

« Utilisation du bois massif dans la structure et utilisation de l'ossature légère dans les murs extérieurs de bâtiments de grande hauteur ; comment minimiser notre impact carbone sans surcoûts ? »

Projet Laforest-Québec

Préparé par : Groupe Statera inc.

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du Programme d'innovation en construction bois

13 décembre 2024



Stéphane Hallé, ing

Auteur



Nicolas Constantin, ing

Réviseur / Approbateur

Avis de non responsabilité

Le contenu et les résultats de ce rapport sont produits et présentés par le promoteur du projet. Le ministère des Ressources Naturelles et des Forêts (MRNF), ainsi que le Plan pour une Économie Verte 2030 (PEV) ne sont donc pas responsables du contenu de ce document.

Table des matières

1. SOMMAIRE EXÉCUTIF ET SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE	1
2. INTRODUCTION	3
2.1 DESCRIPTION DU BÂTIMENT INNOVANT OU DE LA SOLUTION INNOVANTE	4
2.2 TITRE ET LIEU DE RÉALISATION DU PROJET DE CONSTRUCTION	5
2.3 DESCRIPTION DU PROJET DE CONSTRUCTION	5
2.3.1 ÉCHÉANCIER GLOBAL ET DURÉE	8
2.3.2 BUDGET GLOBAL	8
2.3.3 PARTENAIRES	8
2.3.4 DÉFIS ET RISQUES GÉNÉRAUX	9
3. DÉTAILS DE L'ÉTUDE	9
3.1 INTRODUCTION ET HYPOTHÈSES DE DÉPART	9
3.1.1 CONSTRUCTION DU 13 ^E ET DERNIER ÉTAGE EN BOIS MASSIF (DME-01)	9
3.1.2 MURS EXTÉRIEURS EN OSSATURE LÉGÈRE DE BOIS (DME-02)	10
3.2 OBJECTIFS	11
3.3 MÉTHODOLOGIE	12
3.3.1 CONSTRUCTION DU 13 ^E ET DERNIER ÉTAGE EN BOIS MASSIF (DME-01)	12
3.3.2 MURS EXTÉRIEURS EN OSSATURE LÉGÈRE DE BOIS (DME-02)	13
3.3.3 ÉVALUATION DE LA CONSTRUCTIBILITÉ DES SOLUTIONS INNOVANTES ET ESSAI EN CHANTIER	14
3.3.4 ÉVALUATION DE LA CONSTRUCTIBILITÉ DES DIVISIONS INTÉRIEURES EN BOIS	14
3.4 RÉSULTATS ET ANALYSE	15
3.4.1 CONSTRUCTION DU 13 ^E ET DERNIER ÉTAGE EN BOIS MASSIF (DME-01)	15
3.4.2 MURS EXTÉRIEURS EN OSSATURE LÉGÈRE DE BOIS (DME-02)	15
3.4.3 ÉVALUATION DE LA CONSTRUCTIBILITÉ DES SOLUTIONS INNOVANTES ET ESSAI EN CHANTIER	16
3.5 CONCLUSIONS	21
3.5.1 CONSTRUCTION DU 13 ^E ET DERNIER ÉTAGE EN BOIS MASSIF (DME-01)	21
3.5.2 MURS EXTÉRIEURS EN OSSATURE LÉGÈRE DE BOIS (DME-02)	21
3.5.3 ÉVALUATION DE LA CONSTRUCTIBILITÉ DES SOLUTIONS INNOVANTES ET ESSAI EN CHANTIER	21
3.6 RETOMBÉES ET RAYONNEMENT DES SOLUTIONS DÉVELOPPÉES ET POTENTIEL DE REPRODUCTIBILITÉ POUR L'INDUSTRIE	22
3.7 RECOMMANDATIONS	22
4. BIBLIOGRAPHIE	23
5. ANNEXES	23

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

La présente étude décrit le processus de recherche et développement portant sur les propositions de solution innovantes prévoyant l'intégration d'une structure en bois massif au 13^e et dernier étage et l'utilisation de l'ossature légère en bois dans les murs extérieurs pour un bâtiment de grande hauteur dans le cadre de la construction du projet Laforest-Québec. Ce projet consiste à la construction d'un bâtiment résidentiel et commercial de 358 logements et 33 000 pi.ca commercial.

Dans un premier temps, l'étude élaborera les démonstrations pour faire autoriser la construction d'un dernier étage en bois massif dans un bâtiment avec une structure de béton. Dans le cas du projet Laforest, il s'agit du 13^e étage d'un bâtiment de grande hauteur qui généralement, serait une construction de béton ou d'acier (construction incombustible). Pour ce faire, une demande de mesure équivalente est nécessaire pour obtenir les autorisations de la RBQ alors que le code national du bâtiment 2015 modifié Québec limite l'utilisation de structure en bois massif à la toiture des bâtiments incombustibles d'au plus 2 étages et aux bâtiments de 6 étages et moins de construction combustible selon certaines classifications.

L'étude présentera dans un deuxième temps, les démonstrations permettant à nouveau, d'obtenir une mesure différente de la RBQ, afin de réaliser l'enveloppe extérieure en ossature légère de bois d'un bâtiment de grande hauteur en remplacement de l'enveloppe en ossature d'acier traditionnelle. Cette 2^e demande de mesure équivalente requiert une approbation de conformité avec la RBQ pour l'utilisation d'une composition de murs extérieurs en ossature légère de bois en lien avec la section D-6.1.1 du CNB 2020.

Quant aux activités de construction, les méthodes de fabrication et de construction devront être développées pour assurer l'intégration de ces innovations dans la construction du bâtiment. Un des défis sera relatif à l'installation des éléments préfabriqués tel que les murs extérieurs en ossature légère de bois à même la structure de béton conventionnelle. L'installation de cette composition préfabriquée sera une première dans l'industrie pour un bâtiment de grande hauteur. Des essais, prototypage seront nécessaires avec les fournisseurs, avec l'appui des constructeurs, des ingénieurs et des architectes, pour considérer les facteurs et difficultés d'intégration dans une structure de béton, quant aux déflexions et l'étanchéité particulièrement, pour assurer la faisabilité de cette innovation et la pérennité du détail. Un des objectifs de l'étude est d'optimiser les méthodes pour ultimement rendre les coûts au moins comparable aux méthodes traditionnelles et ainsi aider à la démocratisation des méthodes et ultimement, augmenter l'utilisation du bois, augmenter la performance de l'enveloppe extérieure et diminuer l'émission de GES dans la construction des bâtiments de grande hauteur.

Des essais en chantier ont été réalisés afin de valider les solutions proposées et adapter les stratégies de construction pour connaître réellement les défis techniques afin de réduire les risques liés à ces intégrations dans le projet. Cette étape est primordiale pour le projet Laforest qui poursuivra les initiatives de cette étude associée au volet A du programme PICB avec la construction et l'intégration de ces innovations dans le bâtiment avec le volet B de ce même programme.

Les résultats de cette première initiative associée aux demandes de mesure équivalente révèlent des performances en protection incendie équivalentes, voir même plus performante que le bâtiment traditionnel de référence. Les compositions alternatives proposées par l'intégration du bois dans les innovations proposées augmentent l'efficacité énergétique, particulièrement pour l'enveloppement du bâtiment qui permet de réduire l'isolant rigide.

Les résultats sur l'intégration de ces innovations à coûts moindre que les méthodes traditionnelles s'est avéré plus complexe. En effet, malgré une grande agilité des industries de préfabrication par exemple, ces derniers sont organisés à l'usine pour répondre à une clientèle majoritairement résidentielle et non pour une production

pour un bâtiment de grande hauteur. Ils doivent par conséquent trouver des solutions pour répondre à cette nouvelle demande pour ce type de bâtiment et adapter leurs productions en conséquence. Cette réorganisation a un impact sur la production et le rapport présentera les solutions et défis pour minimiser les enjeux et surcoûts de production.

Il est important de voir en ces solutions innovantes, le potentiel de reproductibilité dans l'industrie qui se fera sentir dès les conclusions de la démonstration du projet Laforest-Québec. La vision du projet est de faire autoriser des compositions de bois dans un usage mixte où chaque matériau est utilisé à sa plus grande valeur ajoutée en plus de démontrer une faisabilité compétitive et rentable, de démontrer réellement l'impact novateur et pertinent du projet proposé. La réussite de cette démarche proposée par le projet Laforest constitue un premier pas majeur vers la diminution de l'utilisation du béton et de l'acier dans les bâtiments de grande hauteur.

2. Introduction

Le projet Laforest est proposé par le promoteur immobilier, Groupe Statera inc. qui se distingue par son désir de redéfinir le visage de nos villes, notamment par la mise en place de projets architecturaux s'appuyant sur son concept ESGA^{MD}. L'introduction au Québec de ce concept permet de promouvoir les considérations Environnementales, Sociales et de Gouvernance dans nos développements locaux, tout en faisant valoir la mission principale de Statera, mettre de l'avant l'Art et l'Architecture.

Le projet Laforest-Québec, une première du concept ESGA^{MD} par Statera, permettra, en collaboration avec les partenaires impliqués, de reproduire cet exemple de développement durable à travers le Québec et le Canada. Laforest-Québec se veut un catalyseur de la relance du secteur de la tête des ponts à Québec. Dans ce contexte, la réalisation de nos critères ESGA^{MD} se fera en plusieurs volets.

Statera mise sur la construction d'un bâtiment à usages mixtes durable visant des engagements environnementaux importants, dont la certification de bâtiment carbone zéro (BCZ-Design V3), une première pour un bâtiment mixte de cette envergure au Québec. En cohérence avec les objectifs de la ville de Québec visant la création de milieux de vie durable encourageant l'innovation et la lutte contre les changements climatiques, le projet Laforest-Québec propose une construction neuve intégrant plusieurs innovations permettant d'atteindre ces objectifs communs.

Il consiste à la construction d'un bâtiment structurant localisé à la tête-des-ponts sur le Chemin St-Louis à Québec, de treize (13) étages. Le bâtiment de Laforest-Québec est composé d'un basilaire de sept (7) étages et de deux (2) surhauteurs de six (6) étages. Il propose une prédominance de logements locatifs dont la répartition se définit avec un rez-de-chaussée commercial de 33 000pi.ca et +- 358 logements locatifs.

Il s'agit d'un projet majeur avec un coût de projet de plus de 175M\$ qui propose une multitude de solutions innovantes pour répondre aux objectifs du Plan pour une économie verte 2030 du Gouvernement du Québec pour la lutte contre les changements climatiques du Québec.

Ce projet d'avant-garde offre une proposition de valeur importante pour la Ville de Québec et ses citoyens. En plus de sa localisation stratégique dans le réaménagement du secteur de la tête-des-ponts, le projet Laforest-Québec propose une multitude de composantes structurantes en phase avec les objectifs de la ville de Québec. Les principaux éléments sont identifiés ci-après :

- Offrir un premier développement immobilier visant la certification Bâtiment à Carbone Zéro (BCZ) Design V3 à Québec;
- Bonifier et diversifier l'offre de logements du secteur;
- Ajouter à l'offre commerciale pour répondre aux besoins du voisinage en services de proximité;
- Aménagement d'une importante place publique pour la communauté; lieu de rassemblements et d'événements;
- Favoriser l'utilisation des transports alternatifs et collectifs en minimisant les espaces de stationnement et en intégrant des espaces d'auto-partage et de vélo-partage sur un site TOD;
- Utilisation de matériaux de qualité et distinctifs incluant des systèmes mécaniques ambitieux et une efficacité énergétique exemplaire;
- Mettre en valeur des artistes locaux;

- Offrir un environnement sécuritaire et de qualité aux résidents, aux piétons et aux usagers;
- Remplacer un îlot de chaleur par des espaces verts;
- Marquer l'entrée de la ville et le parcours paysager du Chemin Saint-Louis.

La nature du projet Laforest-Québec est donc très inclusive et favorise mettre en place un bâtiment à impact favorable pour le bénéfice de la communauté et des futurs locataires. La clientèle visée par le projet est donc très diversifiée favorisant ainsi une mixité sociale.

2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante

Les composantes innovantes proposées par le projet Laforest-Québec sont distinctives par rapport aux pratiques du marché et dans l'industrie immobilière en raison que pour la majorité d'entre elles, il s'agit d'une première dans l'industrie en termes de gestion durable. En complément aux informations cités dans le volet précédent, voici donc les éléments distinctifs dans le marché de l'immobilier des innovations proposées par le projet Laforest-Québec :

Programme Projet Innovant de Hydro-Québec (performance énergétique)

Le projet Laforest-Québec figure parmi les projets de développement immobilier à viser une réduction de sa consommation d'énergie au-delà de 40% par rapport au code de référence. La mise en place d'un système de chauffage par géothermie et aérothermie incluant une boucle d'eau mitigée et récupération de chaleur s'avère une avancée en termes d'innovation dans l'industrie immobilière pour une performance énergétique exemplaire.

Certification BCZ-Design V3

Tel qu'expliqué précédemment, le projet Laforest-Québec mise sur la construction d'un bâtiment à usages mixtes durable visant des engagements environnementaux importants, dont la certification de bâtiment carbone zéro (BCZ-Design V3), une première pour un bâtiment mixte de cette envergure au Québec. Les conclusions de cette initiative permettront aux villes d'avoir une référence et un exemple de projet ayant pavée la voie avec cette certification cadrant en tout point avec les objectifs du présent programme de valoriser la réalisation de projets durables et de la lutte contre les changements climatiques.

Gestion innovante des eaux de pluie

La gestion innovante des eaux par des jardins de pluie dans une zone publique bonifie l'expérience des citoyens en plus d'embellir le secteur. Cette combinaison d'aménagement à travers une zone publique est très rare dans un projet immobilier, distinguant ainsi l'innovation proposée par le projet dans l'industrie. Celle-ci répond également à la problématique d'îlot de chaleur du secteur en créant un îlot de fraîcheur à l'intérieur de la nouvelle place publique proposé par le projet.

Projet de recherche avec l'université Concordia

L'intégration de panneaux photovoltaïques sans batterie, issus d'un projet de recherche avec l'Université Concordia, constitue une innovation unique pour un projet immobilier de cette ampleur. Ces orientations permettront, une fois de plus, de faire des avancées significatives avec l'intégration de solutions durables dans l'industrie de l'immobilier.

Utilisation importante du bois (Demandes de mesure équivalente à la RBQ pour 13^e étage en bois massif et pour les murs extérieurs en ossature légère de bois)

Les innovations pour l'intégration du bois dans le projet sont uniques puisqu'elles requièrent l'acceptation de modification des articles du Code par la Régie du Bâtiment (RBQ). Ces innovations d'intégration du bois dans les constructions de bâtiment de grande hauteur tel que Laforest-Québec auront un impact significatif sur l'industrie de l'immobilier et contribueront à rencontrer les objectifs de diminution des GES de par sa facilité de reproduction dans l'industrie et sa complémentarité avec les initiatives des partenaires spécialisés dans l'industrie du bois.

Dans le contexte du présent rapport, il s'agit de ces innovations avec les demandes de mesure équivalente qui seront mises de l'avant.

2.2 Titre et lieu de réalisation du projet de construction

Titre du projet : Laforest-Québec (construction multi-résidentielle et commerciale)

Lieu de réalisation : 3070, Chemin St-Louis, Québec (Québec), G1W 1R7

2.3 Description du projet de construction

Tel que mentionné précédemment, les engagements environnementaux du projet Laforest-Québec sont prédominants et audacieux pour un projet de grande hauteur. Pour l'atteinte de ces objectifs, il est donc primordial de diminuer l'empreinte carbone du bâtiment, et sachant que les plus grands contributeurs de GES dans la construction de bâtiments de grande hauteur sont le béton et l'acier, nous nous sommes donnés comme objectif de remplacer ces composantes de façon à assurer facilement la répliquabilité à travers l'industrie. Il fallait donc trouver dans quelles portions du bâtiment le bois pouvait remplacer le béton et/ou l'acier de façon efficace, simple et économique donc inévitablement répliquable par l'industrie.

La première innovation adresse le dernier étage d'un bâtiment de grande hauteur (de 13 étages) qui sera construit en bois massif alors qu'il est généralement construit en béton ou en acier étant donné que les bâtiments pouvant être en construction combustible sont limités à 6 étages et que seuls les bâtiments d'au plus 2 étages de construction incombustible peuvent être munies d'une toiture en construction de gros bois d'œuvre dans le CNEB 2015 modifié Québec.



La 2^e innovation visée est l'utilisation d'une enveloppe en ossature légère de bois en remplacement de l'enveloppe en ossature d'acier ce qui en plus de diminuer l'impact carbone est d'une utilité remarquable dans la performance énergétique du bâtiment. Cette 2^e demande de mesure équivalente requiert une approbation de conformité avec la RBQ pour l'utilisation d'une composition de murs



extérieurs en ossature légère de bois modifiée par rapport à celle présentée dans la section D-6.1.1 du CNB 2020 qui n'est toujours pas en vigueur au Québec. Encore une fois dans un contexte de réduction des GES, si l'utilisation du bois dans les enveloppes de bâtiment de grande hauteur pouvait être démocratisée, un pas de géant pourrait être fait rapidement. Afin de bien visualiser l'envergure de la superficie de murs extérieurs en ossature légère de bois proposée par le projet Laforest, l'illustration ci-après met en évidence les murs extérieurs proposés par cette solution innovante représentées par les compositions de couleur brune sur une coupe du bâtiment.



Figure 1 : Illustration des murs extérieurs en ossature légère en bois

Les études requises au déploiement de ces innovations doivent prévoir une analyse des exigences applicables du Code de construction et des objectifs de sécurité à respecter. L'appui à l'équipe de professionnels par un expert en code aura pour objectif de démontrer l'équivalence de la solution de rechange sur ces exigences et objectifs avec en appui les simulations incendies nécessaires. Les ingénieurs, architectes et professionnels du projet devront adapter leur conception pour inclure les structures de bois, les connexions avec les structures de béton, évaluer les solutions d'encapsulation du bois, adapter les méthodes d'installation des murs extérieurs préfabriqués, intégrer et optimiser la mécanique du bâtiment avec l'aménagement proposé.

Les résultats de cette première initiative associée aux demandes de mesure équivalente et à l'intégration dans la conception permettront à l'industrie d'incorporer ces innovations, connaître les défis techniques et ainsi réduire les risques liés à cette intégration dans la conception.

Quant aux activités de construction, les méthodes de préfabrication et de construction devront être développées pour assurer l'intégration de ces innovations dans la construction du bâtiment.

L'équipe devra également optimiser les méthodes pour ultimement rendre les coûts comparable aux méthodes traditionnelles et ainsi aider à la démocratisation des méthodes et ultimement, augmenter l'utilisation du bois dans l'objectif de diminuer l'émission de GES dans l'industrie immobilière.

2.3.1 Échéancier global et durée

Le tableau ci-après identifie les étapes du projet de conception et également, les projections des étapes de construction du projet Laforest-Québec. La durée totale du projet est de 60 mois. Toutefois, la présente étude dans le cadre du programme PICB portent sur la première phase du projet, correspondant à une première section du basilaire de 7 étages et de la première surhauteur de 6 étages. L'échéancier construction de cette première phase est de 24 mois.

N°	Activité/Étape	Date de début planifiée	Date de fin planifiée	Date de début réelle	Date de fin réelle	% de réalisation
1	Ouverture du dossier avec la RBQ pour les demandes de mesure équivalente	2023-04-27	2023-05-12	2023-04-27	2023-05-23	100%
2	Élaboration des plans concept incluant la structure de bois et les murs extérieurs en ossature légère de bois	2023-05-01	2023-05-19	2023-05-30	2023-09-01	100%
3	Analyse et démonstration de la conformité au code	2023-05-22	2023-08-21	2023-07-11	2024-04-05	100%
4	Préparation du rapport des demandes de mesure équivalente	2023-08-19	2023-11-04	2023-07-11	2023-10-16	100%
5	Traitement des demandes de mesure équivalente par la RBQ	2023-04-27	2024-02-01	2023-10-16	2024-08-23	100%
6	Intégration des solutions innovantes aux diverses émissions des plans	---	---	2023-09-01	2024-12-06	100%
7	Analyse de constructibilité et essai en chantier des murs préfabriqués	---	---	2024-04-01	janv-25	85%
8	Construction tour Est	2024-07-01	2026-07-01	2024-08-12	----	5%
9	Construction tour Ouest	2026-07-01	2028-07-01	----	----	

2.3.2 Budget global

Le budget de construction du projet est de 175 000 000\$. Ce budget inclus le terrain, la construction, la conception et les coûts administratifs requis pour la réalisation de ce projet immobilier.

2.3.3 Partenaires

Laforest-Québec, S.E.C. est une société composée de deux partenaires, soit La Forest inc. (Groupe Statera) et la Société Immobilière Laforest Commanditaires S.E.C. (Fondation).

2.3.4 Défis et risques généraux

Le risque que ces innovations n'atteignent pas les objectifs liés au code du bâtiment sous la gouverne de la Régie du Bâtiment du Québec reste un risque important dans le cadre du projet. Leur refus aurait un impact majeur sur la reprise de la conception ainsi que sur l'échéancier qui serait à revoir. Afin de concrétiser cette démarche, l'équipe de Laforest-Québec et ses professionnels sont appuyés par les spécialistes de Technorm et de FPInnovation qui, dans un objectif commun, voit une belle opportunité de concrétiser un avancement important pour l'intégration du bois dans les constructions mixtes de grande hauteur.

