Programme d'appui au développement de l'industrie québécoise de l'habitation

PADIQH

Auvergne Laboratoire vivant PHASE II :

Application et monitorage d'enveloppes résidentielles haute-performance

Rapport technique

Richard Trempe, Architecte

Zetco Inc.

05/10/2022

En octobre 2021, Zetco Inc. signait une entente de partenariat avec la Société d'habitation du Québec pour réaliser une étude visant à expérimenter la performance de l'enveloppe de bâtiment dans le cadre d'un projet de développement d'ensembles haute-performance. Cette étude constitue la continuation d'une première réalisée en 2019-2020[1], dans le même cadre de subventions, et portant le numéro de référence PS-2019-01093.

Le présent document constitue donc une synthèse de la démarche réalisée sur le site d'*Auvergne laboratoire vivant*, en continuité avec celle effectuée en 2019-2020, conformément à l'entente signée entre la Société (ci-après nommé SHQ) et Zetco Inc.

On prendra note que les considérations administratives en lien avec la réalisation de cette étude ont déjà fait l'objet d'un premier rapport administratif soumis à la SHQ en date du 17 mars 2022.

Crédit image de la page titre : Richard Trempe (Un des pavillons sous étude en construction)

Les Partenaires du projet

[1] Rapport daté du 23 mars 2020 « Auvergne laboratoire vivant : Application et monitorage d'enveloppes résidentielles haute-performance » par Richard Trempe, arch.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION 5
1.1 Auvergne laboratoire vivant : présentation du projet global 5
1.2 Mission 5
1.3 Déploiement du projet 6
1.4 Retombées dans l'industrie et résultats attendus 7
2. OBJET ET MÉTHODOLOGIE 9
2.1 Objet de ce rapport 9
2.2 Objectifs recherchés 9
2.3 Présentation du rapport 9
2.4 Équipe de travail 10
3. LES APPROCHES TECHNIQUES 11
3.1 Rappel des systèmes d'enveloppe priorisés en phase I 11
3.2 Analyse et choix des scénarios de construction en phase II 12
3.2.1 Murs extérieurs 12
3.2.2 Toitures 13
3.3 Autres comparatifs et objets d'analyse en phase II 14
3.3.1 Analyse économique, énergétique et cycle de vie de différents autres types de mur 14
3.3.2 Potentiel d'utilisation d'assemblages biosourcés 15
3.3.2 Régulation de l'humidité dans l'enveloppe 15
3.3.3 Mur de masse 15
3.3.4 Dalle de béton radiante et comportement énergétique global 15
3.3.5 Sommaire des différences entre les deux pavillons 16
4. LA CONCEPTION DU PROJET 17
4.1 Orientation générale des pavillons 17
4.2 Organisation du plan 17
4.3 Étude de compacité et autres calculs de dimensions 18
4.4 Autres critères de performance 22
4.5 Détails, simulation et calcul des résistances thermiques 23
4.5.1 Calcul de la résistance thermique effective 23
4.5.2 Simulation des détails 24
4.5.3 Développement des détails de construction 30

4.5.4 Commentaires sur les matériaux utilisés 32
4.6 Efficacité énergétique 32
4.6.1 Scénarios de consommation et analyse 33
4.6.2 Mur de masse : impact de l'inertie thermique 35
4.7 Analyse du cycle de vie 35
4.7.1 Impacts environnementaux du cycle de vie 36
4.7.2 Impacts liés à l'Énergie d'exploitation 37
4.7.3 Impact globaux des pavillons 38
4.7.4 Analyse comparative en lien avec les ajouts d'isolation 39
4.7.5 Intégration d'un score unique 39
5. LA RÉALISATION DES TRAVAUX 41
5.1 Ajustement de détails 41
5.2 Déroulement du chantier 42
5.3 Suivi post-construction 44
6. LA PERFORMANCE EN SERVICE 45
6.1 Test d'infiltrométrie 45
6.2 Thermographie 46
6.3 Monitorage 50
6.3.1 Zones d'analyse ciblées 51
6.3.2 position typique des prises de données 52
6.3.3. Analyse des résultats 52
7 L'EFFICACITÉ : COÛTS ET EXPLOITATION 56
7.1 Analyse comparée des coûts de construction 56
7.2 Consommation énergétique 57
7.2.1 Analyse préliminaire de la consommation réelle et projections annuelles 57
7.2.2 Analyse finale de la consommation réelle et projections annuelles 59
7.2.3 Étude de la consommation en fonction des scénarios de murs extérieurs 60
7.2.4 Consommation et choix stratégique de chauffage 61
8 CONCLUSION 64
8.1 Les approches conceptuelles 64
8.2 La Réalisation des travaux 66
8.3 Règles essentielles, au-delà du genre et de l'espèce 68
8.4 Développement futur et partage 69

