-the-art review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(2), 87–105.
- Boafo, F. E., Kim, J.-H., & Kim, J.-T. (2019). Numerical study of slim curtain wall spandrel with integrated vacuum insulation panel: concept, performance evaluation and challenges. *Energy & Buildings*, 183, 139–150.
- Boell, S. K. & Cecez-Kecmanovic, D. (2010). Literature reviews and the hermeneutic circle. *Australian Academic & Research Libraries*, 41(2), 129–144.
- CEBQ. (2015) Le nouveau guide du mur-rideau, <https://www.cebq.org/wp-content/uploads/2015/09>
- Chen, K., & Weisheng L. (2018). Design for Manufacture and Assembly Oriented Design Approach to a Curtain Wall System: A Case Study of a Commercial Building in Wuhan, China. *Sustainability* 10(7), 2211.
- Dal Borgo, E., & Meneghetti, A. (2019). Production and shipment planning for project based enterprises: exploiting learning-forgetting phenomena for sustainable assembly of

- curtain walls. *Computers & Industrial Engineering*, 131, 488–501.
- Dussault, J.M., Gosselin, L., & Galstian, T. (2012). Integration of smart windows into building design for reduction of yearly overall energy consumption and peak loads. *Solar Energy*, 86(11), 3405–3416.
- Dussault, J.M., & Gosselin L. (2017). Office buildings with electrochromic windows: A sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort. *Energy & Buildings*, 153, 50–62.
- Dussault, J.M., Sourbron, M., & Gosselin, L. (2016). Reduced energy consumption and enhanced comfort with smart windows: Comparison between quasi-optimal, predictive and rule-based control strategies. *Energy & Buildings*, 127, 680–691.
- Forsman, S., Björngrim, N., Bystedt, A., Laitila, L., Bomark, P. & Öhman, M. (2012). Need for innovation in supplying engineer-to-order joinery products to construction: A case study in Sweden, *Construction Innovation*, 12(4), 464-491.
- Hamza H. (2021). A multi-criteria decision-making model for selecting curtain wall systems in office buildings. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 19(4), 904.
- Hong L., (2020). Ideal reflections on the quality control and installation technology of glass curtain wall construction. *Urban Architecture*, 17(36), 92- 94.
- Kang, Y., & Eom, J. (2022). Curtain wall construction: issues and different perspectives among project stakeholders. *Journal of Management in Engineering*, 38(5).
- Kassem, M., Dawood, N., & Mitchell, D. (2012). A decision support system for the selection of curtain wall systems at the design development stage. *Construction Management and Economics*, 30(12), 1039–1053.
- Kazmierczak, K. (2009). Review of curtain walls, focusing on design problems and solutions. <http://karol.us/BEST2.pdf>
- Kelleher T.J. (2009). *Smith Currie & Hancock's Common Sense Construction Law : Un guide pratique pour le professionnel de la construction*. Wiley.
- Kim, K.-H. (2011). A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system. *Energy & Buildings*, 43(12), 3436–3445.
- Kim, B.-J., Kim, S.-A., Kim, B.-J., & Chin, S.-Y. (2017). Proposal of smart Bim Library Framework for Curtain Wall with different LOD on each project stage. *Journal of KIBIM*, 7(2), 44-55.
- Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec (n.d), Statistiques énergétiques (visite en octobre 2021)
- Pavitt, T. C., & Gibb, A. G. F. (2003). Interface management within construction: in particular, building facade. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(1), 8–15.
- Quirouette, R. L., & Arch, B. (2006). *Murs-rideaux en aluminium-verre*. Société canadienne d'hypothèques et de logement.
- Rezaei, S. D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 159, 26–51.
- Richman, R.C. & Pressnail, K. D. (2009). A more sustainable curtain wall system: Analytical modeling of the solar dynamic buffer zone (SDBZ) curtain wall, *Building and Environment*, 44(1), 1–10.
- Sivanerupan, S., Wilson, J. L., & Gad, E. F. (2011). Structural analysis and design of glazed curtain wall systems. *Australian Journal of Structural Engineering*, 12(1), 57–67.
- Sople V.V. (2011), *Supply Chain Management*; <https://learning.oreilly.com/library/view/supply-chain-management/9788131760994/xhtml/chapter023.xhtml#h50005-23>
- Statistics Canada (n.d), Survey of the Construction Industry – Statista.com. (visite en octobre 2021)
- Tong, L., Shuai, W., Wenxiang, L., Le, L., Shiqi, H., Qinyou, F., & Wenhui X. (2021). The construction and application of the unit curtain wall system of the steel-aluminum combination. *E3S Web Conference*, 283, 01009.
- Vigener, N. & Brown, M.A. (2016). Curtain walls. In *Building envelope design guide*. <https://www.wbdg.org/guides-specifications/building-envelope-design-guide/fenestration-systems/curtain-walls>