Sur le point des risques technologiques, les systèmes de connexion entre les structures de bois massif et de béton ainsi que les systèmes d'ancrages des éléments au toit en bois massif requièrent des analyses et expertises spécifiques pour adapter les ouvrages afin de résister aux efforts des équipements, tel que les bossoirs pour répondre aux besoins d'entretien et de sécurités du bâtiment de grande hauteur.

Pour la préfabrication de l'enveloppe en ossature légère de bois, les manufacturiers sont généralement impliqués dans les bâtiments de plus petites envergures ou bien résidentiel léger ou les normes et les contraintes sont différentes. Les pratiques doivent donc être adaptées autant dans la préfabrication à l'usine que pour la méthodologie d'installation en chantier. L'exécution de la vision reste un enjeu énorme et des essais en chantier au préalable demeurent essentielles pour valider les risques, les contraintes et adapter les pratiques pour être en mesure de réaliser un projet de l'ampleur de Laforest-Québec, un bâtiment de grande hauteur de 13 étages.

Sur le plan des risques financiers, le projet Laforest-Québec propose déjà une multitude d'innovation en plus de ceux proposés dans le programme du PICB. Les nouvelles pratiques définies en collaboration avec les différents intervenants impliqués engendrent des risques sur la concrétisation de ces façons de faire, l'expertise à développer avec les sous-traitants et fabricants, l'intégration des solutions innovantes dans la méthodologie et l'exécution par l'ensemble des corps de métier d'un projet de grande hauteur tel que le projet Laforest-Québec. Il est donc primordial pour la concrétisation du projet, de bien évaluer les risques pour les mitiger et voir à simplifier l'exécution. Dans un contexte économique aussi sensible, c'est la viabilité du projet qui est en jeu si les risques ne sont pas adéquatement contrôlés et mitigés. C'est sans aucun doute le défis du projet Laforest-Québec de réduire les risques technologiques afin d'assurer l'intégration de l'ensemble des solutions innovantes proposées, sans engendrer des surcoûts au projet. La viabilité financière de l'intégration des solutions innovantes sera donc évaluée dans le projet pour rencontrer les objectifs de proposée une solution valorisant l'usage du bois qui demeure compétitive dans le but de maximiser la reproductibilité dans l'industrie.

3. Détails de l'étude

3.1 Introduction et hypothèses de départ

3.1.1 Construction du 13^e et dernier étage en bois massif (DME-01)

La présente étude vise à obtenir les mesures équivalentes à la RBQ pour intégrer la construction massive en bois encapsulé (CMBE) pour le 13^e étage d'un bâtiment de 12 étages incombustibles, en référence avec l'article 3.2.2.16 -Toits en gros bois d'œuvre ainsi que la limite de hauteur des constructions combustibles. La démarche sera appuyée avec le guide explicatif (Bâtiments de construction massive en bois encapsulé d'au plus 12 étages) et du CNB 2020 (bien qu'il ne soit pas en vigueur au Québec actuellement au moment de

produire les présentes analyses). Une étude comparative sera également effectuée au moyen d'une modélisation d'incendie.

Une des stratégies retenues afin d'intégrer le bois dans les matériaux de construction du bâtiment est de prévoir le toit et ses éléments porteurs en bois massif. Le reste du bâtiment (planchers et éléments porteurs) sera de construction incombustible tel qu'illustré sur l'image ci-après.

Notons que le toit et ses éléments porteurs peuvent être en gros bois d'œuvre si le bâtiment à au plus 2 étages et est protégé par gicleurs, en vertu de l'article 3.2.2.16.

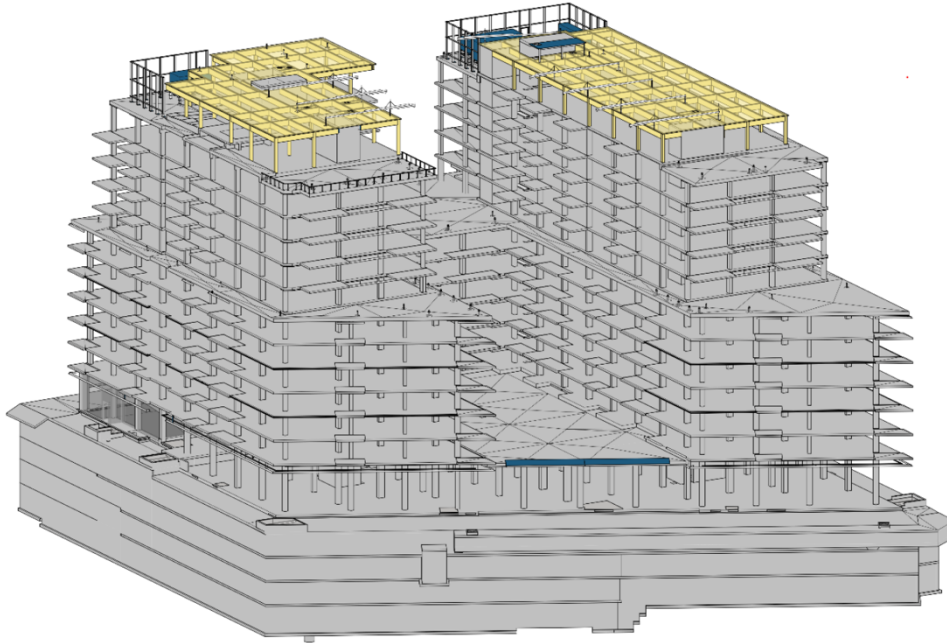


Figure 2: Plan de la structure – Construction hybride du bâtiment

3.1.2 Murs extérieurs en ossature légère de bois (DME-02)

Tel que précisé dans la section 2.3, la demande de mesure équivalente pour l'utilisation d'une composition de murs extérieurs en ossature légère requiert une approbation de conformité avec la RBQ en lien avec la modification d'une composition de la section D-6.1.1 du CNB 2020. La composition de mur extérieur générique EXTW-2 défini pour la réalisation des murs extérieurs en ossature légère en bois, ne comporte pas une isolation suffisante afin d'atteindre les cibles de performance thermique et énergétique associés aux codes en vigueur, à la norme BCZ Design V3 (Intensité énergétique 25% supérieure au CNEB 2017) ainsi que la norme APH Select (Intensité énergétique 40% supérieure au CNEB 2017). Il est donc requis d'ajouter une épaisseur d'isolation incombustible de 114 mm du côté extérieur, entre le revêtement extérieur et la composition de mur EXTW-2.

Le problème soulevé est que la composition proposée est modifiée par rapport à la composition EXTW-2 qui a été testée conformément à la norme CAN/ULC-S134.

Ainsi, il est prévu que les murs extérieurs aient une composition comprenant une ossature légère de bois. Ceci est possible si la composition de mur a été testée conformément à la norme CAN/ULC-S134, « Essais de comportement au feu des murs extérieurs » et satisfait aux critères d'essai et aux conditions d'acceptabilité de l'alinéa 3.1.5.5. 1)b) [3.1.5.6. 1)b)i)] identifié ci-après.

Libellé des exigences
3.1.5.6. Composants combustibles pour les murs extérieurs 1) Un mur extérieur d'un bâtiment pour lequel une construction incombustible est exigée peut comporter des composants combustibles, autres que ceux autorisés par l'article 3.1.5.5., à condition : a) que le bâtiment : i) ait une hauteur de bâtiment d'au plus 3 étages; ou ii) soit entièrement protégé par gicleurs; et b) que le mur : i) satisfasse aux exigences de l'alinéa 3.1.5.5. 1)b); ou ii) soit protégé par un revêtement en maçonnerie ou en béton d'au moins 25 mm d'épaisseur.
3.1.5.5. Revêtements combustibles pour les murs extérieurs 1) Sous réserve des paragraphes 2) et 3), un mur extérieur d'un bâtiment pour lequel une construction incombustible est exigée peut comporter un revêtement combustible à condition :
Libellé des exigences
b) Que le mur, lorsqu'il est soumis à l'essai conformément à la norme CAN/ULC-S134, « Essais de comportement au feu des murs extérieurs » satisfasse aux critères d'essai et conditions d'acceptabilité qui suivent : i) À l'intérieur ou à la surface du mur, les flammes ne se propagent pas sur plus de 5 m au-dessus de l'ouverture; et ii) Le flux thermique mesuré à 3,5 m au-dessus de l'ouverture durant l'exposition du mur à la flamme ne dépasse pas 35 kW/m².

Ainsi, il est prévu que les murs extérieurs soient conçus selon la composition de mur extérieur générique EXTW-2 développée par le CNRC (voir le rapport d'essai A1-100035-01.5 à la section 4 du présent rapport). La démonstration portera donc sur la preuve que la modification apportée à la composition du mur EXTW-2 ayant été testée conformément à la norme CAN/ULC-S134 demeure conforme et applicable.

3.2 Objectifs

L'objectifs du projet est de proposer des alternatives de construction traditionnelle afin de réduire les GES d'un bâtiment de grande hauteur par l'intégration d'élément favorisant l'utilisation du bois. Le plan de travail pour la conception, l'ingénierie et la construction a été défini avec l'équipe de travail et se résume ainsi :

- Élaboration des solutions innovantes avec l'équipe de conception;
- Préparation de deux demandes de mesures équivalentes pour les modifications proposées au code avec l'équipe de conception accompagnée des spécialistes de Technorm;

- Réalisation d'une étude comparative qui sera également effectuée au moyen de la modélisation d'incendie;
- Validation et avis technique avec le chercheur du CNRC, responsable de l'essai CAN/ULC S134 sur les compositions des murs extérieurs du Code du Bâtiment;
- Confirmation de la RBQ sur les demandes de mesures équivalentes des solutions innovantes ;
- Intégration des solutions innovantes dans la conception du projet;
- Analyse de constructibilité avec les professionnels (architectes et ingénieurs) et l'équipe de construction et les manufacturiers des solutions innovantes;
- Établissement des processus d'installation des éléments préfabriqués au site;
- Réalisation d'un essai en chantier pour les éléments préfabriqués;
- Définir les méthodes d'intégration des solutions innovantes pour obtenir des coûts comparables aux méthodes traditionnelles.

3.3 Méthodologie

Les sections qui suivent élaborent les méthodes utilisées pour les démonstrations de l'acceptation des demandes de mesures équivalentes et les évaluations de constructibilité des solutions innovantes. Les solutions innovantes nécessitent de prévoir une conception intégrée pour adapter les compositions traditionnelles avec les innovations proposées. Pour ce faire, les architectes de RÉGIS doivent s'assurer dans un premier temps de faire les démonstrations nécessaires, en support avec les ingénieurs en structure et en mécanique du bâtiment de EMS et CBTEC, pour faire approuver les demandes de mesures équivalentes afin que celles-ci puissent être intégrées dans la conception. Les études de code, les analyses de connexion de la conception hybride béton-bois, l'intégration des innovations avec les critères de performance énergétique du projet associés à la certification BCZ Design V3, sont des éléments de conception qui devront être réalisées dans le projet. L'élaboration des demandes de mesures équivalentes est réalisée par la firme spécialisée en code **Technorm et la firme d'architecture RÉGIS** qui assureront la démonstration de la conformité des solutions innovantes proposées.

3.3.1 Construction du 13^e et dernier étage en bois massif (DME-01)

L'équivalence de la solution proposée pour intégrer la construction massive en bois encapsulé (CMBE) du 13^e étage est démontrée par une étude comparative entre la solution acceptable, respectant en tout point les exigences réglementaires, et la solution proposée incluant les solutions innovantes.

Cette étude comparative a été réalisée par **Technorm, RÉGIS et EMS**. Les principaux éléments étudiés sont énumérés ci-après.

La solution acceptable est simulée comme ayant 100 % de la superficie des murs combustibles (contreplaqué d'au plus 25 mm [1 po], IPF 150), 90 % de la superficie du plafond en matériaux ayant un IPF d'au plus 25 (gypse) et 10 % du plafond en matériau combustible ayant un IPF de 150 (contreplaqué d'au plus 25 mm [1 po], IPF 150).

La solution de rechange reproduit le concept proposé, soit la présence des éléments en bois massif exposés au 13^e étage.

L'étude comparative est effectuée au moyen de la modélisation d'incendie (présenté à l'annexe 1) qui permet d'obtenir l'ordre de grandeur de la puissance d'incendie pour les scénarios considérés. Six (6) compartiments où se trouvent les éléments structuraux en bois apparents ont été modélisés séparément. Pour chaque compartiment au moins deux (2) emplacements de foyer d'incendie ont été examinés. Au total, 26 simulations ont été réalisées (13 scénarios d'incendie x 2 configurations de rechange ou acceptables)

Les principales intentions de la solution acceptable du Code sont de limiter la probabilité que les matériaux de construction contribuent à la croissance et à la propagation du feu, ce qui pourrait causer des blessures à des personnes ou des dommages au bâtiment. Elles visent également à exempter certains matériaux combustibles de l'application du paragraphe 3.1.5.1. 1), si certaines conditions sont satisfaites, parce que ces matériaux sont censés contribuer de façon négligeable à la croissance et à la propagation du feu.

3.3.2 Murs extérieurs en ossature légère de bois (DME-02)

Les activités consistent à effectuer la démonstration de la conformité de la composition des murs extérieurs proposée dans la DME-02, soit la composition générique EXTW-2 à laquelle est ajoutée une épaisseur d'isolant semi-rigide de fibre de roche de 114 mm d'épaisseur (voir les compositions de murs extérieurs à la figure 3).

La démonstration vise à confirmer que l'ajout de matériaux incombustibles du côté extérieur de la composition de mur EXTW-2 n'a pas d'impact négatif sur la performance de cet assemblage.

Cette démonstration de conformité sera appuyée par une opinion d'ingénierie fournie par le CNRC ayant participé au développement de la composition de mur extérieur générique EXTW-2.

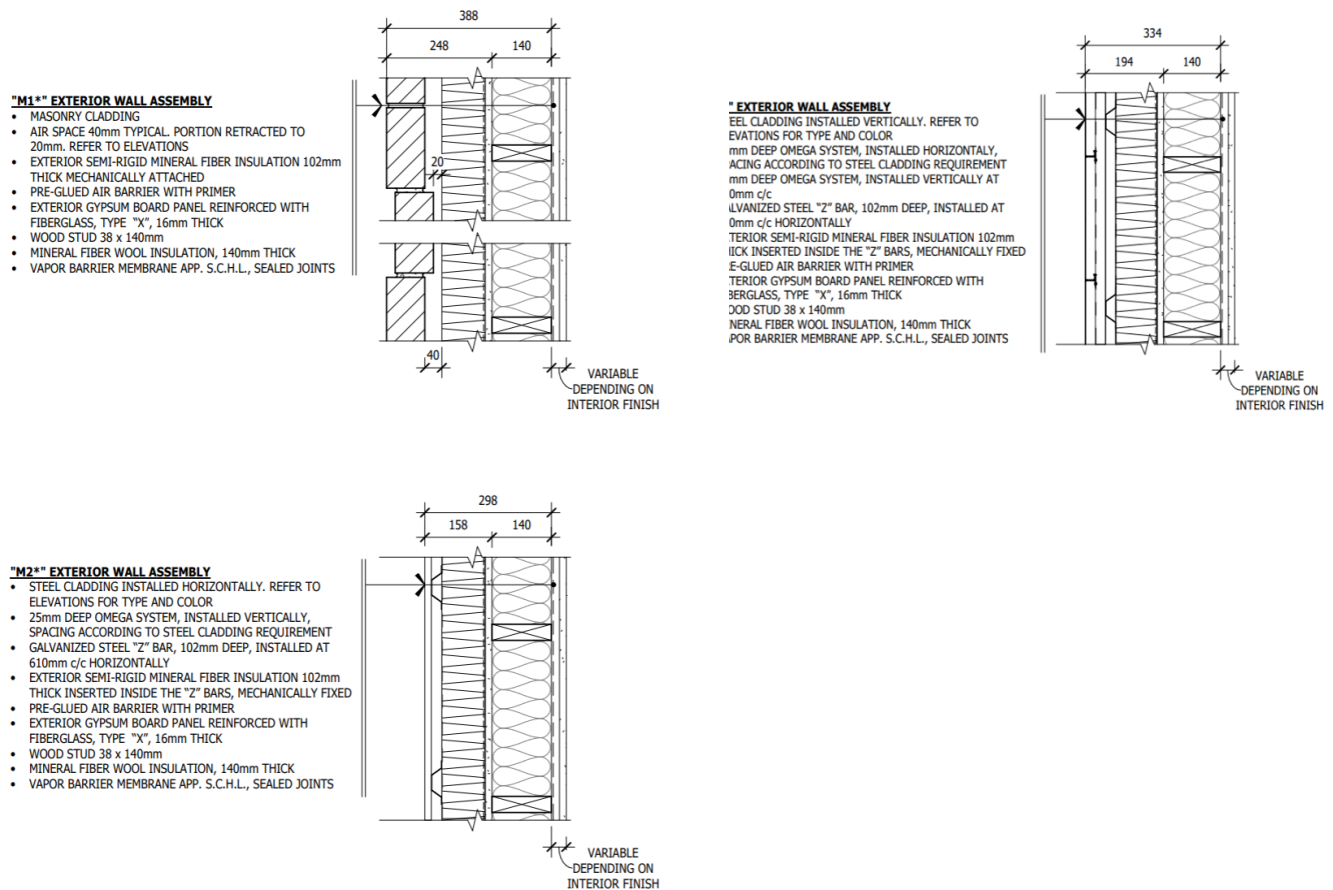


Figure 3 – Compositions des murs extérieurs M1*, M2* et M3*

3.3.3 Évaluation de la constructibilité des solutions innovantes et essai en chantier

Les activités suivantes ont été réalisées pour permettre d'évaluer la gestion du risque des innovations dans l'intégration de la construction du projet ainsi que l'optimisations des solutions innovantes afin de minimiser l'impact de surcoûts.

- a. Évaluation des risques d'intégration des solutions innovantes
- b. Identification des éléments engendrant des surcoûts

Ces activités ont été réalisés avec l'équipe de conception du projet, l'entrepreneur général, les sous-traitants spécialisés impliqués, les fournisseurs et manufacturiers. Les méthodes de travail doivent être adaptées pour inclure avec succès les éléments préfabriquées. Les connexions des compositions hybrides béton-bois, les stratégies pour privilégier la préfabrication en usine, font partie des activités principales liées à la construction des éléments du projet.

Les technologies proposées dans les innovations d'intégration du bois par le projet Laforest-Québec consistent donc aux assemblages et connexions des structure en bois massif et à la préfabrication des panneaux de murs extérieurs en ossature légère en bois. À titre d'exemple, les technologies visées se résument ainsi :

- Détails permettant la connexion entre les ouvrages de bois massif et de béton dans un bâtiment de grande hauteur.
- Détails permettant la connexion entre les ouvrages d'ossature légère de bois et le béton dans un bâtiment de grande hauteur.
- Les connexions associées aux équipements d'entretien tel que bossoir sur une structure de bois massifs dans un bâtiment de grande hauteur.
- Le montage de préfabrication des panneaux de murs extérieurs, intégrant les compositions rencontrant les critères d'étanchéité et d'isolation au-delà du code dans un bâtiment de grande hauteur.

Pour évaluer les solutions issues des analyses de l'équipe de conception et de construction, un essai en chantier sera réalisé sur un bâtiment en construction similaire au projet Laforest-Québec afin d'effectuer divers essais dans des conditions météorologiques hivernales, dont : l'infiltration d'air, la pénétration d'eau, les charges dues au vent, la condensation, le rendement des ancrages, les difficultés de mise en place des murs préfabriqués et autres. La préfabrication de 4 panneaux de murs est prévue pour effectuer cet essai.

3.3.4 Évaluation de la constructibilité des divisions intérieures en bois

Dans l'objectif de remplacer également les colombages métalliques des divisions intérieures par des colombages en bois, l'étude s'est également penchée sur les possibilités de faire cette substitution dans le bâtiment. Malgré que l'étude n'eût pas objectif d'évaluer cette option, l'analyse et les conclusions de cet essai demeuraient pertinentes à évaluer dans le cadre de l'étude en complément aux autres initiatives proposées.

3.4 Résultats et analyse

Les résultats et analyses des innovations proposées sont présentés ci-après :

3.4.1 Construction du 13^e et dernier étage en bois massif (DME-01)

Les résultats de la modélisation incendie réalisée par **Technorm** démontrent par l'étude comparative entre le bâtiment proposée avec l'intégration de la structure de bois massif au 13^e et dernier étage du bâtiment et le bâtiment de référence acceptable, que le bâtiment proposé est toujours plus sécuritaire pour des paramètres comparatifs identiques. En effet, les 26 scénarios d'incendie examinés pour six (6) espaces différents dans lesquels se trouvent les éléments de bois apparents ont démontré que l'incendie de la solution de rechange, comparativement à celui de la solution acceptable, peut être caractérisé par :

- une puissance d'incendie globale (débit calorifique) moins élevée;
- une propagation d'incendie plus tardive ou absente;
- un développement d'incendie (croissance) plus lent;
- l'absence de l'embrasement général.

Mentionnons que la charge combustible réelle n'a pas été considérée. Les calculs ont été basés sur l'hypothèse que la charge combustible disponible est en mesure de maintenir un incendie pendant au moins 2 heures. Il s'agit donc d'une hypothèse conservatrice étant donné que le contenu combustible dans certains compartiments comme la piscine ou la salle communautaire est relativement faible.