8.5 Perspective générale 69

ANNEXE 1 Tableaux, schémas et analyses

Annexe 1.1 Extraits des plans et élévations tirés des documents qui ont servis à la construction

Annexe 1.2 Évolution du détail de rive de toit type

Annexe 1.3 Calcul des résistances effectives – murs extérieurs

Annexe 1.4 Calcul des résistances effectives – toiture

Annexe 1.5 Étude de compacité

Annexe 1.6 Monitorage électronique

ANNEXE 2 Étude de simulation informatique par UL

ANNEXE 3 Étude d'efficacité énergétique par rd2

ANNEXE 4 Rapport d'analyse du cycle de vie par CT Consultants,

ANNEXE 5 Rapport d'infiltrométrie par Réseau De Vinci (L'Hermine)

ANNEXE 6 Rapport d'infiltrométrie par Réseau De Vinci (La Sittelle)

ANNEXE 7 Rapport de thermographie par Groupe Partie 5

ANNEXE 8 Étude de monitorage par Groupe partie 5

1. INTRODUCTION

1.1 Auvergne laboratoire vivant : présentation du projet global

Dans la mouvance des changements climatiques et énergétiques marquant ce début de XXIe siècle, le domaine de la construction au Québec doit répondre à de nombreux défis, en quête d'une nouvelle pratique du bâtiment intégrant à la fois performance, durabilité et bien-être, en plus d'être économiquement viable.

On dénombre à ce sujet plusieurs études actuellement réalisées[2]. Ces études proposent soit de nouveaux systèmes, soit des détails plus performants, soit des méthodes d'essais innovantes ou des calculs plus efficaces.

Ces études permettent certes de documenter plusieurs aspects de la science du bâtiment, sans toutefois en vérifier les performances *in situ*, ni la détérioration en service. Au surplus, si des assemblages sont réalisés, ils se font dans un contexte non-représentatif de la *construction masse,* et sans tenir compte des contraintes de chantier habituelles, avec tous les défis que cela comporte.

Plusieurs constructions résidentielles se targuent d'être écologiques, éco-performantes,… alors que, trop souvent, les principes mêmes de base en bioclimatique[3] ne sont même pas pris en considération. Parfois même, des principes élémentaires qui assurent la durabilité (gestion de l'eau, transferts hygrothermiques, asséchement dans les assemblages, …) sont ignorés.

1.2 Mission

En réponse à ces carences, *Auvergne laboratoire vivant* s'est donné comme mission de contribuer activement à ces nouveaux défis, en créant un site d'expérimentation permettant la réalisation, la diffusion et l'analyse critique de méthodes de construction qui pourraient être mieux adaptées au contexte québécois, dans des conditions réalistes de construction.

Auvergne laboratoire vivant veut ainsi participer à l'avancement et au rayonnement des connaissances dans l'industrie. Le projet global vise donc à :

- Documenter sur le terrain la performance de nouvelles approches techniques dans des lieux monitorés et habités, lieux prenant actuellement la forme de trois pavillons sous étude ;

- Promouvoir une approche plus analytique de l'enveloppe de bâtiments dans le domaine résidentiel, dans des perspectives environnementale, économique et de bien-être, tout en tenant compte de l'expectative climatique, et tout en s'inspirant des recherches sur le sujet, venant d'ici et ailleurs ;

[2] Se référer au rapport de la phase I qui détaille lesdites études.

[3] On pourrait définir la bioclimatique comme étant une adaptation de l'architecture et des techniques de construction aux caractéristiques propres au lieu et aux conditions d'implantation, permettant d'en tirer le bénéfice des avantages et de se prémunir des désavantages et contraintes, le tout en vue d'obtenir des conditions de vie et de confort d'ambiance de manière la plus naturelle et économiquement possible.

- Favoriser la multidisciplinarité en impliquant dans le projet de construction et de recherche concepteurs, fabricants et entrepreneurs dans le développement d'assemblages *haute-performance* ;
- Développer des outils de communication pour assurer la diffusion de l'information.

L'organigramme suivant montre la mission globale d'*Auvergne laboratoire vivant*, mission qui se déploie sous trois grands axes : comprendre, expérimenter, communiquer.

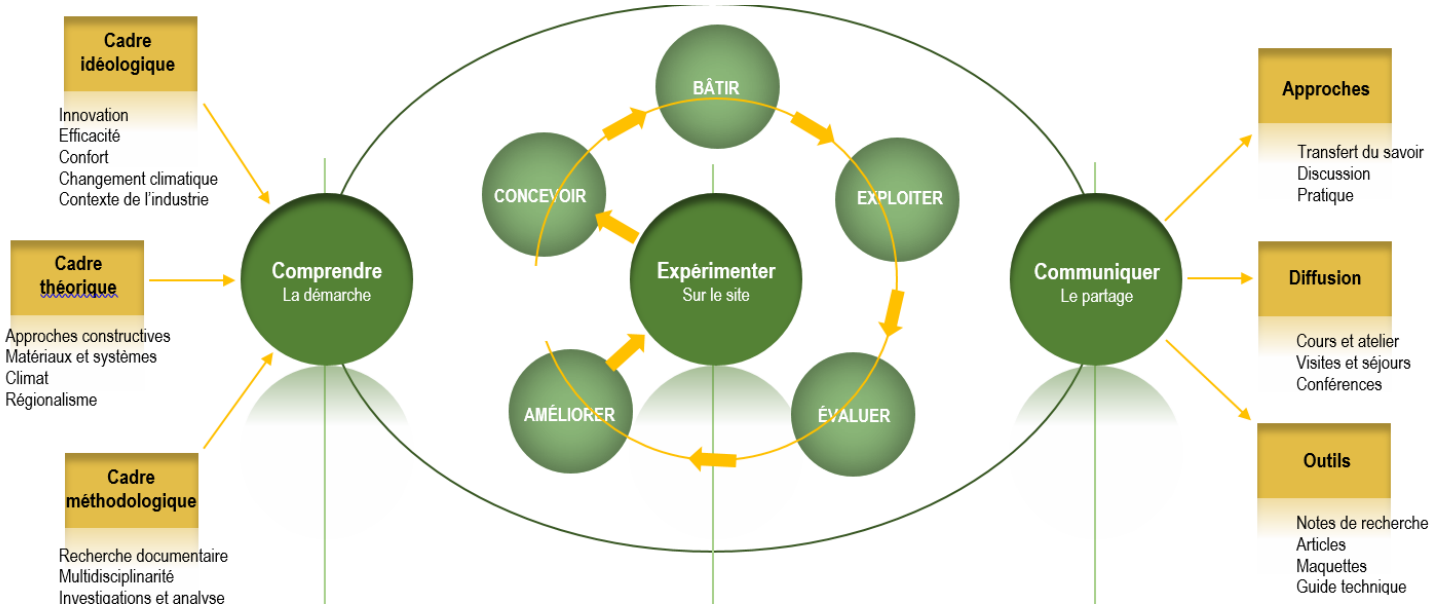


Figure 1 - Mission Auvergne laboratoire vivant (R.Trempe)

1.3 Déploiement du projet

Auvergne laboratoire vivant est établi sur un vaste terrain boisé, dans Portneuf, près de Québec[4]. Le site comprend trois pavillons, un premier faisant l'objet du rapport de la phase I et deux autres construits dans le cadre de la présente phase. Il s'agit de pavillons habités (location court-terme), qui intègrent divers assemblages innovants de murs et de toit, en partie basés sur des stratégies bioclimatiques et des considérations énergétiques.

[4] Zetco Inc. est propriétaire du terrain en question, situé à Ste-Christine-d 'Auvergne, près de Québec.