Par ailleurs, les distances de parcours à l'issue ont été validées par les professionnels en architecture de RÉGIS afin que la distance de parcours maximale pour atteindre une issue d'un point quelconque de l'aire de plancher du 13^e étage soit de 40 m. Une mesure inférieure à celle d'une situation conforme où cette distance serait de 45 m jusqu'à la porte de sortie d'une suite donnant sur le corridor commun, puis de 45 m depuis cette porte de sortie jusqu'à une issue pour un total de 90 m.

La solution proposée fait donc en sorte de faciliter l'évacuation en cas d'urgence puisque la distance à parcourir pour atteindre une issue est de beaucoup inférieure à celle de la solution acceptable du CNB.

Le rapport de simulation numériques de la modélisation d'incendie réalisé par Technorm est présenté à l'annexe 1.

Finalement, la demande de mesure équivalente soumise pour la DME-01 a obtenu l'acceptation de la Régie du Bâtiment du Québec.

3.4.2 Murs extérieurs en ossature légère de bois (DME-02)

Les résultats de la démonstration de la conformité de la composition des murs extérieurs proposés réalisée par les firmes Technorm et RÉGIS ont permis de statuer que le niveau de sécurité offert par la solution proposée était conforme avec les essais réalisés pour la composition de mur extérieur générique EXTW-2 par rapport au test de la norme CAN/ULC S134. Les principaux résultats de l'étude sont énumérés dans les paragraphes suivants.

Selon l'opinion d'ingénierie fournie par le CNRC ayant participé au développement de la composition de mur extérieur générique EXTW-2, l'ajout de matériaux incombustible du côté extérieur de la composition de mur EXTW-2 n'a pas d'impact négatif sur la performance de cet assemblage.

En effet, le test de la norme CAN/ULC S134 est utilisé pour évaluer la performance au feu et les caractéristiques de combustion d'un mur extérieur soumis à une exposition au feu contrôlée. Le test mesure la propagation du feu sur le revêtement, le flux thermique d'un feu contrôlé vers le mur extérieur, et la propagation du feu à l'intérieur de l'assemblage mural. Il s'agit donc d'évaluer à quel point les matériaux combustibles d'un assemblage contribueront à propager le feu par des ouvertures dans un mur sur la surface extérieure de ce mur.

Un matériau incombustible est un matériau qui répond aux exigences de la norme CAN/ULC-S114, « Détermination de l'incombustibilité des matériaux de construction ». Un matériau est considéré comme incombustible selon certains critères, entre autres, lorsqu'il n'y a aucune inflammation qui ne se produit au cours des trois (ou plus) essais de 14 min 30 s.

Ainsi, l'ajout de nattes d'isolant semi-rigide incombustible entre la composition EXTW-2 et le revêtement extérieur incombustible ne fera pas en sorte de propager davantage le feu par rapport au test effectué selon la norme CAN/ULC-S134. Le rapport d'essai du CNRC (A1-100035-01.5) est en référence dans la section 4.

Ainsi, la composition proposée est équivalente à la composition testée répondant aux exigences de l'alinéa 3.1.5.5. 1)b).

Finalement, la demande de mesure équivalente soumise pour la DME-02 a obtenu l'acceptation de la Régie du Bâtiment du Québec.

Prendre note que la plus récente simulation énergétique a révélé qu'il était possible d'atteindre les cibles requises en réduisant légèrement l'épaisseur de l'isolant de fibres minérales semi-rigide extérieur aux colombages de bois. Dans un contexte de développement durable, il a donc été convenu de réduire l'épaisseur de l'isolant de fibres minérales semi-rigide extérieur à 102mm, au lieu du 114mm initialement prévu, pour minimiser au maximum l'empreinte de carbone intrinsèque de l'enveloppe ainsi que la quantité de matériaux de construction. Cette modification a fait également l'objet d'une approbation de la RBQ.

3.4.3 Évaluation de la constructibilité des solutions innovantes et essai en chantier

L'évaluation sur la constructibilité des solutions innovantes et les essais en chantier consiste à une étape primordiale pour définir la faisabilité d'intégration de ces solutions dans un projet majeur de grande hauteur comme celui de Laforest-Québec. Les résultats des analyses sont précisés ci-après :

- **Les connexions de la structure de bois massif à la structure et ancrages aux structures de bois**

La conception des systèmes d'ancrage devant être installée en toiture pour l'entretien et la sécurisation du bâtiment tel que bossoirs, lignes de vie, poutres de levage ont requis une conception spécifique pour considérer les particularités d'intégration de tel système à une structure de bois massif. La configuration du bâtiment a fait en sorte que les efforts pour ces systèmes d'ancrage étaient considérables et a demandé une coordination entre les intervenants pour réduire l'impact des charges engendrées par ces systèmes sur la structure de bois. Par conséquent, il a été nécessaire d'élaborer des solutions moins contraignantes et optimisées pour assurer un concept économiquement viable et fonctionnel. Il est moins habituel d'effectuer cette coordination plus fine et détaillée entre l'entrepreneur responsable de l'entretien du bâtiment, l'ingénieur spécialiste en système d'entretien et l'ingénieur en structure du bâtiment à cette étape de conception. Toutefois, dans le contexte d'intégration d'une structure de bois dans un bâtiment de grande hauteur, ces

validations sont primordiales pour éviter des enjeux majeurs en construction où l'impact pour répondre aux charges induites de ces éléments à la structure de bois pourrait avoir des conséquences importantes sur la structure en soi, sur l'aspect visuel désiré de l'ouvrage et sur les surcoûts potentiels.

De ce fait, la conception en amont de ces éléments a permis de dimensionner et positionner stratégiquement les ancrages pour s'assurer d'une considération immédiate de ces éléments dans la conception du bâtiment. Cet exercice a été réalisé en collaboration avec l'ensemble des intervenants pour établir les solutions les plus adaptées répondant aux capacités des charges induites des systèmes sur les ouvrages, des besoins d'entretien du bâtiment en opération et d'une solution économique à la construction. Malgré ces optimisations, les solutions retenues engendrent des surcoûts au projet et devront être pris en considération lors du volet B du programme dans la construction.

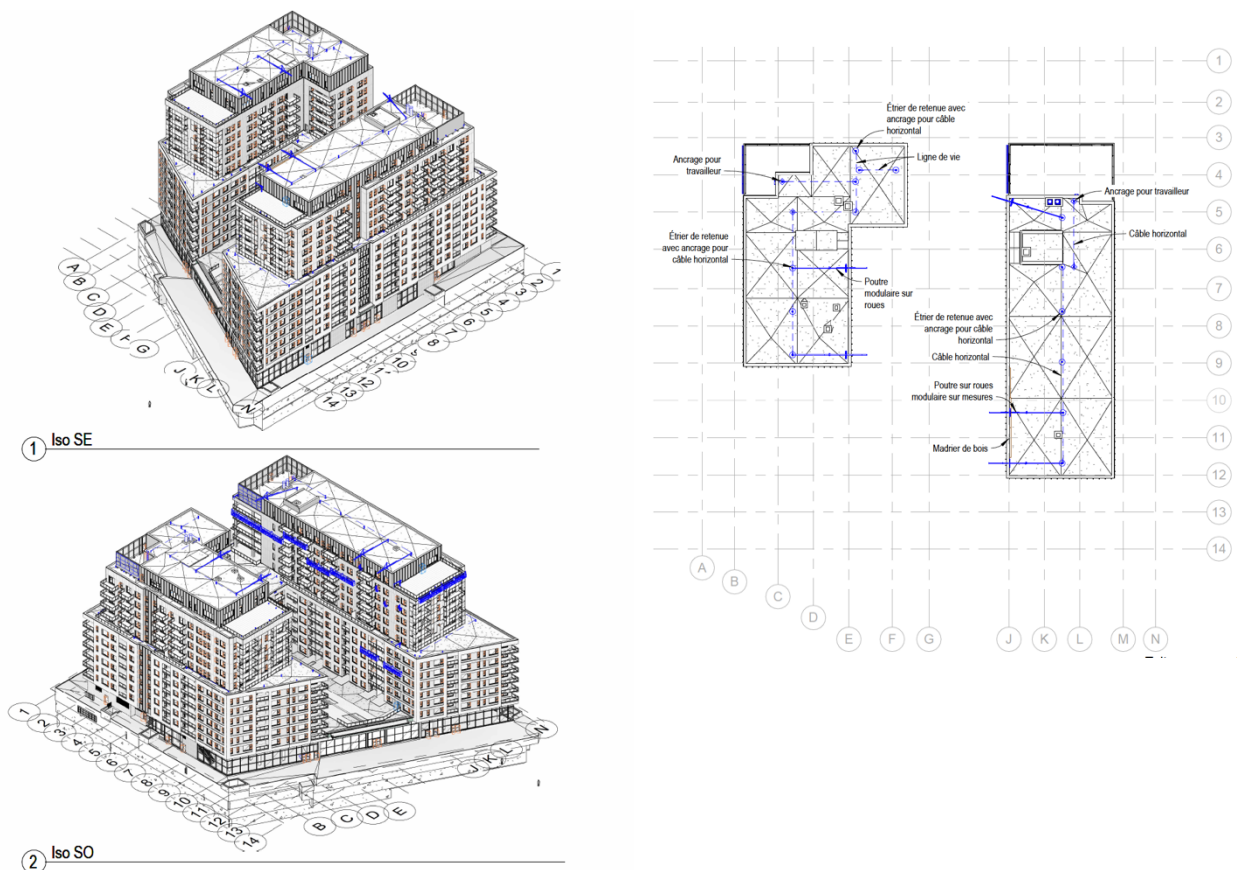


Figure 3 : Identification du concept des systèmes d'ancrage à la structure de bois

- Préfabrication des murs extérieurs et méthodologie d'exécution au chantier

Les ateliers de travail entre les professionnelles du projet Laforest-Québec, les entrepreneurs, les manufacturiers et les spécialistes de l'industrie du bois ont permis d'élaborer les méthodes de travail et de conception des murs préfabriqués pour répondre aux enjeux et risques soulevés dans les sections précédentes. Il n'en demeure pas moins que l'intégration de cette innovation dans un bâtiment de grande

hauteur entraîne des contraintes d'installation importantes pouvant impacter autant la faisabilité en soi de l'installation des murs préfabriqués que la séquence d'exécution au chantier pour la réalisation. Il était donc primordial d'impliquer chaque intervenant incluant les sous-traitants des disciplines impactées par l'intégration de cette solution afin d'évaluer les impacts et contraintes de chacun, définir les solutions optimisées pour chacun afin d'assurer une exécution adéquate et sans impact financier et de délai.

Les impacts associés au délai d'exécution engendrent non seulement des surcoûts durant la construction, mais également un retard sur des revenus de location par une livraison tardive du bâtiment. Il était donc impératif de voir à ce que l'intégration de ces solutions dans le bâtiment s'arrime parfaitement avec l'exécution au chantier.

Au-delà du détail de conception du mur préfabriqué, le principe d'ancrage et d'installation de ces murs a été longuement analysé, du transport de mur préfabriqué de l'usine jusqu'à la dernière vis fixant le panneau. Cette analyse requiert la réflexion du transport au chantier, de la manutention des panneaux avec la grue, la coordination avec l'entrepreneur en enveloppe du bâtiment et l'entrepreneur en mécanique du bâtiment. Considérant que la toiture du bâtiment ne sera pas complétée avant l'installation des murs extérieurs, des solutions pour l'étanchéité durant la construction ont dû être réfléchies entre les architectes, entrepreneurs et fournisseurs pour éviter un impact d'infiltration et d'humidité problématique.

Au point de vue des ancrages pour fixer les murs préfabriqués, une conception détaillée a permis de définir une solution efficace qui permet de réduire les étapes préparatoires en chantier, de considérer la déflexion de la dalle de béton et le retrait du bois, d'assurer la résistance aux charges de poussées et de successions induites par le vent tout en respectant la conception du mur permettant de répondre aux cibles de performance thermique et énergétique associées aux codes en vigueur, à la norme BCZ Design V3 (Intensité énergétique 25% supérieure au CNEB 2017) ainsi que la norme APH Select (Intensité énergétique 40% supérieure au CNEB 2017).

L'objectif de l'étude visait également à maximiser la préfabrication de la composition du mur extérieur en usine. Dans un contexte de bâtiment de grande hauteur, plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour élaborer la portée de composition des murs réalisés en usine.

Dans un premier temps, les fabricants de murs préfabriqués réalisent majoritairement, voir même exclusivement, des projets résidentiels/commerciaux conventionnels de plus faible hauteur. La réalisation d'un projet de grande hauteur, dans une construction mixte (béton-bois) tel que le projet Laforest, impacte de façon majeure la chaîne de production du fabricant. D'autant plus que la production se limite aux murs extérieurs, sans poutrelles et autres composantes prévues dans la chaîne de production. Pour répondre à cette problématique et minimiser les surcoûts, la production doit s'effectuer exclusivement dans la période à plus faible achalandage durant l'hiver pour permettre d'adapter l'usine en conséquence sans impacter leurs productions conventionnelles. Il est donc requis de prévoir un entreposage à moyen-long terme des panneaux préfabriqués avant livraison et installation au chantier. Cette situation engendre des risques importants, entre autres, de condensation dans les murs pouvant potentiellement affecter l'intégrité du mur. Les risques d'endommager l'intégrité des murs en lien avec les manutentions de ces derniers dans le transport et sur un chantier d'un bâtiment de 13 étages est important et peut causer un enjeu majeur si par exemple, les membranes et l'isolation étaient endommagées. De plus, les objectifs de cibles de performance thermique et énergétique associés à la certification BCZ Design V3 (Intensité énergétique 25% supérieure au CNEB 2017) ainsi que la norme APH Select (Intensité énergétique 40% supérieure au CNEB 2017) demande des mesures exemplaires sur l'étanchéité des murs extérieurs.

Pour mitiger les nombreux risques associés à l'intégration de cette innovation dans le bâtiment, le système proposé a fait l'objet d'un essai en chantier qui est décrit dans le point suivant. La composition du mur préfabriqué mise à l'essai est tel le détail présenté précédemment, incluant les membranes et le gypse sur la

face extérieure ainsi que le colombage de bois. La laine de roche et l'étanchéité finale intérieur s'effectuera en chantier pour déceler lors de l'essai, les taux d'humidité et zones de sensibilité.

- **Essai en chantier d'installation des murs préfabriqués**

L'essai en chantier de l'installation des murs préfabriqués aura lieu sur un chantier en construction sur la Rive Sud de Québec, à Lévis. La date visée d'installation est dans la semaine du 16 décembre 2024 ou en début janvier au retour du congé des fêtes. L'installation des murs s'effectuera sur les niveaux 2 et 3 du bâtiment en construction.

Par conséquent, les résultats de l'essai en chantier des murs préfabriqués ne sont malheureusement pas disponibles pour compléter le présent rapport. Les étapes associées à l'essai en chantier sont énumérées ci-après avec les précisions sur les objectifs ciblés de l'exercice.

- La préfabrication en usine des panneaux de mur extérieur définie dans le détail illustré précédemment est réalisée par le manufacturier. Cette étape vise à mettre en essai les techniques de préfabrication en usine associée à la réalité du bâtiment de grande hauteur.
- L'installation des panneaux s'effectuera sur une structure de béton en cours de construction. L'essai consiste à valider les méthodes de manutention des murs préfabriqués au chantier, d'ancrage des murs à la structure de béton, la gestion de la déflexion des dalles de béton, les techniques permettant l'alignement des fenêtres, et autres validations nécessaires.
- Un monitoring sera effectué par l'équipe de FPInnovation durant la période de l'essai afin de documenter, analyser et fournir les conclusions avec les résultats d'instrumentation. La plage d'essai est de +/- 10 semaines durant des conditions climatiques hivernales qui laisseront suffisamment de temps pour évaluer des conditions réelles associés aux intempéries, les charges dues au vent, les sollicitations aux ancrages et autres.

Les analyses des résultats de cet essai s'effectueront à l'hiver 2025 avec les professionnels impliqués au projet. Les conclusions seront incorporées dans le volet B du programme PICB du projet Laforest-Québec et serviront à orienter le volet construction de cette solution innovante.

- **Essai en chantier de division des murs intérieurs avec colombage en bois**

L'analyse complémentaire pour une réalisation des divisions intérieurs en ossature de bois en remplacement des colompages métalliques a également été réalisée afin d'optimiser l'utilisation du bois dans le projet. Cette substitution n'est pas usuelle dans la construction de bâtiment de grande hauteur. Les premières étapes consistent à valider la conformité avec les articles du code sur les éléments combustibles dans les cloisons en référence à l'article 3.1.5.16. Les conditions du 3^e paragraphe de cet article s'avéraient réalisable pour le projet, soit :

3) Les cloisons en bois massif d'au moins 38 mm d'épaisseur et les cloisons à ossature de bois sont autorisées dans un bâtiment pour lequel une construction incombustible est exigée, à condition :

a) que le bâtiment soit entièrement protégé par gicleurs; et

b) que les cloisons :

i) ne soient pas situées dans un établissement de soins, de traitement ou de détention;

ii) ne forment pas les parois des issues ou des vides techniques verticaux; ou

iii) ne servent pas à satisfaire aux exigences de l'alinéa 3.2.8.1. 1)a).

Un élément important à considérer dans cette option consistait à l'exécution au chantier. En effet, les entrepreneurs spécialistes en système intérieur, intervenant sur des projets de grande hauteur tel que le projet Laforest, exécutent essentiellement les divisions intérieures en colombage métallique.

L'essai en chantier réalisé consistait à valider les contraintes, efficacités de remplacer les divisions intérieures en acier par des colombages en bois et d'évaluer les ajustements requis par rapport à l'exécution standard. L'essai a été effectué à l'intérieur du centre commercial Laforest sur le site du projet afin d'évaluer ces éléments.



Figure 5 : Essai en chantier de division intérieur des murs de bois

Les conclusions de ces validations techniques et de l'essai en chantier ne se sont pas avérées suffisamment concluantes pour les considérer. En effet, cette substitution des divisions des colombages métalliques par le bois constituait un risque de surcoûts au projet en raison des méthodes à adapter sur un projet de cette ampleur. Il est important de préciser que cette option analysée ne faisait pas partie des objectifs de l'étude mais une conclusion positive aurait pu mener l'équipe à évaluer cette avenue de substitution dans le projet.

3.5 Conclusions

Cette étude a permis de mettre en évidence les conclusions associées avec les analyses intégrant les solutions innovantes proposées par l'ajout du dernier étage en bois massif ainsi que l'installation de murs extérieurs préfabriqués en ossature légère de bois dans l'industrie de la construction de bâtiments de grandes hauteurs tel que le projet Laforest.

3.5.1 Construction du 13^e et dernier étage en bois massif (DME-01)

- Les résultats de la modélisation par l'étude comparative entre le bâtiment proposée avec l'intégration de la structure de bois massif au 13^e et dernier étage du bâtiment et le bâtiment de référence acceptable, on permet de conclure que le bâtiment proposé est toujours plus sécuritaire pour des paramètres comparatifs identiques;
- La distance de parcours maximale pour atteindre une issue d'un point quelconque de l'aire de plancher du 13^e étage analysé est inférieure à celle d'une situation conforme;
- L'acceptation de la demande de mesure équivalente par la Régie du Bâtiment du Québec pourrait permettre de démocratiser la réalisation du dernier étage d'un bâtiment de grande hauteur en bois, favorisant une reproductibilité dans l'industrie immobilière qui aurait un impact favorable important pour l'industrie du bois;

3.5.2 Murs extérieurs en ossature légère de bois (DME-02)

- L'ajout de nattes d'isolant semi-rigide incombustible entre la composition EXTW-2 et le revêtement extérieur incombustible ne fait pas en sorte de propager davantage le feu par rapport au test effectué selon la norme CAN/ULC-S134;
- La composition de mur extérieur en ossature légère de bois augmente l'efficacité énergétique et permet de réduire les quantités d'isolant rigide, ce qui est en phase avec l'objectif de réduction des GES;
- La demande de mesure équivalente soumise pour la DME-02 a obtenu l'acceptation de la Régie du Bâtiment du Québec.

3.5.3 Évaluation de la constructibilité des solutions innovantes et essai en chantier

- Les systèmes d'ancrage installés sur la toiture en bois massif pour l'entretien et la sécurisation du bâtiment ont un impact important sur les charges induites à la structure de bois et les assemblages requis.
- La préfabrication de murs extérieurs en usine pour un bâtiment de grande hauteur requiert que le manufacturier adapter son usine en conséquence en raison du changement important d'une séquence de production standard dans l'industrie de préfabrication.
- Les méthodologies pour l'installation de murs extérieurs préfabriqués demandent une agilité au chantier et une coordination minutieusement préparée avec l'ensemble des intervenants impliqués

pour innover sur les pratiques usuelles. Il demeure toujours un risque associé à une mauvaise planification et/ou compréhension pouvant affecter l'intégrité de l'ouvrage ou bien l'échéancier d'exécution.

Il est pertinent de souligner que les deux innovations combinées (DME-01 et DME-02) créeront une enveloppe de bâtiment des plus performante dans un contexte de réduction des GES liés à la construction (Carbone intrinsèque) et ceux liés aux opérations du bâtiment (Carbone opérationnel). De plus, ces innovations ont un très fort potentiel de reproductibilité dans l'industrie, une réussite importante en phase avec les objectifs gouvernementaux de lutte contre les changements climatiques.