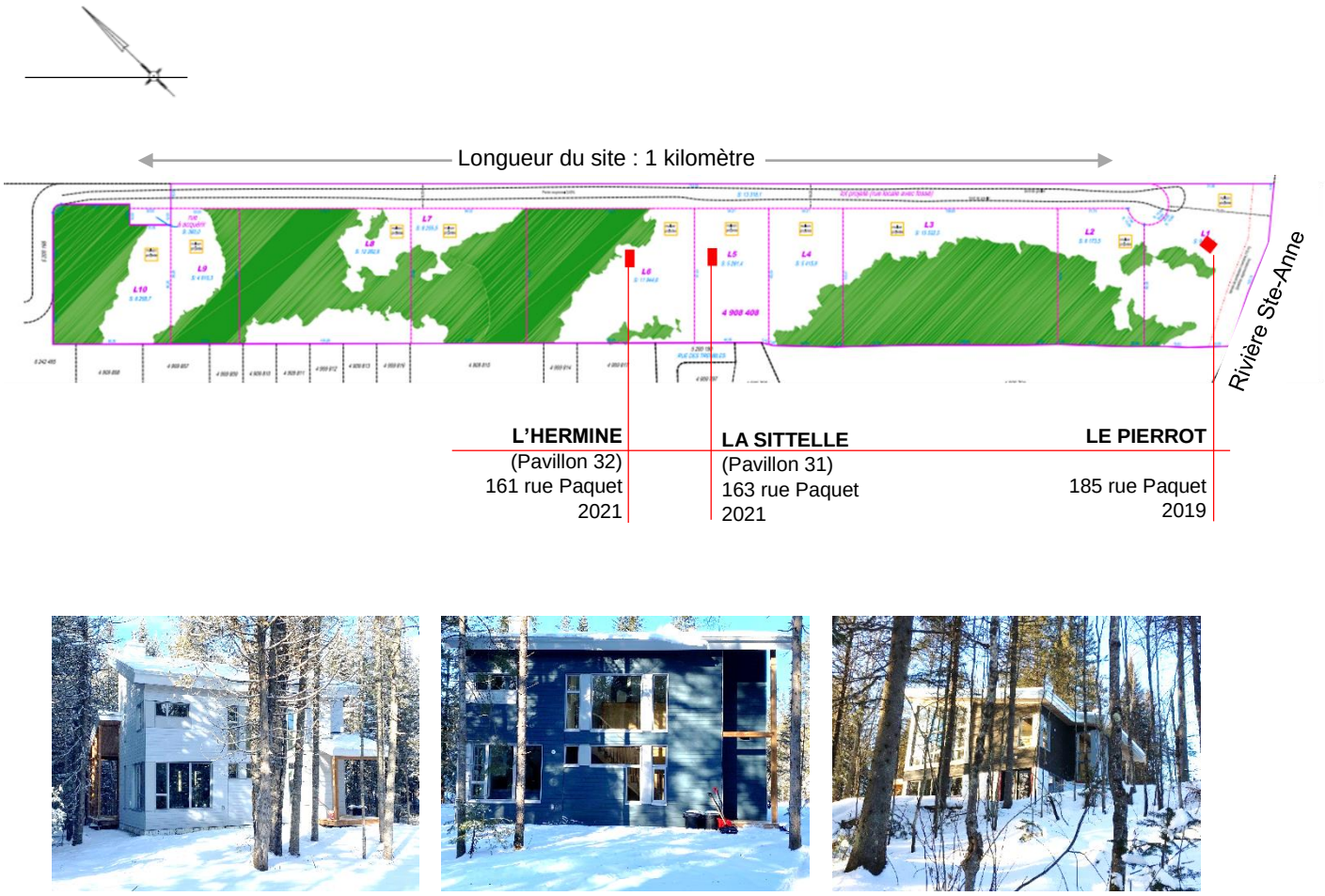


Figure 2 – Vue et localisation des trois pavillons en hiver, les deux pavillons de gauche (L'Hermine et La Sittelle) possèdent une configuration identique mais des assemblages d'enveloppe différents

Les assemblages des trois pavillons sont instrumentés au moyen de plusieurs capteurs de température et d'humidité, afin d'en évaluer la performance sur une base continue et d'en communiquer les résultats par la suite.

1.4 Retombées dans l'industrie et résultats attendus

Auvergne laboratoire vivant repose sur des hypothèses développées à partir de détails d'enveloppe *haute-performance* et de modélisation par simulation informatique, sans autre obligation d'un quelconque niveau d'atteinte d'efficacité. Peu importe les résultats, ceux-ci ne peuvent être que bénéfiques pour la science du bâtiment appliquée ici au domaine résidentiel.

Les retombées de cette recherche permettront éventuellement de juxtaposer et croiser les différentes études déjà entreprises par d'autres instances[5].

Auvergne laboratoire vivant s'inscrit donc comme un outil technique et pédagogique aligné aux préoccupations sociales, de développement durable et d'efficacité énergétique.

À ce jour, *Auvergne laboratoire vivant* a fait l'objet de conférences au cours des années 2021-22 et constitue le sujet principal l'une infolettre mensuelle dédiée à la performance, publiée par Trempe architecte. Des ateliers sont prévu sur place en 2022-2023, sous réserve des mesures sanitaires.

[5] Étape en cours de réalisation, entre autres par le centre de recherche Serex.

2. OBJET ET MÉTHODOLOGIE

2.1 Objet de ce rapport

Ce rapport propose une synthèse des actions prises lors de la conception et la construction des pavillons L'Hermine et La Sittelle[6] et des analyses qui suivirent au moment de la mise en service, soit au cours de l'automne et de l'hiver 2021-2022.

Ce rapport comprend aussi les études spécifiques respectivement réalisées par les différents collaborateurs dont les services avaient été retenus par Zetco Inc. et dont on retrouve de larges extraits dans ce rapport et les analyses complètes en annexe.

2.2 Objectifs recherchés

Les objectifs d'*Auvergne laboratoire vivant* s'inscrivent dans un processus d'intégration et de diffusion des nouvelles connaissances au moyen de réels bâtiments en opération, pour tenir compte de la performance en service et la durabilité dans le temps. Ces objectifs cherchent à

- Développer une méthodologie d'évaluation de performance simple et reproductible sur d'autres bâtiments résidentiels, méthodologie devant comprendre entre autres éléments :

    1. Modélisation des détails d'assemblage et calcul théorique d'efficacité ;
    2. Vérification des données mesurées et comparaison avec d'autres références et avec les modèles obtenus pas modélisation ;
    3. Évaluation de la rentabilité/efficacité des détails de construction ;
    4. Élaboration de modifications et d'amélioration à faire, le cas échéant ;
    5. Optimisation de chacune des étapes de réalisation.

- Communiquer les résultats du projet de recherche au profit des professionnels de la construction en développant des outils de communication appropriés :

    1. Mise en contexte des approches et résultats aux différentes étapes de conception, réalisation et utilisation ;
    2. Stratégie de transfert des connaissances (tableaux, détails des principes, documentation photographique, maquettes, etc.).

2.3 Présentation du rapport

Ce rapport constitue une étape dans le développement général du projet d'*Auvergne laboratoire vivant,* dont l'étude actuelle s'est prolongée, en fait, au-delà de la fin du programme d'aide 2021-2022, soit jusqu' à la fin de la saison hivernale. L'étude pourra se

[6] Dans ce rapport, les pavillons seront dénommés soit par un code (donné durant la préparation des plans de construction) soit par leur adresse civique ou leur nom. Ainsi :
-L'Hermine (**pavillon 32**) est cis au **161** rue Paquet
-La Sittelle (**pavillon 31**) est cis au **163** rue Paquet

poursuivre aussi pour une deuxième année, afin de valider, après un autre hiver complet, certains résultats obtenus à ce jour et présentés dans ce rapport.

Ce document traite des différentes analyses effectuées à ce jour, directement en lien avec la demande d'aide financière.[7] Plusieurs documents complémentaires sont regroupée en annexe 1 (documents complémentaires au rapport) et 2 (rapports des autres parties prenantes, spécialistes dans leur domaine respectif).

Repères :

Nom du pavillon :	adresse :	Code utilisé au chantier :	Année :
Le Pierrot	185 rue Paquet	-	2019
La Sittelle	163 rue Paquet	Le 31	2021
L'Hermine	161 rue Paquet	Le 32	2021

2.4 Équipe de travail

Les personnes suivantes ont été impliquées à l'une ou l'autre des phases du projet :

Luca Ferrara, CPI	UL	Simulation
Charles Beaulé, ing.	PARTIE 5	Monitorage
Jerry Lapointe T.E	Groupe de Vinci	Infiltrométrie
Denis Bourgeois, PhD	rd2	Étude énergétique
Simon Bélanger, T.P.	PARTIE 5	Thermographie
Maxime Simard	Carsim (entrepreneur général)	Estimés
Charles Thibodeau, PhD	CT Consultants	Analyse cycle de vie

.

[7] Des relevés d'autres natures sont en cours de réalisation, plus spécifiquement en lien avec différents aspects bioclimatiques, touchant entre autres à l'implantation, l'orientation et les accumulations de neige et de glace. Ces relevés supplémentaires feront éventuellement l'objet d'analyses parallèles.