3.6 Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie

L'acceptation de nos demandes de mesures équivalentes auprès de la RBQ sur nos solutions innovantes ainsi que la démonstration de faisabilité vont permettre de faire avancer les initiatives sur l'intégration des éléments de bois dans les constructions des bâtiments. L'implication de différents spécialistes dans le projet Laforest-Québec assure une cohérence avec l'ensemble des initiatives visant l'intégration du bois dans les bâtiments, ce qui permet de viser un impact important dans l'industrie. La démocratisation de l'utilisation du bois massif pour les toits de bâtiment de plus de 2 étages combiné à l'intégration des murs extérieurs préfabriqués en ossature légère en bois concerne un très grand nombre de projets de construction au Québec et au Canada et engendra une augmentation majeure de l'intégration du bois dans l'industrie. Ces innovations intégrées dans les constructions de bâtiment de grande hauteur tel que Laforest-Québec auront un impact significatif sur l'industrie de l'immobilier et contribueront à rencontrer les objectifs de diminution des GES de par sa facilité de reproduction dans l'industrie. La vision des innovations proposées par Laforest-Québec est de faire l'usage des matériaux dans une composition mixte tels que le bois à l'endroit où ils auront le plus grand impact et valeur ajoutée, afin de maximiser l'utilisation dans l'industrie. Nous sommes d'avis que nos innovations deviendront un incontournable dans les futurs développements de bâtiments de grande hauteur.

3.7 Recommandations

À l'issu des conclusions de la présente étude, les recommandations qui suivent visent à identifier des pistes d'amélioration en lien avec les solutions innovantes proposées. Ces éléments pourront d'ailleurs faire partis de l'étude du volet B du projet Laforest-Québec dans l'étape subséquente de construction.

- Doter l'industrie de solution de préfabrication adaptée aux bâtiments de grande hauteur via des concertations entre les spécialistes de l'industrie du bois et les manufacturiers. Cette initiative permettrait de répondre plus facilement à une éventuelle demande de préfabrication dans les bâtiments de grande hauteur.
- Élaborer des essais avec des compositions de murs extérieurs testée conformément à la norme CAN/ULC-S134 qui répondent à des critères de performance énergétiques avancées. Cette initiative permettrait de rendre disponible des compositions de murs extérieurs plus performante.
- Modifier le code du bâtiment du Québec pour démocratiser l'utilisation du bois massif au dernier étage des bâtiments de grande hauteur en lien avec les demandes de mesure équivalente proposé par le projet Laforest-Québec.

4. Bibliographie

Code national du bâtiment – Canada 2015

https://publications.gc.ca/collections/collection_2019/cnrc-nrc/NR24-28-2018-fra.pdf

Code national du bâtiment – Canada 2020

https://publications.gc.ca/collections/collection_2022/cnrc-nrc/NR24-28-2020-fra.pdf

Bâtiment de construction massive en bois d'au plus 12 étages – Directives et guide explicatif

<https://www.rbq.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/Publications/francais/guide-construction-massive-bois-plus-12-etages.pdf>

Rapport d'essai A1-100035-01.5

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=bbc47a31-963d-4b21-8401-936de1ba03f4>

5. Annexes

- Annexe 1- Le rapport de simulation numériques de la modélisation d'incendie réalisé par Technorm

Annexe 1- Le rapport de simulation numériques de la modélisation d'incendie réalisé par Technorm

Rapport de simulations numériques – Modélisation d’incendie
Évaluation de la présence de bois apparent au 13^e étage du projet
La Forest-Québec

La Forest-Québec
3078-3070, chemin Saint-Louis, Québec (Québec)

230393-012

28 mars 2024, rév. 00

Préparé pour :
Groupe Statera inc



Préparé pour : Groupe Statera inc
8500, boulevard Décarie, suite 100
Mont-Royal (Québec) H4P 2N2

Préparé par : Technorm
5800, rue Saint-Denis, bureau 505
Montréal (Québec) H2S 3L5

Par :

Vérifié par :



Kseniia Polukhina, ing.
Conseillère technique
Codes et normes – Sécurité incendie



Marc-André Langevin, ing., M. Ing., M.Sc. A.
Président

Index des révisions

Nº	Date
00	2024-03-28
01	2025-02-17

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Portée du rapport	1
1.2	Limitations.....	1
1.3	Références	1
1.4	Objectif	2
2	DESCRIPTION DU PROJET	3
3	COMPARAISONS ENTRE LA SOLUTION DE RECHANGE ET LA SOLUTION ACCEPTABLE	4
3.1	Solution de rechange.....	4
3.2	Solution acceptable	6
3.3	Caractéristiques des matériaux	8
3.3.1	Panneau de contreplaqué en pin du Sud.....	8
3.3.2	Panneau de plaque de plâtre de type X.....	8
3.3.3	Bois lamellé-collé	9
3.3.4	Panneaux de bois lamellé-croisé.....	10
4	SCÉNARIOS D'INCENDIE	11
4.1	Emplacement.....	11
4.2	Positionnement du foyer d'incendie.....	12
4.3	Profil d'incendie	14
4.4	Répertoire des simulations	16
5	CRITÈRES COMPARATIFS.....	18
6	RÉSULTATS	19
6.1	Gymnase.....	19
6.2	Piscine	21
6.3	Salle communautaire	23
6.4	Espace <i>coworking</i>	25
6.5	Logement A	26
6.6	Logement B	28
7	CONCLUSION.....	31

1 INTRODUCTION

La présente fait état des résultats de nos recherches, analyses et modélisations numériques en ce qui a trait à la propagation d'incendie au 13^e étage du futur projet La Forest-Québec (La Forest dans la suite du texte).

1.1 Portée du rapport

Technorm a été mandatée par le Groupe Statera inc pour réaliser des simulations d'incendie au moyen du logiciel *Fire Dynamics Simulator* (FDS – v.6.8.0.) afin d'évaluer l'impact de la contribution de bois apparent à l'intérieur de plusieurs suites situées au 13^e étage du bâtiment en question, lors d'un incendie considéré comme étant réaliste comparativement à la solution acceptable du CNB 2015 mod. Qc.

L'analyse tient compte de la charge combustible prévue, de l'emplacement des gicleurs automatiques, de la géométrie des espaces concernés, y compris la hauteur réelle entre les foyers d'incendie probables et les éléments combustibles de construction massive en bois, soit le toit en gros bois d'œuvre et ses éléments porteurs en gros bois d'œuvre.

1.2 Limitations

Les résultats présentés ci-après sont représentatifs des scénarios d'incendie qui prennent en considération une architecture et des charges combustibles (scénarios d'incendie) spécifiques. Toute modification à l'architecture, à la structure, à l'usage et aux équipements (c.-à-d. charges combustibles) proposés pourrait engendrer des différences au niveau des résultats calculés. Les plans architecturaux pour la conception du modèle sont ceux de la firme *Régis*, émis pour coordination en date du 1^{er} mars 2024.

Ce rapport est spécifique pour les conditions et paramètres du bâtiment sous étude. En aucun temps les résultats ne peuvent être utilisés pour un autre projet ou bâtiment puisque les résultats des simulations numériques vont différer. Technorm ne sera pas tenu responsable de quelconque façon si un tiers utilise les résultats obtenus et présentés dans ce rapport pour un autre édifice.

1.3 Références

Ce rapport est basé sur les plans transmis et les informations communiquées, notamment :

- le plan de structure du 13^e étage émis pour coordination 30 % le 3 octobre 2023, reçu le 1 février 2024, préparé par *EMS*;
- les plans de structure émis pour coordination 30 % le 3 octobre 2023, reçus le 22 mars 2024, préparé par *EMS*;
- les dessins architecturaux émis pour coordination le 16 février 2024, reçus le 16 février 2024, préparés par *Régis*;
- les dessins architecturaux émis pour coordination le 1 mars 2024, reçus le 8 mars 2024, préparés par *Régis*;

- le croquis illustrant la position des gicleurs reçu le 29 février 2024, préparé par CBTEC.

1.4 Objectif

Le but de cette étude est d'analyser le développement d'incendie et la propagation des flammes lors de scénarios probables à l'intérieur des logements et des locaux communs qui se trouvent au 13^e étage du futur projet La Forest-Québec pour lequel une construction incombustible est requise.

L'étude vise à déterminer s'il est possible de conserver une construction massive en bois apparent pour la toiture et les éléments porteurs du 13^e étage.

Nous procédons à la modélisation de scénarios d'incendie dont les paramètres respectent les solutions acceptables du Code, et nous les comparons avec des scénarios d'incendie identiques pour lesquels le 13^e étage du projet la Forest présente les caractéristiques de la solution de rechange.

2 DESCRIPTION DU PROJET

Le projet La Forest-Québec sera de construction hybride, plus précisément, les sous-sols et les niveaux rez-de-chaussée à 12 seront de construction incombustible, tandis que la structure du toit du niveau 13 sera de construction massive en bois. Le bâtiment comprendra deux (2) tours à partir du niveau 8. Pour les fins du présent rapport nous les désignons comme *tour gauche* et *tour droite*.

Les éléments structuraux combustibles apparents sont présents dans les endroits suivants (Figure 1) :

- Tour gauche :
 - gymnase;
 - piscine;
 - salle communautaire;
 - espace co-working.
- Tour droite :
 - huit (8) logements;
 - salle communautaire.

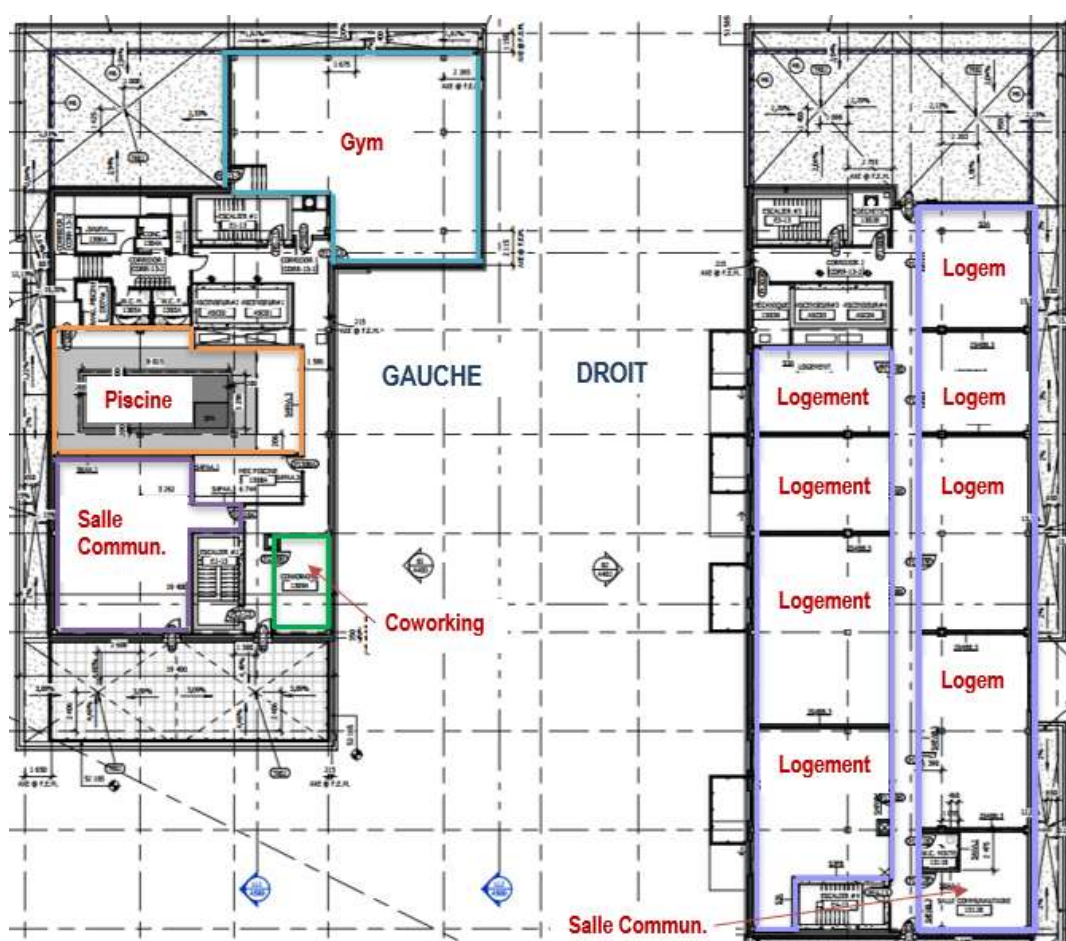


Figure 1 : Emplacements de construction de bois apparent

3 COMPARAISONS ENTRE LA SOLUTION DE RECHANGE ET LA SOLUTION ACCEPTABLE

Pour chaque scénario d'incendie, deux configurations ont été analysées : une qui représente la solution proposée (désignée ici comme une solution de rechange), et l'autre, la solution acceptable. Les principales différences entre ces deux configurations sont décrites dans les sous-sections suivantes.

3.1 Solution de rechange

La configuration de la solution de rechange représente le concept architectural et structural actuellement proposé.

Au 13^e étage, la structure en bois massif est composée de poutres et de colonnes en bois lamellé-collé qui supportent le toit et sera soit en panneaux de bois lamellé-croisé ou en placage de bois lamellé-collé. L'essence de bois des éléments structuraux, y compris le platelage, est l'épinette-pin-sapin.

Le concept architectural prévoit de recouvrir certaines colonnes et une partie du plafond des logements de panneaux de plaque de plâtre. L'emplacement du revêtement du plafond et des colonnes encapsulées est présenté à la Figure 4 pour la tour gauche et à la Figure 5 pour la tour droite.

Aucun revêtement de finition combustible n'est prévu pour les cloisons.

Les éléments structuraux combustibles de la solution de rechange, tels qu'ils ont été prévus et modélisés, sont illustrés à la Figure 2 et la Figure 3.

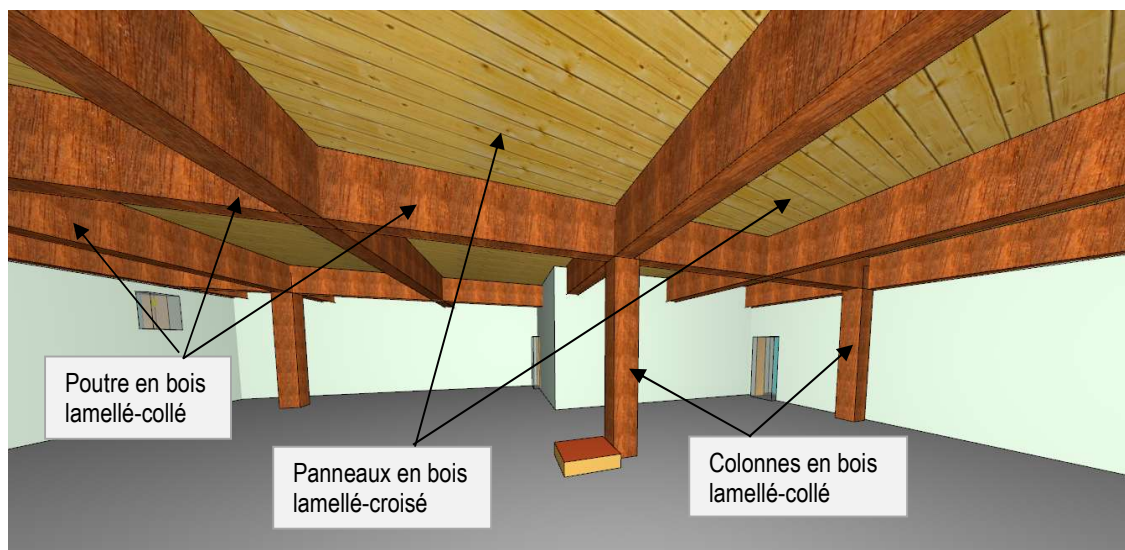


Figure 2 : Extrait du modèle numérique du gym : configuration de la solution de rechange

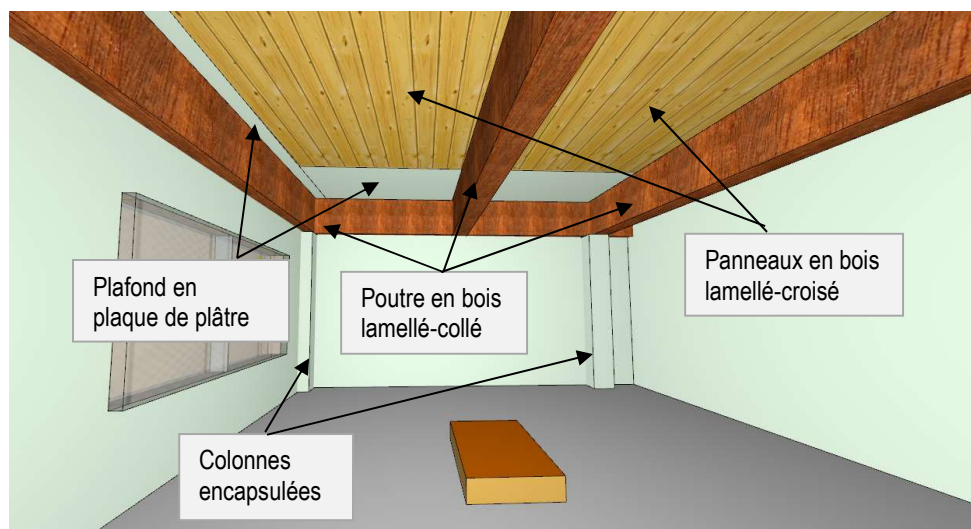


Figure 3 : Extrait du modèle numérique du logement B : configuration de la solution de rechange

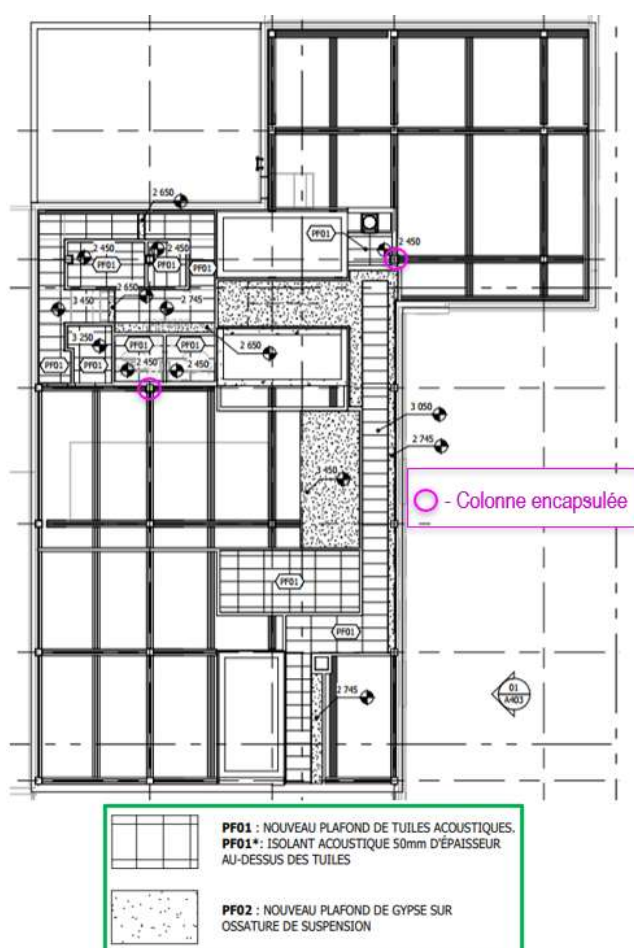


Figure 4 : Revêtement du plafond et colonnes encapsulées : tour gauche



Figure 5 : Revêtement du plafond et colonnes encapsulées : tour droite

3.2 Solution acceptable

La configuration de la solution acceptable représente un concept conforme à la sous-section 3.1.5. du CNB 2015 mod. Qc.

Dans le modèle de la solution acceptable, l'ensemble (100 %) des murs et des cloisons, y compris la surface exposée des colonnes, ainsi que 10 % de la surface du plafond (toit) sont recouverts d'un revêtement intérieur de finition combustible ayant une épaisseur d'au plus 25 mm et un indice de propagation de la flamme d'au plus 150.

Nous avons choisi d'utiliser un panneau de contreplaqué de 24 mm en pin du Sud (*Southern Pine*) comme revêtement intérieur combustible et un panneau en plaque de plâtre de type X de 15,9 mm d'épaisseur comme revêtement intérieur incombustible.

Mentionnons que l'indice de propagation de la flamme n'est pas considéré comme tel dans notre analyse, puisque le logiciel utilisé (FDS) ne prend pas en considération ce paramètre qui n'est pas une

caractéristique fondamentale des matériaux (c.-à-d. qu'il s'agit d'une valeur non dimensionnelle calculée par la norme ULC-S102 et basée sur le chêne rouge = 100 et l'amiante = 0).

Les revêtements de finition combustibles de la solution acceptable tels qu'ils ont été modélisés sont illustrés à la Figure 6 et à la Figure 7.