3. LES APPROCHES TECHNIQUES

3.1 Rappel des systèmes d'enveloppe priorisés en phase I

Le choix du système SITE[8] a été établi pour le phase I en considérant entre autres les critères suivants :

- Aucun plan d'étanchéité, mis à part le pare-pluie évidemment, n'est soumis aux conditions froides et humides, la membrane étant située derrière l'isolant, contrairement au SIPE (mur conventionnel). Les plans sont donc à l'abri et au chaud ;

- Aucune matière principale putrescible ne se retrouve trappée entre deux plans d'étanchéité, toute humidité ou eau peut facilement se gérer. Au niveau du SIPE, les montants de bois, ou encore le panneau d'OSB (très souvent utilisé) se retrouvent habituellement entre le plan d'étanchéité à l'air et celui à la vapeur d'eau. Le panneau OSB, avec ses propriétés vaporifuges qui limitent la diffusion de l'humidité potentiellement emprisonnée, est au-surplus positionné dans une zone à risque de condensation. Dans ces conditions, le potentiel d'assèchement, pourtant crucial, peut être compromis.

- Le recouvrement des ponts thermiques est maximisé dans le SITE, alors que toute la charpente sera conservée au chaud ;

- Les opérations de pose des plans d'étanchéité sont simplifiées, il n'y en qu'un seul, assuré par une membrane[9] ;

- La pose de la membrane, toujours dans le SITE, se fait aisément directement sur le panneau de revêtement intermédiaire[10], et la membrane pourra servir de protection de l'ensemble rapidement, durant les travaux ;

- L'espace entre les montants est laissé libre pour le passage de la mécanique et de l'électricité, et il n'y a aucun risque non plus de perforation du pare-vapeur, tel que souvent constaté dans les murs SIPE ;

Le choix d'un mur *perfect wall* SITE amène néanmoins des défis eu égard à la position des ouvertures, à l'élargissement du mur par rapport au système traditionnel isolé entre les montants, aux fixations du parement extérieur qui se trouvent plus éloignées de la charpente (effet bras de levier), sans compter qu'il s'agit d'un assemblage novateur pour

[8] Pour alléger le texte, les acronymes suivants sont donnés par l'auteur : SITE pour le système mural totalement isolé par l'extérieur (comme le *Perfect wall*) et SIPE pour le système mural isolé partiellement par l'extérieur, comme le mur conventionnel d'usage dans le résidentiel au Québec).

[9] La pose parfaite de la membrane constituera néanmoins un gage de succès ou non, tel qu'il sera vu dans la partie portant sur la construction.

[10] De par sa position vers l'intérieur par rapport à l'isolant, le choix du type de revêtement intermédiaire n'est plus soumis aux risques de condensation et de contamination fongique.

les entrepreneurs. La « faisabilité » des détails constituent ainsi un défi lors d'une construction aussi particulière que le résidentiel[11].

Le travail réalisé à la phase I a montré une très bonne performance, tel que décrit au rapport de la phase I. Mais était-ce aussi du, du moins en partie, à l'excellente qualité des travaux réalisés ? Et si l'on comparait, toujours avec les mêmes équipes de réalisation du travail, les deux systèmes en question, avec des bâtiments, des orientations, des sollicitations et des usages parfaitement identiques ?

Voilà à quoi se concentrera principalement la phase II *d'Auvergne laboratoire vivant*.