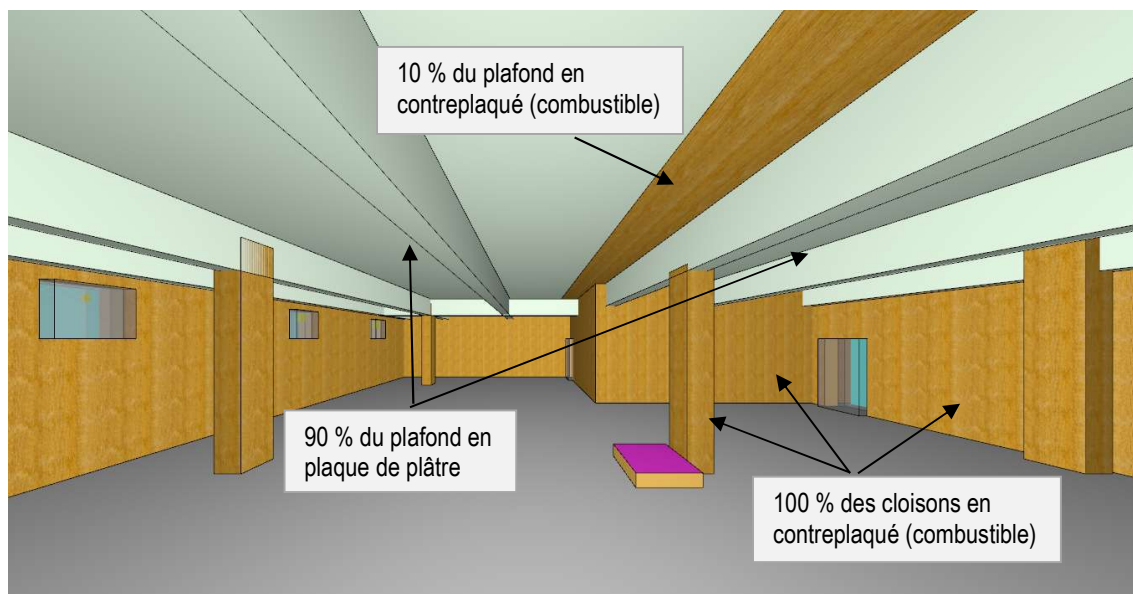


Figure 6 : Extrait du modèle numérique du gymnase : configuration de la solution acceptable

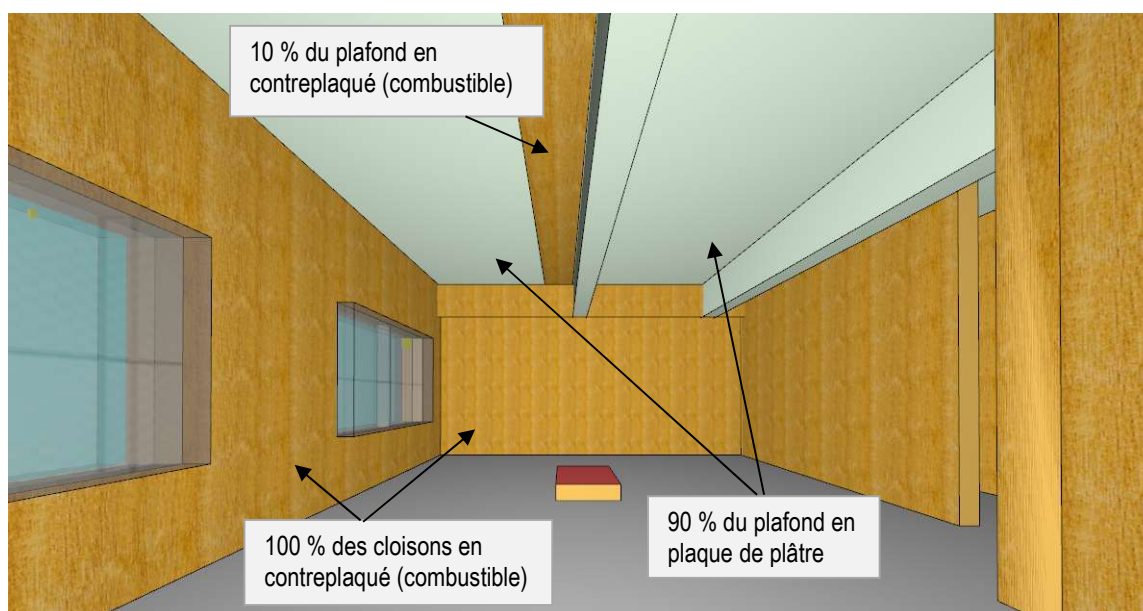


Figure 7 : Extrait du modèle numérique du logement B : configuration de la solution acceptable

3.3 Caractéristiques des matériaux

3.3.1 Panneau de contreplaqué en pin du Sud

La température d'allumage des panneaux de contreplaqué en pin du Sud est de 323 °C selon les essais de Dietenberger, M. et al. (1999)¹.

Pour considérer la contribution énergétique de ce matériau, nous avons utilisé les données d'essais trouvées sur le site Web du *Forest Product Laboratory*². La contribution énergétique d'un panneau de contreplaqué en pin du Sud de 24 mm exposé à une source radiante de 50 kW/m² est illustrée à la Figure 8.

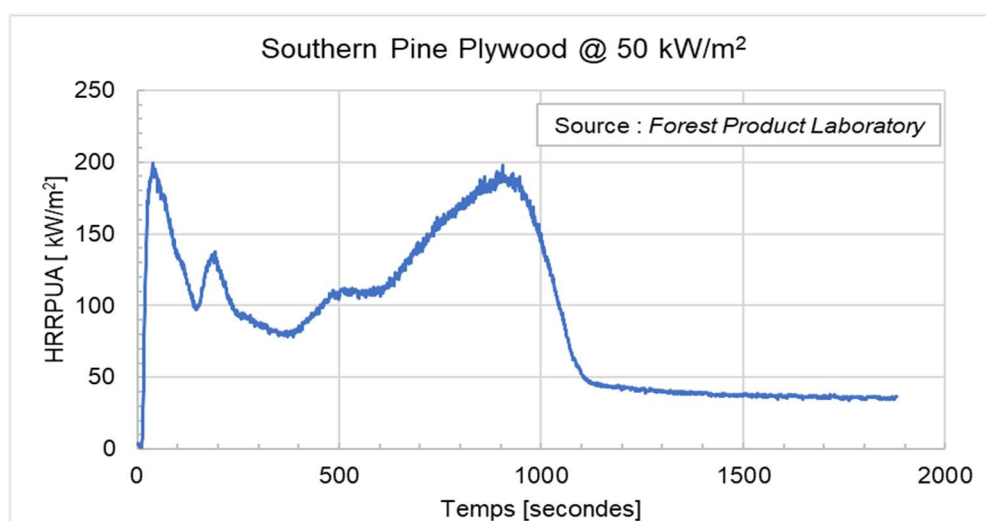


Figure 8 : Contribution énergétique de 24 mm d'un panneau de contreplaqué en pin du Sud

3.3.2 Panneau de plaque de plâtre de type X

La température d'allumage d'un panneau de plaque de plâtre de type X est de 335 °C, selon le tableau 18-2 du *Wood Handbook*³.

Pour considérer la contribution énergétique de ce matériau, nous avons utilisé les données d'essais trouvées sur le site Web du *Forest Products Laboratory*. La contribution énergétique d'un panneau de plaque de plâtre de type X de 15,9 mm exposé à une source radiante de 50 kW/m² est illustrée à la Figure 9.

¹ Dietenberger, M. & Grexa, O. (1999). *Analytical Model of Flame Spread in Full-Scale Room/Corner Tests (ISO 9706)*.

² Forest Products Laboratory. *Cone Calorimeter Datasets – Publications and Datasets*, USDA Forest Service, 20 juillet 2005; consulté le 25 février 2022, à l'adresse https://www.fpl.fs.fed.us/products/products/cone/by_materials.php.

³ Forest Products Laboratory, F. P. (2013). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*.

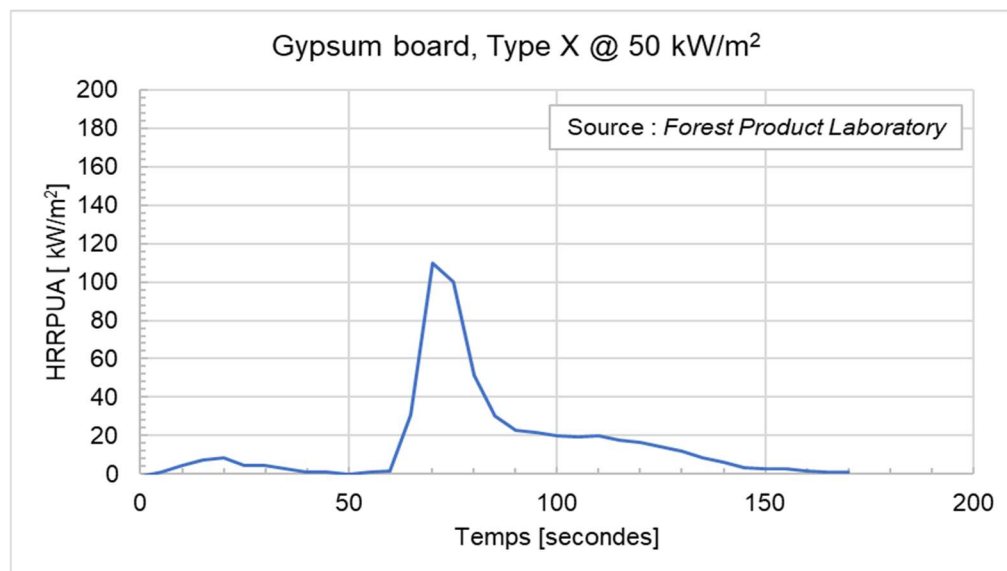


Figure 9 : Contribution énergétique d'un panneau de plaque de plâtre de type X de 15,9 mm

3.3.3 Bois lamellé-collé

L'essence de bois d'épinette noire est considérée pour les poutres et les colonnes en lamellé-collé. Pour nos modélisations, nous avons utilisé les données d'essais de l'essence de bois d'épinette noire (*Black Spruce*) fournies par *FP Innovations* pour ces éléments structuraux massifs en bois.

La température d'allumage de l'épinette noire est de 343 °C. La contribution énergétique de 38 mm d'épinette noire exposée à une source radiante de 50 kW/m² est illustrée à la Figure 10.

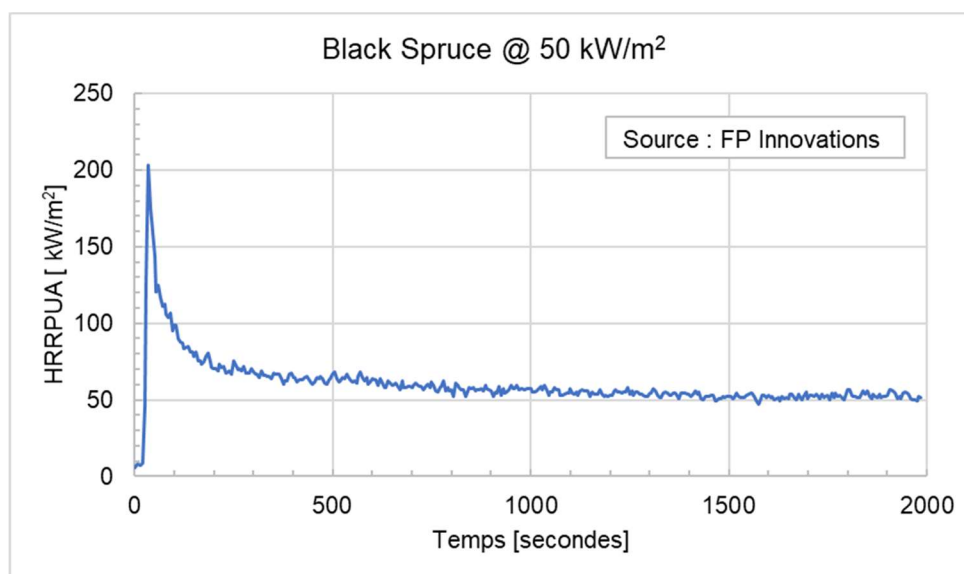


Figure 10 : Contribution énergétique de 38 mm d'épinette noire

3.3.4 Panneaux de bois lamellé-croisé

Pour nos modélisations, nous avons utilisé les données d'essais des panneaux de bois lamellé-croisé (CLT) fournies par *FP Innovations* pour ces éléments structuraux massifs en bois. Les panneaux testés par *FP Innovations* étaient de l'essence épinette noire.

La température d'allumage de l'épinette noire est de 343 °C. La contribution énergétique d'un échantillon ayant des dimensions de 100 mm x 100 mm x 80 mm exposé à une source radiante de 50 kW/m² est illustrée à la Figure 11.

Puisque le graphique illustré à la Figure 11 n'est sensiblement pas différent de celui illustré à la Figure 10, nous pouvons conclure que la configuration de l'élément (lamelle-croisé vs lamellé-collé) ou l'épaisseur de l'échantillon testé n'ont pas d'impact sur la contribution énergétique du matériau. Le paramètre le plus important est l'essence de bois. Il est donc justifiable de considérer que la contribution énergétique des panneaux de bois lamellé-croisé est similaire à celle du platelage de bois lamellé-collé.

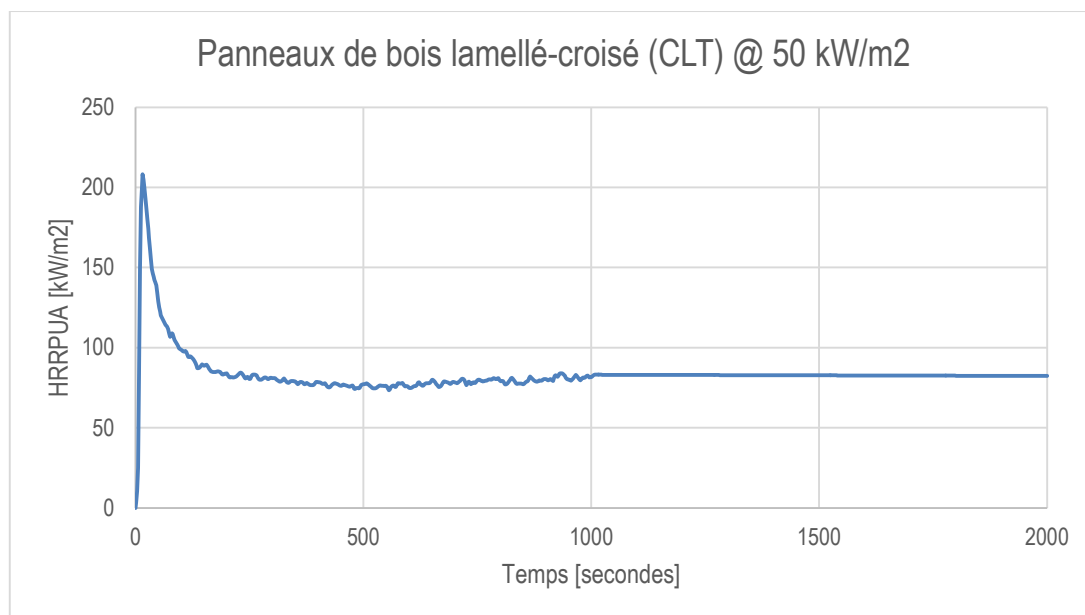


Figure 11 : Contribution énergétique des panneaux de bois lamellé-croisé de 80 mm d'épaisseur.

4 SCÉNARIOS D'INCENDIE

Pour les fins de l'analyse comparative, les mêmes scénarios d'incendie sont examinés pour les configurations de la solution de rechange et de la solution acceptable.

4.1 Emplacement

En termes de la géométrie des espaces, nous avons modélisé les quatre (4) pièces de la tour gauche avec le bois massif apparent, soit le gymnase, la piscine, la salle communautaire et l'espace coworking (Figure 1). Pour la tour droite, nous avons modélisés deux (2) configurations de logement type, soit un petit logement de type studio (logement A) et un grand logement avec deux (2) chambres (logement B) (Figure 12).

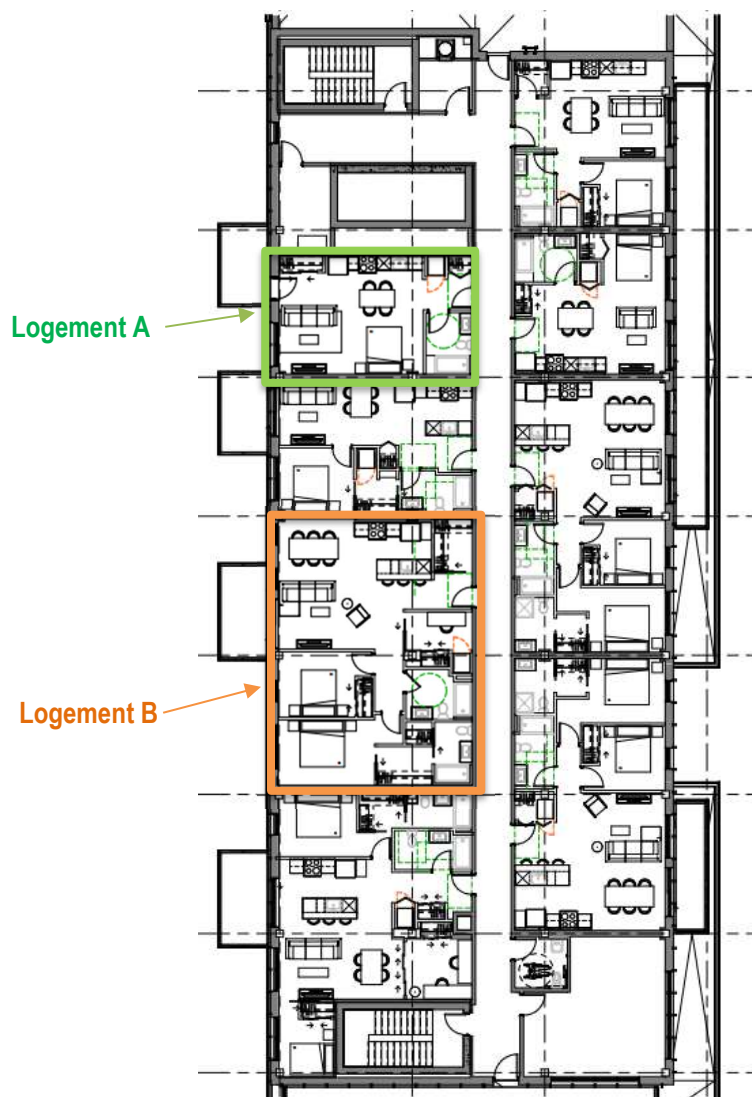


Figure 12 : Logement A et logement B.

4.2 Positionnement du foyer d'incendie

Pour chaque espace modélisé, deux (2) emplacements du foyer d'incendie ont été analysés :

- emplacement CR : au centre;
- emplacement CN : dans le coin.

Pour le logement B, un emplacement additionnel a été évalué, soit l'incendie dans un coin de chambre (emplacement CHB) (Figure 13).

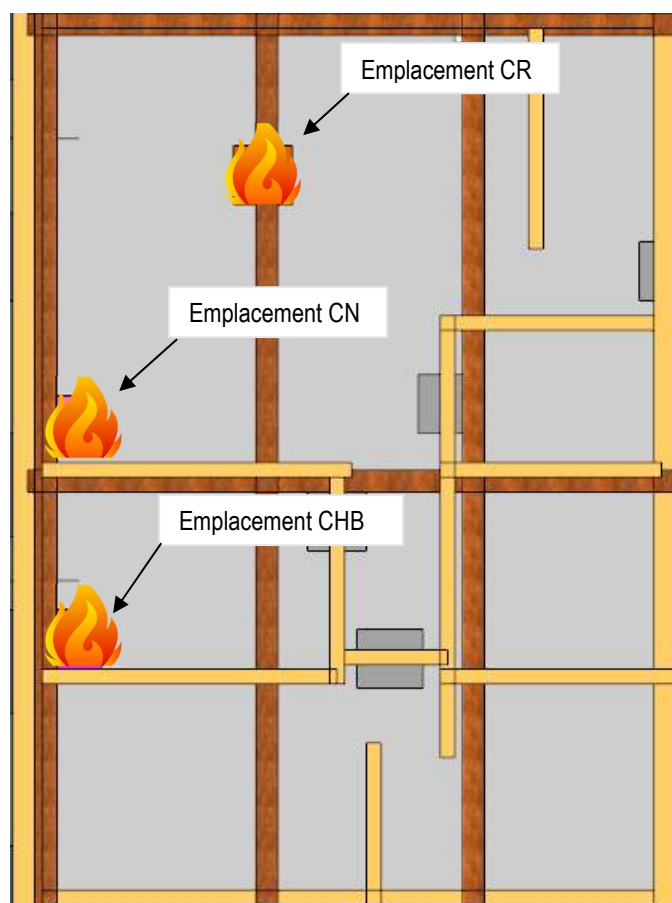


Figure 13 : Extrait du modèle numérique du logement B : emplacements du foyer d'incendie

Pour la solution acceptable, le foyer d'incendie est modélisé directement en dessous de la section du plafond revêtu du contreplaqué (10 % de la surface). Tandis que pour la solution de rechange, le foyer d'incendie est modélisé adjacent à une colonne de bois lamellé-collé.

Dans la piscine, la surface du plancher pouvant avoir des combustibles est limitée, car la majorité de la surface de cette pièce est occupée par une piscine. Pour ce scénario, l'emplacement central (CR) ne se trouve pas exactement au centre de la pièce, mais près d'une colonne à bord de la piscine (Figure 14). Le dégagement par rapport au mur est plus petit que dans tous les autres scénarios.

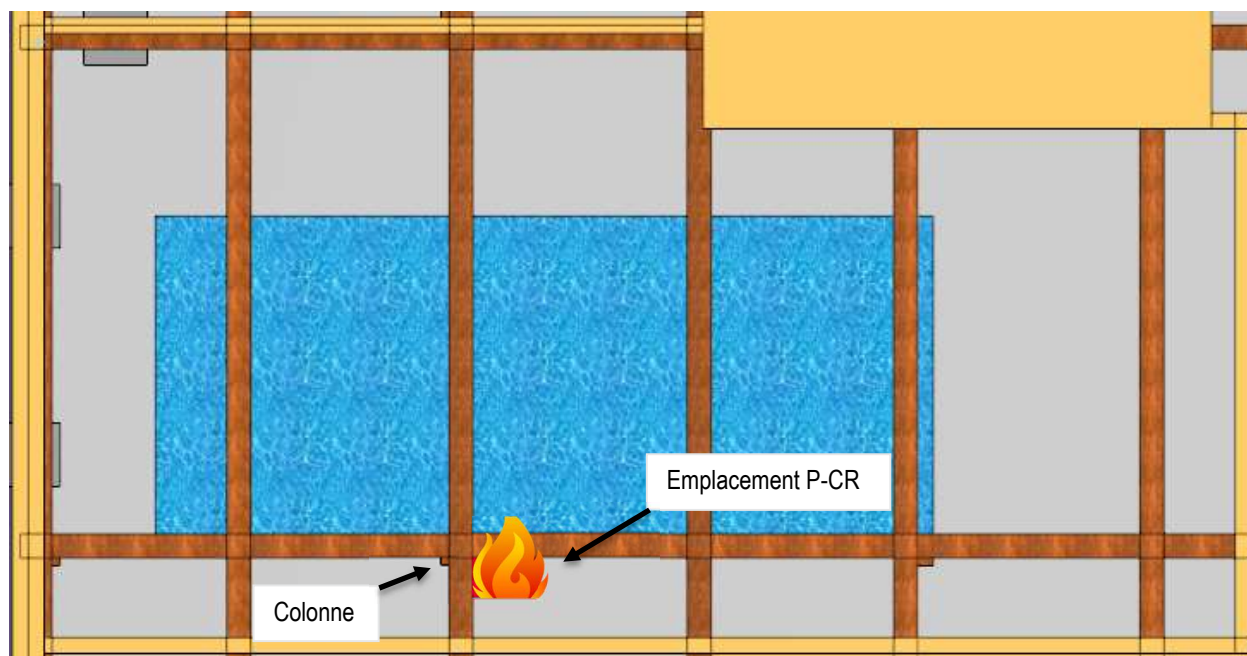


Figure 14 : Extrait du modèle numérique de la piscine : emplacements CR (centre)

Dans tous les cas, le foyer d'incendie se trouve, sur le plan, à la distance maximale possible des gicleurs. Une telle configuration permet de retarder le déclenchement de gicleurs et donc, d'obtenir des résultats conservateurs. Ceci est illustré à la Figure 15.

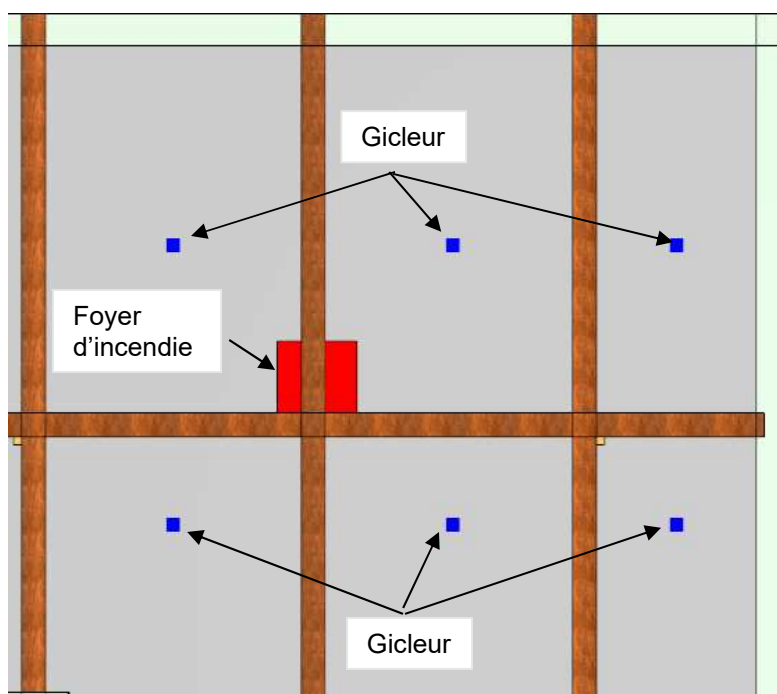


Figure 15 : Extrait du modèle numérique : Emplacement du foyer d'incendie et des gicleurs

4.3 Profil d'incendie

Compte tenu de la diversité des éléments combustibles pouvant être présents dans les logements et les espaces communs, le profil d'incendie générique de type t^2 -fire sera employé, soit un incendie hypothétique, dont la puissance (débit calorifique) à chaque instant est calculée avec l'équation suivante :

$$Q = \alpha \cdot t^2$$

Où : α = taux d'accroissement (kW/s^2)

t = temps (s)

Il s'agit d'un type d'incendie typique pour les usages non industriels dont la charge combustible ne comprend pas de quantités importantes de matières inflammables. Le développement d'un incendie de type t^2 -fire est graduel. La différence entre les profils d'incendie considérés est la vitesse de développement de l'incendie, représentée par le paramètre désigné comme le taux d'accroissement (α). Le taux d'accroissement **rapide** est retenu pour l'étude.

Vous trouverez ci-dessous une illustration tirée d'un ouvrage publié par John H. Klote (*Puissance de différents combustibles vs croissance (αt^2)*)⁴, dans laquelle sont présentés différents exemples de taux d'accroissement d'incendie qui représentent ce à quoi correspondent les différents taux d'accroissement.

En présence de gicleurs automatiques, la croissance d'incendie n'est pas illimitée, mais elle est contrôlée⁵. L'*International Building Code* (2018) stipule que la puissance de l'incendie peut être jugée comme étant constante dès qu'il y a déclenchement des gicleurs automatiques [IBC-2018, art. 909.9.4.].

Le profil d'incendie prévu comprend donc deux (2) phases, soit :

- la phase de croissance jusqu'à la valeur maximale du débit calorifique;
- la phase constante ou « plateau ».

La phase de décroissement sera omise.

Le débit calorifique maximal est la puissance d'incendie nécessaire pour déclencher le système de gicleurs. Le débit calorifique maximal est établi à partir des résultats des simulations en fonction de l'emplacement du foyer d'incendie, de la hauteur entre les gicleurs et le plancher, du positionnement des gicleurs entre les poutres et de la cote de température des gicleurs. Le temps de déclenchement des gicleurs est le même pour la solution de rechange et la solution acceptable.

Le plan d'emplacement des gicleurs a été fourni par l'ingénieur en sécurité incendie du projet. Les gicleurs projetés sont à déclenchement rapide (RTI 50) avec la cote de température (c.-à-d. température d'activation) de 68 °C.

Les profils d'incendie retenus pour l'analyse comparative sont illustrés ci-dessous (Figure 16 et Figure 17). Lorsque le foyer d'incendie se trouve près d'une obstruction verticale, comme dans un coin, les pertes de chaleur sont quelque peu réduites et, par conséquent, les gicleurs se déclenchent plus

⁴ John H. Klote. *DESIGN FIRES: What You Need to Know*, HPAC Engineering, Sept. 2002.

⁵ NFPA Handbook, 20^e éd., section 16, chapitre 3.

rapidement. Pour l'ensemble des simulations, le dégagement de chaleur du foyer d'incendie est compris entre 180 et 450 kW.

Les dimensions du foyer d'incendie sont choisies de façon à ce que le débit calorifique par mètre carré soit compris entre 500 et 700 kW/m².

La durée totale d'incendie de départ (des deux phases) est de 2 heures. Toutefois, nous avons arrêté les simulations avant si l'état stationnaire est atteint.

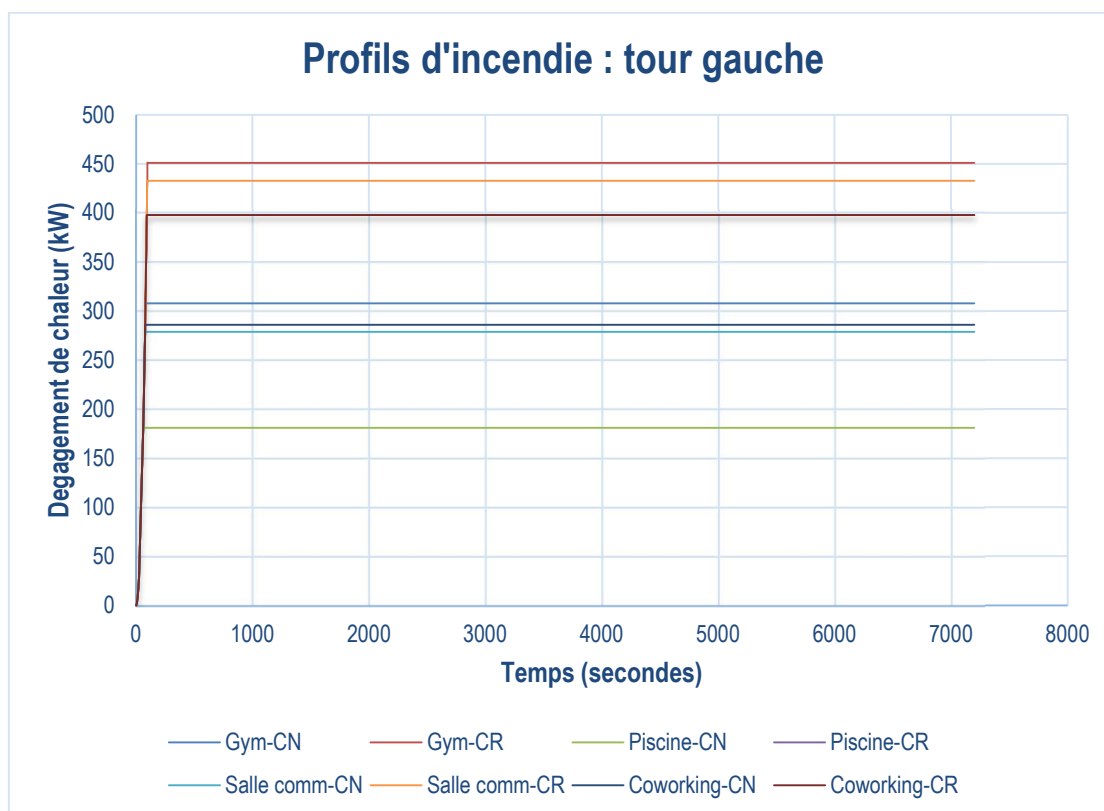


Figure 16 : Profils d'incendie dans les espaces de la **tour gauche** retenus pour l'analyse comparative

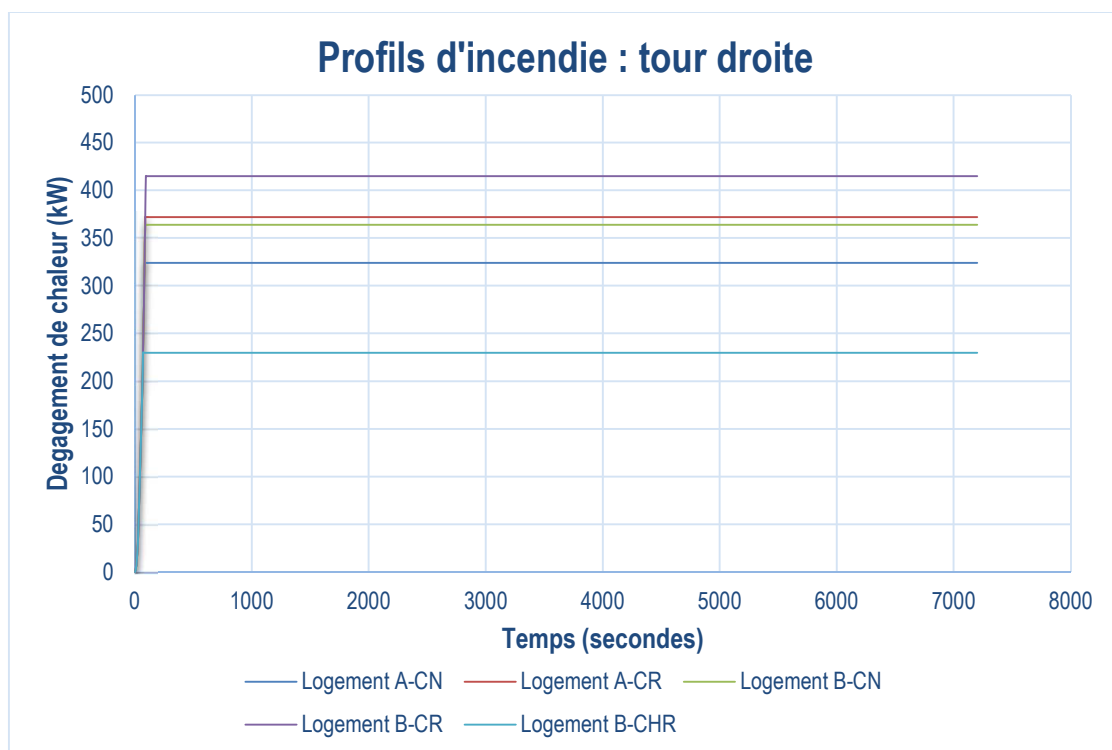


Figure 17 : Profils d'incendie dans les espaces de la **tour droite** retenus pour l'analyse comparative

4.4 Répertoire des simulations

Le tableau ci-dessous dresse la liste des principaux scénarios d'incendie et des variables qui lui sont associées. Au total, nous avons effectué 26 simulations numériques.

N°	ID	Configuration	Foyer d'incendie		Emplacement
			Positionnement	Puissance max.	
1	G-CN-RECH	Solution de rechange	Dans le coin	310 kW	Gym
2	G-CN-ACC	Solution acceptable			
3	G-CR-RECH	Solution de rechange	Au centre	450 kW	
4	G-CR-ACC	Solution acceptable			
5	P-CN-RECH	Solution de rechange	Dans le coin	180 kW	Piscine
6	P-CN-ACC	Solution acceptable			
7	P-CR-RECH	Solution de rechange	Au centre	400 kW	
8	P-CR-ACC	Solution acceptable			

N°	ID	Configuration	Foyer d'incendie		Emplacement
			Positionnement	Puissance max.	
9	SC-CN-RECH	Solution de rechange	Dans le coin	280 kW	Salle communautaire
10	SC-CN-ACC	Solution acceptable			
11	SC-CR-RECH	Solution de rechange	Au centre	430 kW	
12	SC-CR-ACC	Solution acceptable			
13	CW-CN-RECH	Solution de rechange	Dans le coin	290 kW	Espace coworking
14	CW-CN-ACC	Solution acceptable			
15	CW-CR-RECH	Solution de rechange	Au centre	400 kW	
16	CW-CR-ACC	Solution acceptable			
17	LA-CN-RECH	Solution de rechange	Dans le coin	330 kW	Logement A
18	LA-CN-ACC	Solution acceptable			
19	LA-CR-RECH	Solution de rechange	Au centre	370 kW	
20	LA-CR-ACC	Solution acceptable			
21	LB-CN-RECH	Solution de rechange	Dans le coin	370 kW	Logement B
22	LB-CN-ACC	Solution acceptable			
23	LB-CR-RECH	Solution de rechange	Au centre	420 kW	
24	LB-CR-ACC	Solution acceptable			
25	LB-CHB-RECH	Solution de rechange	Dans la chambre (coin)	230 kW	
26	LB-CHB-ACC	Solution acceptable			

Tableau 1 : Répertoire des scénarios d'incendie modélisés

5 CRITÈRES COMPARATIFS

Le développement d'un incendie prenant naissance à l'intérieur d'une pièce peut être divisé en cinq (5) phases qui pourraient ne pas toutes survenir, selon la présence ou l'absence des diverses conditions⁶. Ces cinq (5) phases sont les suivantes :

1. allumage;
2. croissance;
3. embrasement;
4. incendie pleinement développé;
5. décroissance.

Les deux premières étapes d'un incendie ne sont pas dommageables pour la structure du bâtiment, mais peuvent devenir problématiques pour les occupants. Généralement, seuls des dommages thermiques aux objets par la fumée et par la suie se manifestent au cours de cette période. À ce stade, l'incendie est relativement petit et les températures relativement basses. S'il y a suffisamment d'apports d'air frais (oxygène) et de combustible, les phases subséquentes de l'incendie peuvent se produire.

La troisième phase est l'une des plus critiques dans tout incendie à l'intérieur d'un compartiment. Il s'agit de l'**embrasement général**. Un embrasement se traduit par une très haute température au niveau du plafond ($\approx 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) et une importante radiation vers le plancher d'environ 20 kW/m^2 ^{7,8}. À ce moment, **tous les éléments combustibles** à l'intérieur du compartiment s'allument, compte tenu des conditions ambiantes extrêmes. Lors de l'embrasement général, les caractéristiques de combustion superficielle des matériaux des murs et des plafonds entrent en considération et l'on constate que les flammes sortent par les fenêtres pour aller « chercher » de l'oxygène à l'extérieur du compartiment.

La quatrième phase est celle d'un **incendie pleinement développé** à l'intérieur du compartiment. Cette phase de l'incendie est la plus destructrice et la plus dommageable à la construction et à la structure de l'immeuble, puisque les températures peuvent atteindre plus de $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans certains cas.

Finalement, après un certain temps, le combustible commence à manquer à l'intérieur du compartiment et il s'ensuit une décroissance de l'incendie.

Dans la présente étude, nous allons principalement nous concentrer sur la comparaison, entre la solution proposée et la solution acceptable, du temps requis pour atteindre les phases 3 et 4, soit l'**embrasement général** et l'**incendie pleinement développé** dans le compartiment, sous réserve que ces phases soient atteintes.

⁶ Walton, W. D., & Thomas, T. H. (2002). *SFPE Handbook of fire protection engineering*, 3rd edition, Chapter 6 – Section 3, "Estimating temperatures and compartment fires."

⁷ Drysdale, D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*.

⁸ Cluster, R. (2008). *NFPA Fire Protection Handbook*, 20th edition, Chapter 4 – Section 2, "Dynamics of compartment fire growth."

6 RÉSULTATS

La présente sous-section vise à comparer la solution acceptable à la solution de rechange pour ce qui est du développement de l'incendie et de la propagation des flammes à l'intérieur de six (6) pièces situées au niveau 13 du futur projet La Forest.

Comme mentionné plus haut, nous allons principalement nous concentrer sur la comparaison du temps requis pour atteindre l'embrasement général et le stade d'incendie pleinement établi, sous réserve que ces phases soient atteintes.

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques présentant la variation du débit calorifique (chaleur dégagée) dans le temps. Sauf indication contraire, la valeur maximale de l'axe vertical est de 20 000 kW (20 MW). Une telle uniformité permet d'apercevoir l'ampleur de l'incendie pour l'ensemble des scénarios simulés.

6.1 Gymnase

Le développement d'incendie dans le gymnase, selon les résultats de nos simulations numériques, est illustré :

- à la Figure 18, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé dans le coin de lu gymnase (G-CN-Rech vs G-CN-Acc);
- à la Figure 19, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé au centre du gymnase (G-CR-Rech vs G-CR-Acc).

Dans tous les cas, le foyer d'incendie est modélisé adjacent à une colonne de bois apparent de la solution de rechange.

Pour les scénarios d'incendie dans le gymnase de la **solution de rechange**, la propagation des flammes est modérée, peu importe le positionnement du foyer d'incendie. Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans le coin (Figure 18, en bleu), les flammes se propagent sur la colonne du coin et dans un secteur du toit de bois et de poutres à proximité du foyer d'incendie. Le débit calorifique maximal est d'environ 3 500 kW (3,5 MW). La puissance d'incendie de départ est multipliée par 10 fois.

Lorsque le foyer d'incendie est situé au centre (Figure 19, en bleu), uniquement la colonne adjacente est impliquée dans l'incendie. Le débit calorifique maximal est d'environ 1 000 kW (1 MW), ceci représente l'augmentation de 500 kW par rapport à la puissance d'incendie de départ.

Pour les scénarios d'incendie dans le gymnase de la **solution acceptable**, peu importe le positionnement du foyer d'incendie, l'incendie se propage à travers le compartiment en éclatant la majorité des fenêtres. Par conséquent, les conditions de l'embrasement général sont atteintes. Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans le coin (Figure 18, en rouge), le débit calorifique maximal est d'environ 13 000 kW (13 MW), soit **quatre (4) fois supérieur** à celui de la solution de rechange.

Lorsque le foyer d'incendie est situé au centre (Figure 19, en rouge), le débit calorifique maximal est d'environ 15 000 kW (15 MW), soit **15 fois supérieur** à celui de la solution de rechange.

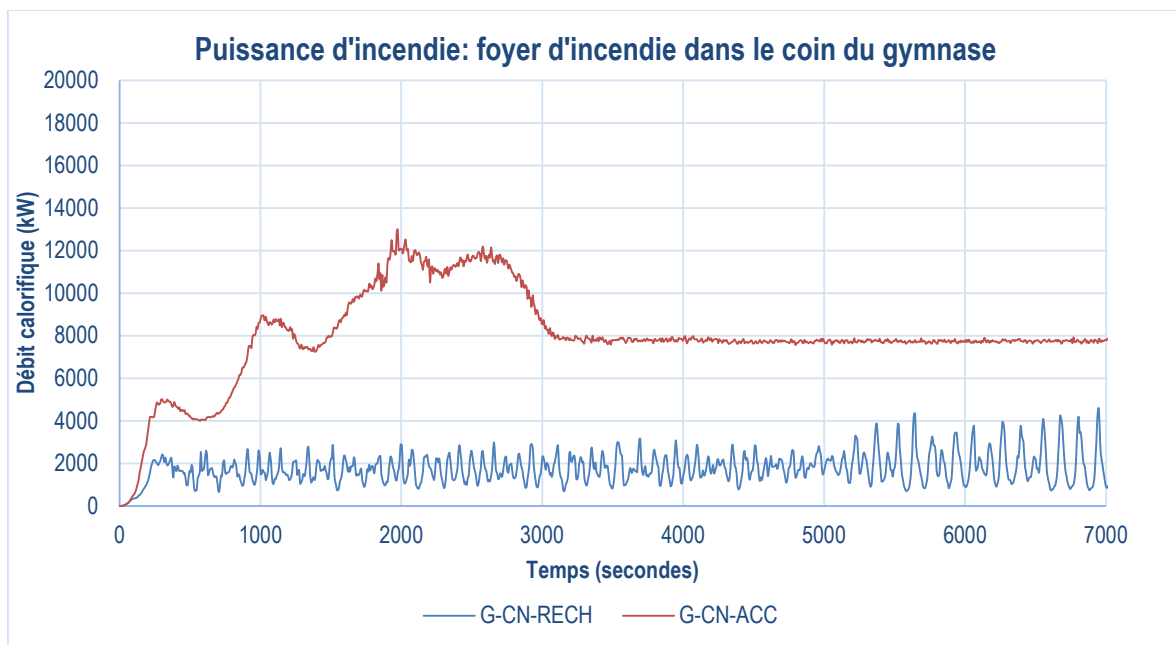


Figure 18. Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans le **coin** du gymnase

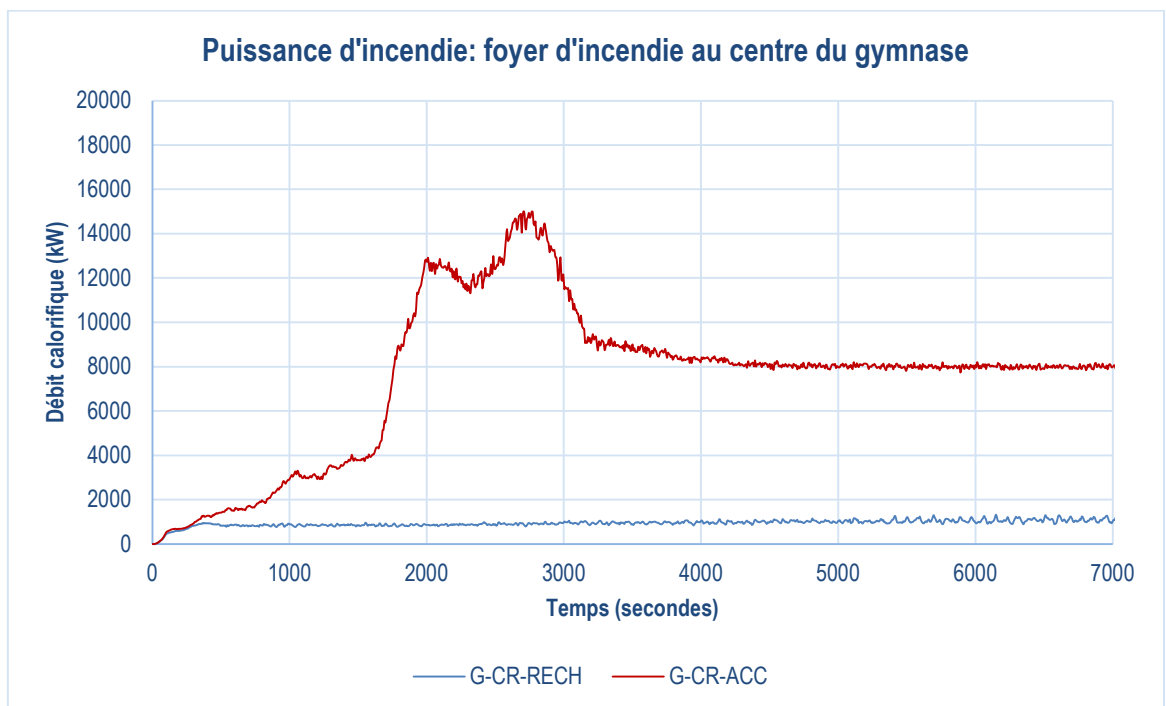


Figure 19 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé **au centre** du gymnase

6.2 Piscine

Le développement d'incendie dans la piscine selon les résultats de nos simulations numériques est illustré :

- à la Figure 20, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé dans le coin de la piscine (P-CN-Rech vs P-CN-Acc);
- à la Figure 21, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé au centre de la piscine (P-CR-Rech vs P-CR-Acc).

Dans tous les cas, le foyer d'incendie est modélisé adjacent à une colonne de bois apparent de la solution de rechange.

Pour les scénarios d'incendie dans la Piscine de la **solution de rechange**, la propagation des flammes est modérée lorsque l'incendie se déclenche dans le coin, et quasi inexistante lorsque le foyer d'incendie est positionné près de la colonne à bord de la piscine. Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans le coin (Figure 20, en bleu), les flammes se propagent sur la colonne du coin et un secteur du toit de bois compris entre le mur et la poutre la plus proche. Le débit calorifique maximal est d'environ 2 000 kW (2 MW). La puissance d'incendie de départ est multipliée par 10 fois.

Lorsque le foyer d'incendie est situé au centre (Figure 21, en bleu), uniquement la partie inférieure de la colonne adjacente est impliquée dans l'incendie. Le débit calorifique maximal est d'environ 500 kW (0,5 MW), ceci représente l'augmentation de seulement 100 kW par rapport à la puissance d'incendie de départ.

Pour les scénarios d'incendie dans la Piscine de la **solution acceptable**, peu importe le positionnement du foyer d'incendie, l'incendie se propage à travers le compartiment. Le développement de l'incendie est limité par la ventilation disponible, car la piscine comporte seulement deux (2) fenêtres. Pour les deux (2) scénarios d'emplacement du foyer d'incendie, le débit calorifique maximal est d'environ 8 000 kW (8 MW), soit **quatre (4) fois supérieur** à celui de la solution de rechange pour le feu au centre et **16 fois supérieur** à celui de la solution de rechange pour le feu au centre.

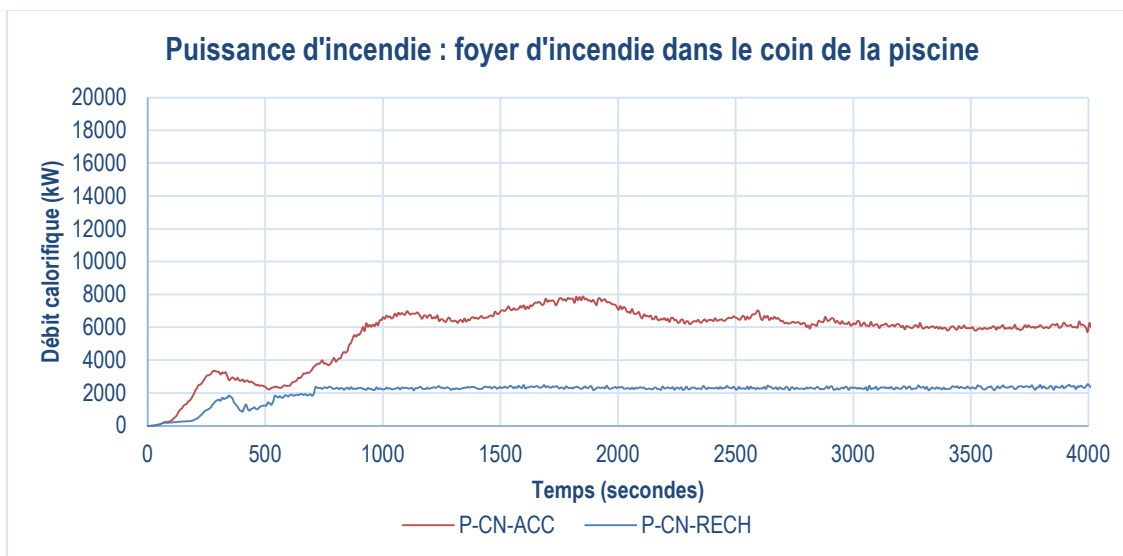


Figure 20 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans le coin de la piscine

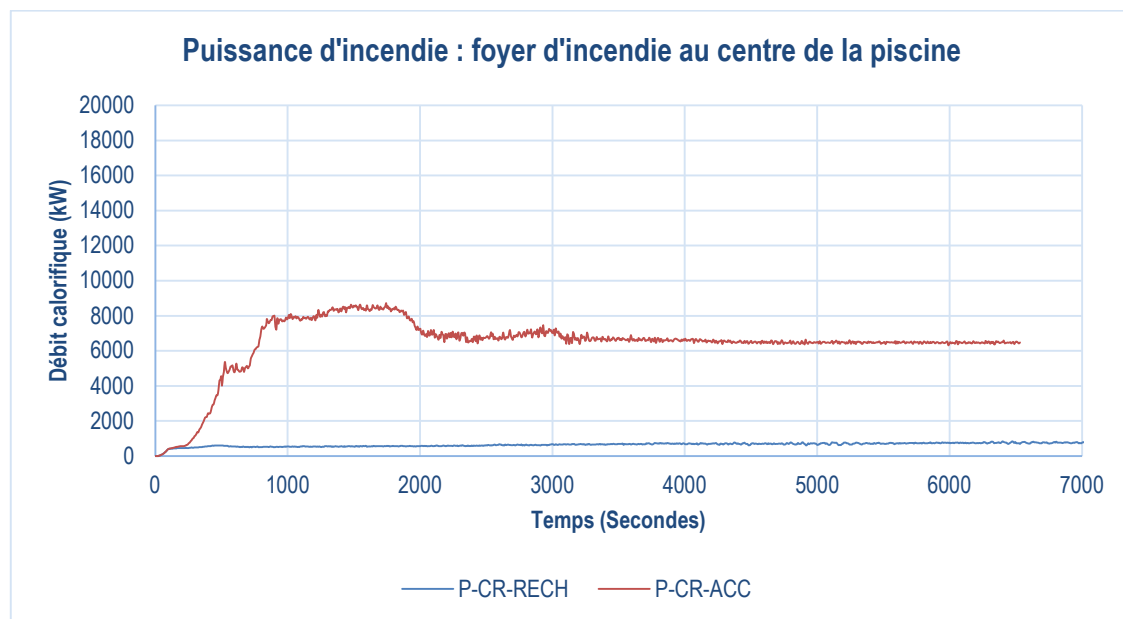


Figure 21 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé au centre de la piscine

6.3 Salle communautaire

Le développement d'incendie dans la salle communautaire selon les résultats de nos simulations numériques est illustré :

- à la Figure 22, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé dans le coin de la salle communautaire (SC-CN-Rech vs SC-CN-Acc);
- à la Figure 23, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé au centre de la salle communautaire (SC-CR-Rech vs SC-CR-Acc).

Dans tous les cas, le foyer d'incendie est modélisé adjacent à une colonne de bois apparent de la solution de rechange.

Pour les deux scénarios d'incendie dans la salle communautaire de la **solution de rechange**, la propagation des flammes est modérée pendant la première heure de simulation. Ensuite, l'incendie se propage rapidement à travers le compartiment et les conditions de l'embrasement général sont atteintes. Ce changement de développement d'incendie est provoqué par la brise des fenêtres.

Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans le coin (Figure 22, en bleu), l'embrasement général survient après 58 minutes d'incendie. Le débit calorifique maximal avant l'embrasement général est d'environ 3 000 kW (3 MW), et après l'embrasement général cette valeur est de 7 500 kW (7,5 MW).

Lorsque le foyer d'incendie est situé au centre (Figure 23, *Figure 19* en bleu), l'embrasement général survient après 66 minutes d'incendie. Le débit calorifique maximal avant l'embrasement général est d'environ 2 000 kW (2 MW), et après l'embrasement général cette valeur est supérieure à 8 000 kW (8 MW).

Mentionnons qu'au moment de survenance de l'embrasement général (≈ 60 min), l'étage devrait être entièrement évacué.

Pour les scénarios d'incendie dans la salle communautaire de la **solution acceptable**, peu importe le positionnement du foyer d'incendie, nous constatons la propagation des flammes à travers le compartiment dans les premières minutes d'incendie. La propagation d'incendie est accompagnée par la brise des fenêtres. Chaque fois qu'une fenêtre éclate, nous observons sur les graphiques la brusque hausse de débit calorifique (Figure 22 et Figure 23, en rouge). Les conditions de l'embrasement général sont atteintes plus rapidement que pour les configurations de la solution de rechange.

Déjà après 20 minutes d'incendie, la différence entre le débit calorifique maximal de la solution acceptable et celui de la solution de rechange est d'environ **400 %** pour le scénario d'incendie dans le coin, et d'environ **500 %** pour le scénario d'incendie au centre de la salle communautaire. La différence augmente davantage au cours de la simulation.

Le débit calorifique maximal du scénario d'incendie dans le coin (Figure 22, en rouge) est d'environ 15 000 kW (15 MW), soit **2,5 fois supérieur** au débit calorifique maximal de la solution de rechange.

Le débit calorifique maximal du scénario d'incendie au centre (Figure 23, en rouge) est d'environ 20 000 kW (20 MW), soit **2,5 fois supérieur** au débit calorifique maximal de la solution de rechange.

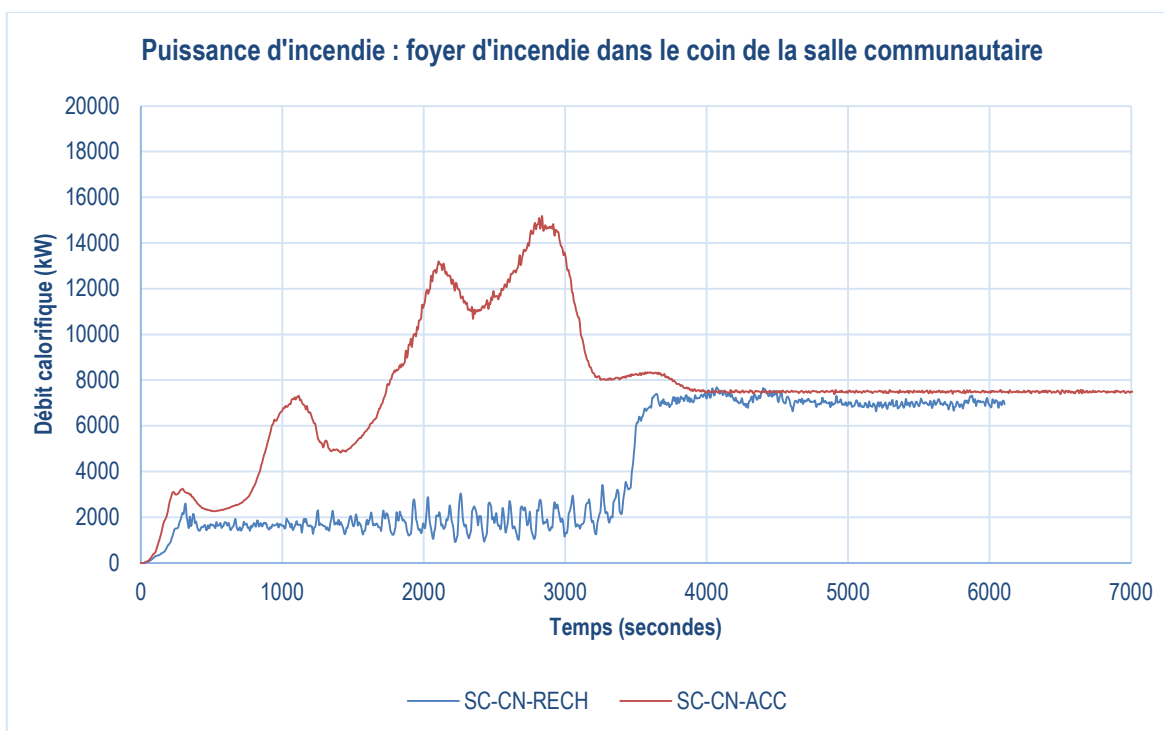


Figure 22 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans le coin de la salle communautaire

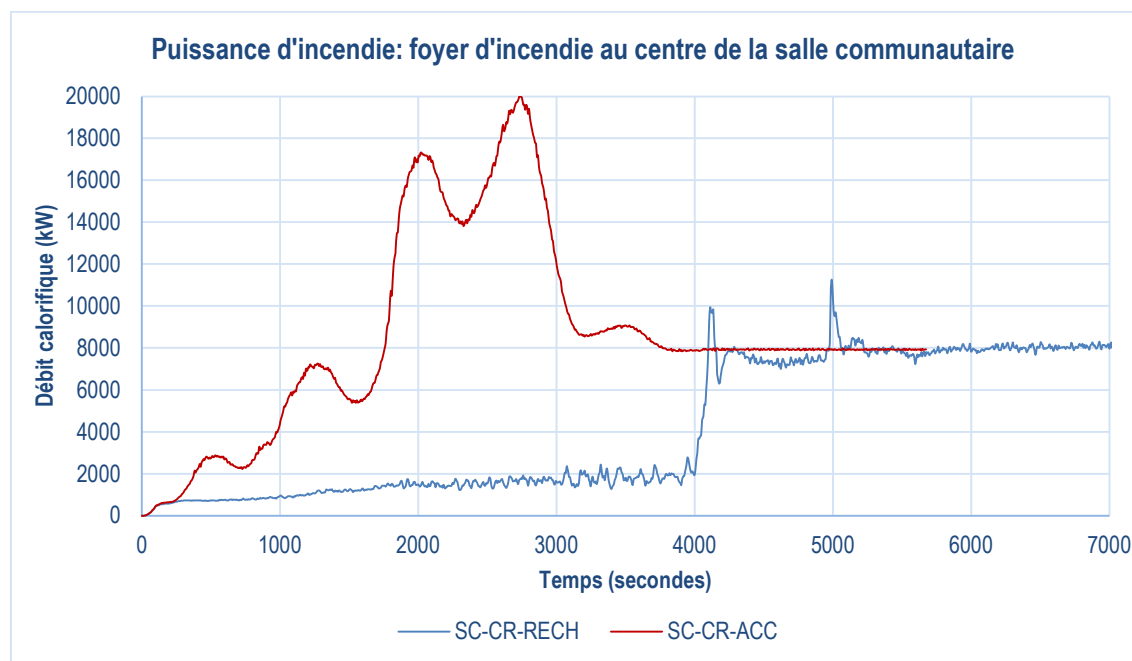


Figure 23 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé au centre de la salle communautaire

6.4 Espace *coworking*

Le développement d'incendie dans l'espace *coworking*, selon les résultats de nos simulations numériques, est illustré :

- à la Figure 24, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé dans le coin de l'espace *coworking* (CW-CN-Rech vs CW-CN-Acc);
- à la Figure 25, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé au centre de l'espace *coworking* (CW-CR-Rech vs CW-CR-Acc).

Les dimensions de l'espace *coworking* limitent la surface combustible des murs de la solution acceptable et du toit de la solution de rechange. De plus, le concept architectural ne prévoit pas de colonnes de bois apparentes à l'intérieur de cette pièce. Pour ce scénario d'incendie, la propagation des flammes est limitée et pour la solution de rechange, et pour la solution acceptable. Pour cette raison, la valeur maximale de l'axe vertical des graphiques présentant la variation du débit calorifique (chaleur dégagée) dans le temps est de seulement 5 000 kW (5 MW).

Pour les simulations de la **solution de rechange**, le débit calorifique maximal est de 1 000 kW (1 MW) si le foyer est modélisé dans le coin (Figure 24, en bleu) et de 600 kW (0,6 MW) si le foyer se trouve au centre, sous la poutre (Figure 25, en bleu).

Pour les simulations de la **solution acceptable**, lorsque le foyer se trouve dans le coin (Figure 24, en rouge) le débit calorifique maximal est de 2 000 kW (1 MW), soit **2 fois supérieur** au débit calorifique maximal de la solution de rechange. Si le foyer est modélisé au centre (Figure 25, en rouge), le débit calorifique maximal est de 1 200 kW (1,2 MW), soit également **2 fois supérieur** à celui de la solution de rechange.

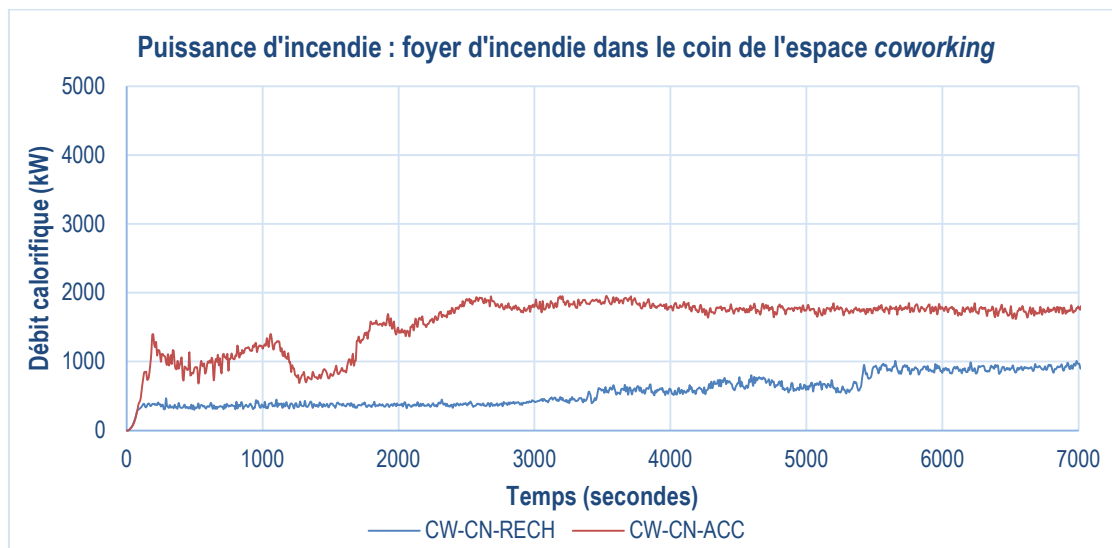


Figure 24 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans le coin de l'espace *coworking*

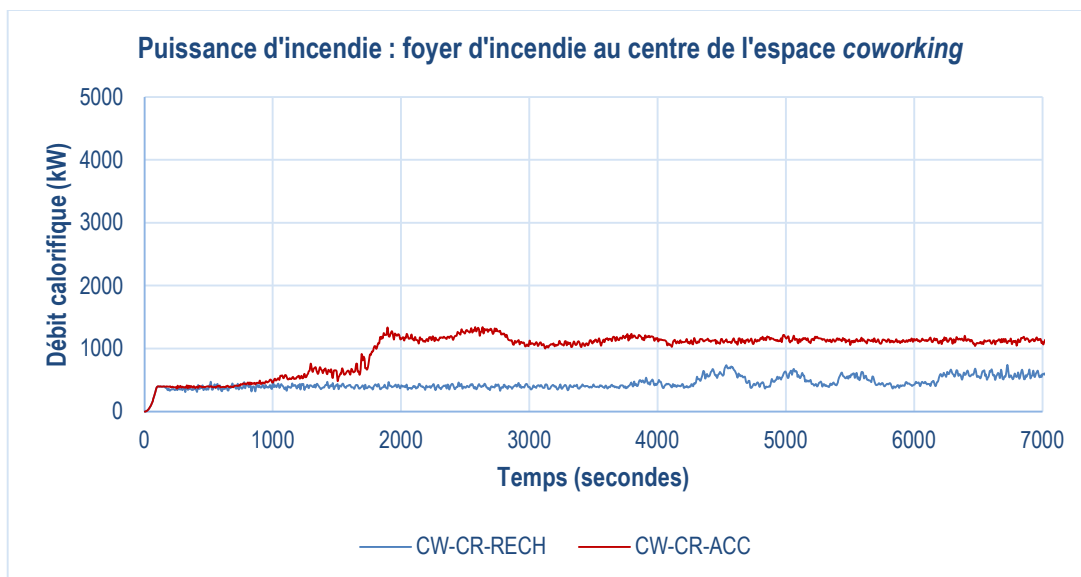


Figure 25 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé au centre de l'espace coworking

6.5 Logement A

Le développement d'incendie dans le logement A, selon les résultats de nos simulations numériques, est illustré :

- à la Figure 26, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé dans le coin du logement A (LA-CN-Rech vs LA-CN-Acc);
- à la Figure 27, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé au centre du logement A (LA-CR-Rech vs LA-CR-Acc).

Lorsque l'incendie se déclenche au centre du Logement A (Figure 27), la puissance d'incendie contrôlée par les gicleurs n'est pas suffisante pour allumer le toit combustible de la solution de rechange ou la portion combustible du plafond de la solution acceptable. À noter que la valeur maximale de l'axe vertical des graphiques, à la Figure 27 est de 1 000 kW (1 MW).

Pour le scénario d'incendie dans le coin du Logement A de la **solution de rechange** (Figure 26, en bleu), la propagation des flammes est modérée, car il n'y a pas de colonnes de bois apparentes à l'intérieur de ce logement. Même en l'absence de colonnes dans le coin, l'incendie initial a la capacité d'embraser la partie du toit directement au-dessus du foyer d'incendie. Le débit calorifique maximal de cette simulation est estimé à environ 2 000 kW (2 MW), avec une puissance d'incendie initiale multipliée fois six (6).

Pour les scénarios d'incendie dans le coin du Logement A de la **solution acceptable** (Figure 26, en rouge), l'incendie se propage à travers le compartiment en éclatant les deux (2) fenêtres prévues pour cette suite. Le débit calorifique maximal est d'environ 8 000 kW (8 MW), soit **quatre (4) fois supérieur** à celui de la solution de rechange.

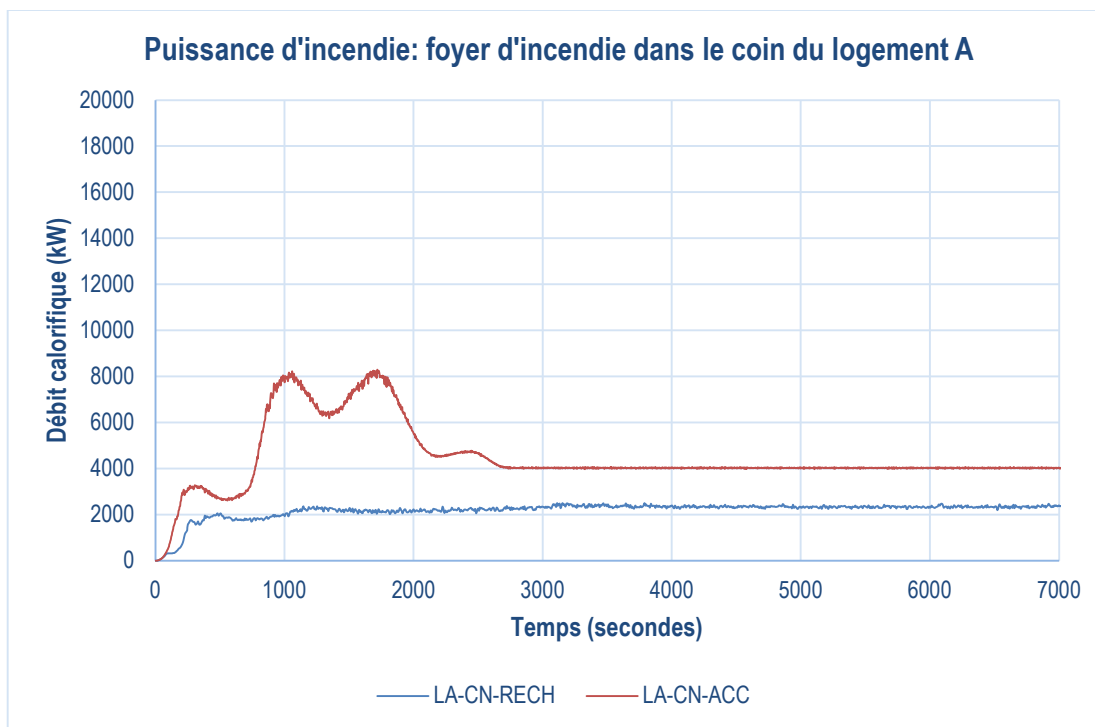


Figure 26 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans le coin du logement A

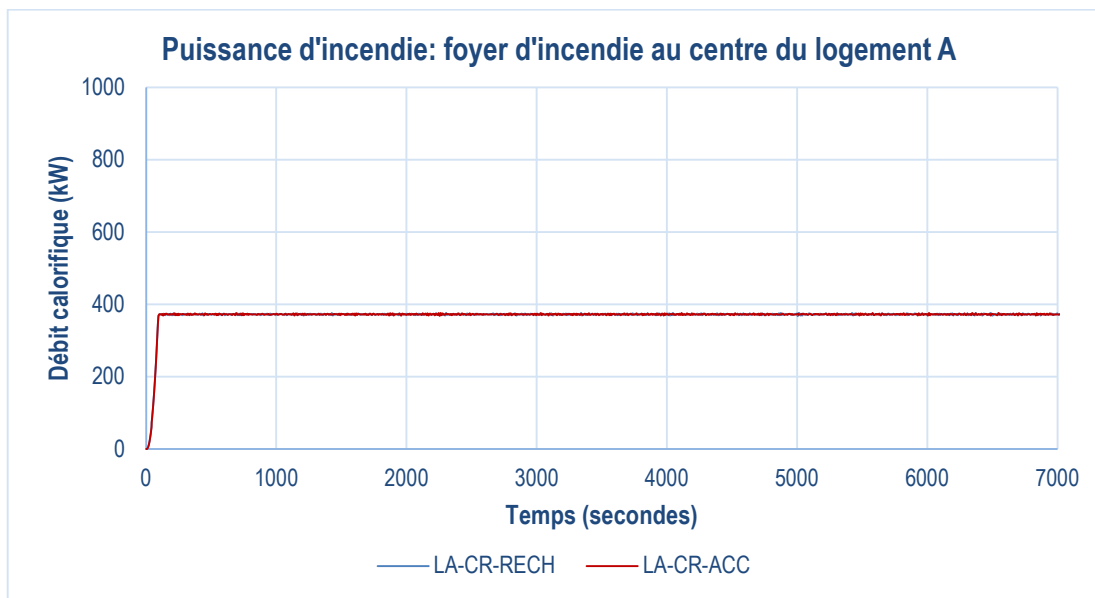


Figure 27 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé au centre du logement A

6.6 Logement B

Le développement d'incendie dans le logement B, selon les résultats de nos simulations numériques, est illustré :

- à la Figure 28, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé dans le coin du logement B (LB-CN-Rech vs LB-CN-Acc);
- à la Figure 29, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé au centre du logement B (LB-CR-Rech vs LB-CR-Acc);
- à la Figure 30, pour le scénario où le foyer d'incendie est situé dans un coin de la chambre du logement B (LB-CHB-Rech vs LB-CHB-Acc).

Il n'y a pas de colonnes de bois apparentes à l'intérieur de la chambre du logement B. Il y a une colonne de bois apparente uniquement dans le coin du salon du logement B.

Pour les scénarios d'incendie dans le Logement B de la **solution de rechange**, la propagation des flammes est modérée, peu importe le positionnement du foyer d'incendie.

Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans le coin du salon (Figure 28, en bleu), les flammes se propagent sur la colonne du coin et dans un secteur du toit de bois et des poutres à proximité du foyer d'incendie. Le débit calorifique maximal est d'environ 2 000 kW (2 MW), la puissance d'incendie de départ est multipliée fois cinq (5).

Lorsque le foyer d'incendie est situé au centre du salon (Figure 29, en bleu) la propagation des flammes est plus lente que pour le scénario d'incendie dans le coin, car aucune surface combustible ne se trouve près du foyer d'incendie. La première surface à s'allumer est celle du plafond de bois apparent. Le débit calorifique maximal est d'environ 2 000 kW (2 MW), comme pour le scénario d'incendie dans le coin du salon.

Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans le coin de la chambre (Figure 30, en bleu), la propagation de flammes est retardée, car cette pièce n'a pas de colonnes de bois apparent. Le débit calorifique durant la première heure de simulation est d'environ 600 kW (0,6 MW). La propagation d'incendie accélère après 80 minutes d'incendie, le débit calorifique maximal à ce stade est d'environ 4 000 kW (4 MW).

Pour les scénarios d'incendie dans le logement B de la **solution acceptable**, peu importe le positionnement du foyer d'incendie, l'incendie se propage à travers le compartiment en éclatant la majorité des fenêtres. Par conséquent, les conditions de l'embrasement général sont atteintes pour les trois emplacements d'incendie considérés.

Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans le coin du salon (Figure 28, en rouge), le débit calorifique maximal est d'environ 10 000 kW (10 MW), soit **cinq (5) fois supérieur** à celui de la solution de rechange.

Lorsque le foyer d'incendie est situé au centre du salon (**Figure 29**, en rouge), le débit calorifique maximal est également d'environ 10 000 kW (10 MW), toujours **5 fois supérieur** à celui de la solution de rechange.

Lorsque le foyer d'incendie se trouve dans la chambre (Figure 30, en rouge), le débit calorifique maximal est d'environ 16 000 kW (16 MW), soit **quatre (4) fois supérieur** à celui de la solution de rechange.

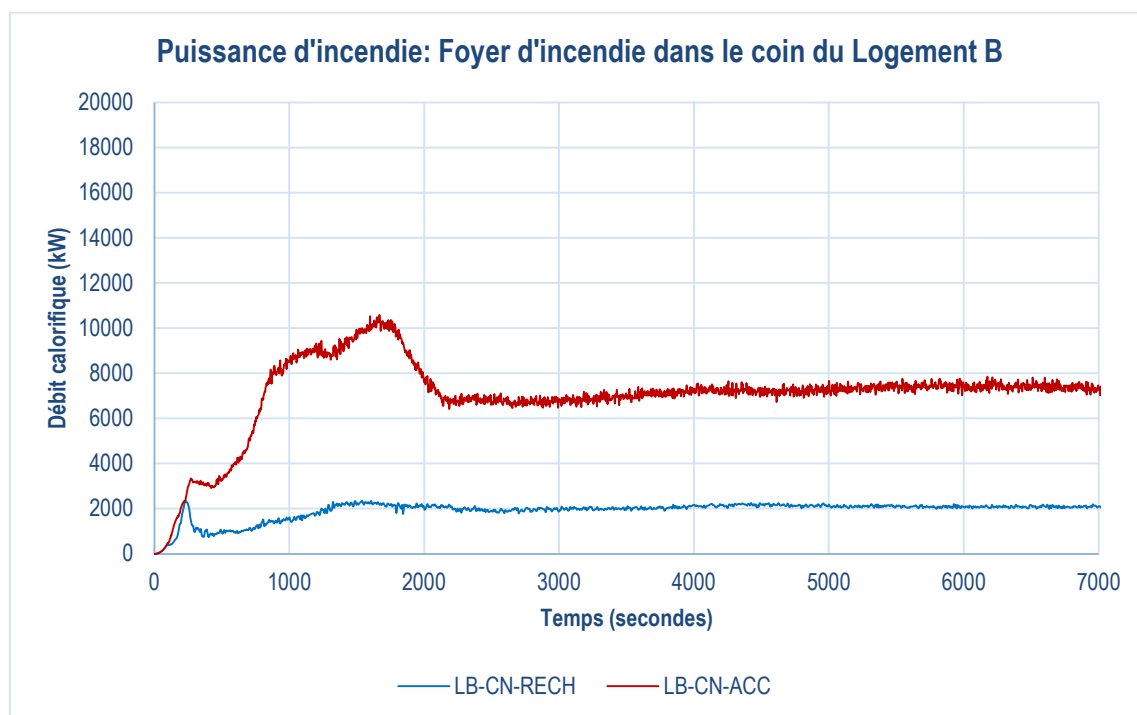


Figure 28 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans le coin du logement B

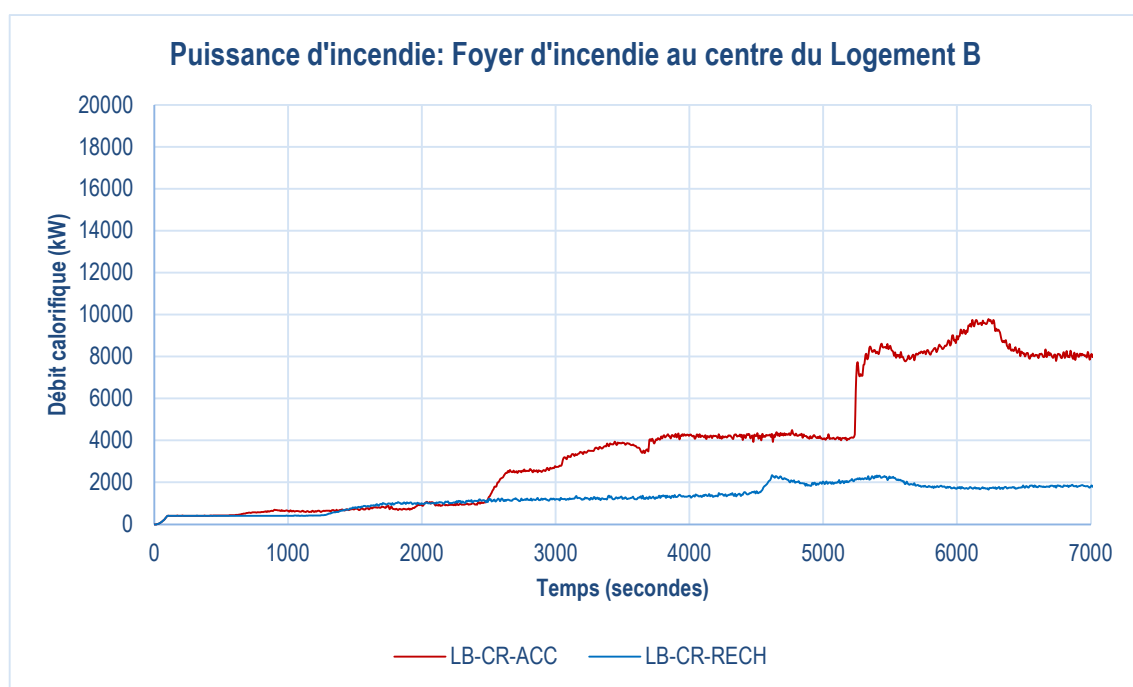


Figure 29: Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans le coin du logement B

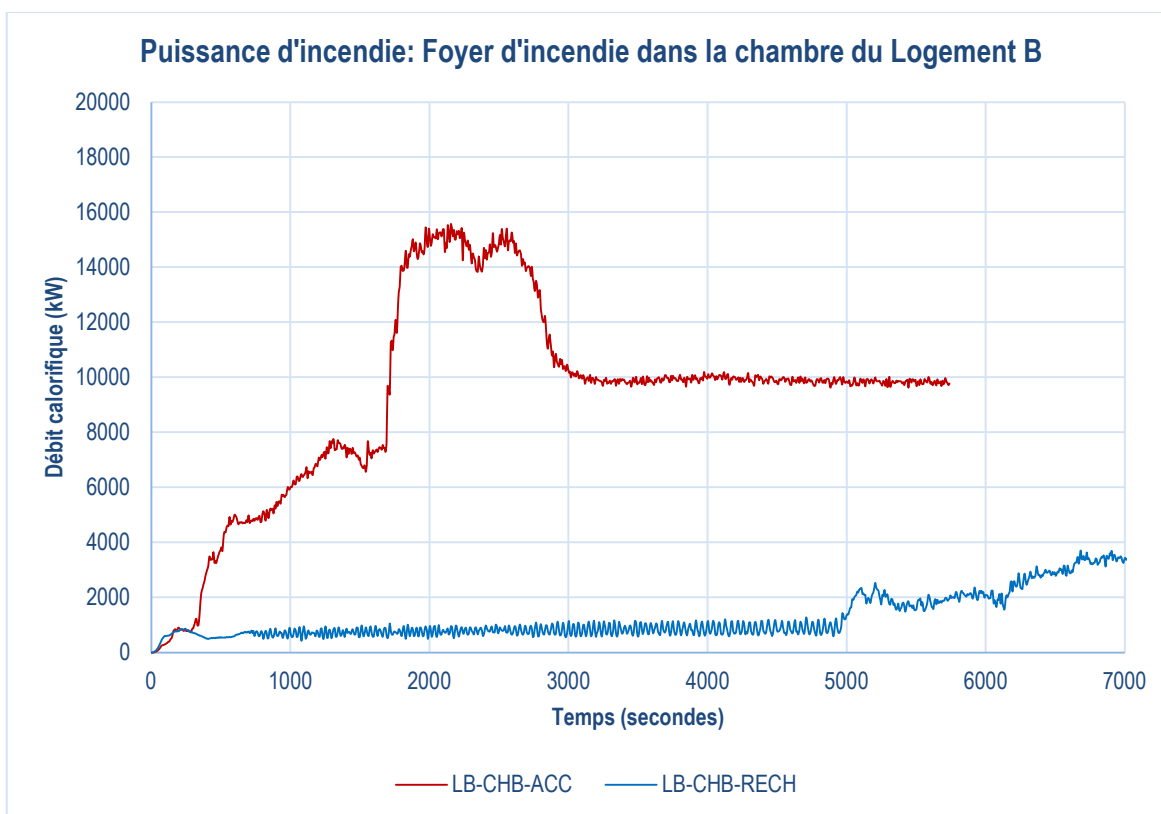


Figure 30 : Développement d'incendie lorsque le foyer est situé dans la chambre du logement B

En résumé, l'incendie de la **solution de rechange** comparativement à celui de la solution acceptable peut être caractérisé par :

- une puissance d'incendie globale (débit calorifique) **moins élevée**;
- une propagation d'incendie **plus tardive**;
- un développement d'incendie (croissance) **plus lent**;
- la survenance **plus tardive** de l'embrasement général dans certains cas et l'**absence** de l'embrasement général dans les autres cas.

7 CONCLUSION

Selon les résultats de l'analyse effectuée, en termes de sécurité incendie, le choix du matériau de construction combustible pour le toit du bâtiment de 13 étages entièrement protégé par gicleurs s'avère une solution équivalente et même supérieure à une solution considérée comme acceptable selon les exigences du CNB 2015 mod. Qc.

Selon les résultats des simulations numériques, la puissance d'incendie maximale atteinte lors de l'incendie de la solution de rechange est inférieure à celle de la solution acceptable. De plus, le développement d'incendie pour la solution de rechange est plus lent que celui de la solution acceptable.

Les résultats des simulations numériques sont valables pour la situation et les conditions du bâtiment sous étude uniquement. Une autre configuration ou si un des paramètres est modifié alors les résultats seront différents.