3.2 Analyse et choix des scénarios de construction en phase II

3.2.1 Murs extérieurs

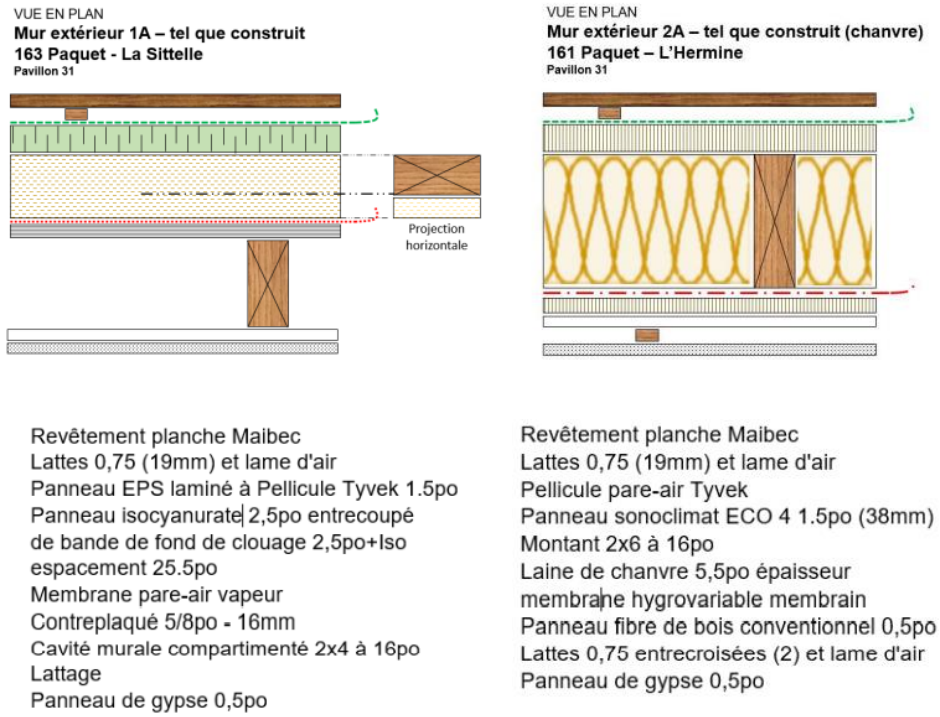


Figure 3 – Assemblages muraux pour La Sittelle (à gauche) et l'Hermine (à droite)

Sur le détail de gauche, le système SITE (système isolé totalement à l'extérieur) pour les murs de La Sittelle :

- La ligne en tireté verte constitue le « pare-intempérie », soit un plan d'étanchéité que l'auteur ajoute aux autres plans déjà prévus dans des systèmes de type SITE (perfect wall), en tentant de limiter au minimum toute mouvement d'air ou toute humidité entre les isolants, la pellicule d'oléfine de type *tyvek* est utilisée.

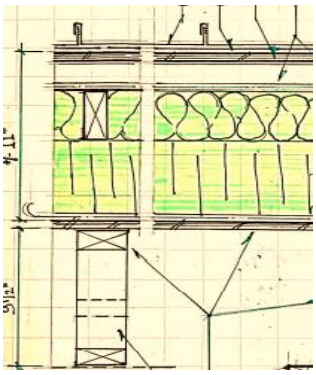
[11] La construction résidentielle, contrairement au commercial, impose toujours des charges mécaniques d'usage très lourdes, et la bonne mise en place de l'étanchéité, appuyée par des détails constructibles, est essentielle.

- La ligne rouge derrière les isolants constitue le plan d'étanchéité assuré par une seule membrane pare-air / pare-eau /pare-vapeur.

Sur le détail de droite, le système SIPE (système isolant partiellement isolé par l'extérieur), soit le système reconnu dans la construction au Québec, mais avec certains ajouts, pour les murs de L'Hermine :

- La ligne en tireté verte constitue le pare-air (souvent appelé dans l'industrie pare-intempérie[12]) la pellicule d'oléfine de type *tyvek* est utilisée.
- La ligne en tireté rouge entre la fibre de bois et l'isolant de chanvre, du côté intérieur constitue le frein-vapeur, ici la membrane *Membrain* de *Certainteed* a été utilisée pour tous les murs de L'Hermine.

3.2.2 Toitures



Film air extérieur
Revêtement métallique
Membrane pare-eau
Contreplaqué 5/8po - 16mm
pièces 2x3po posées à plat, sens pente
Pellicule pare-air Tyvek
Montant 2x4 à 24po et chanvre 3,5po
Montant 2x6 à 49,5po et polyiso 3,5po
Membrane pare-air vapeur
Contreplaqué 5/8po - 16mm
Film d'air intérieur

Figure 4 – Assemblage de toiture (identique pour les deux pavillons)

On remarquera que la toiture reprend les dispositions de base développées pour la phase I, mais en y ajoutant une cavité d'aération et d'assèchement au-dessus des plans d'isolation. Il s'agit toujours d'un système à double ossature en bois, avec un plan d'étanchéité principal appliqué au-dessus des fermes de toit. En conséquence, l'espace entre les fermes préfabriquées constitue un espace intérieur, soit recouvert de gypse (à l'étage) sinon apparent (où un seul étage au RDC, voir photo ci-contre).

Photo 1 – Vue du plafond avec fermes exposées

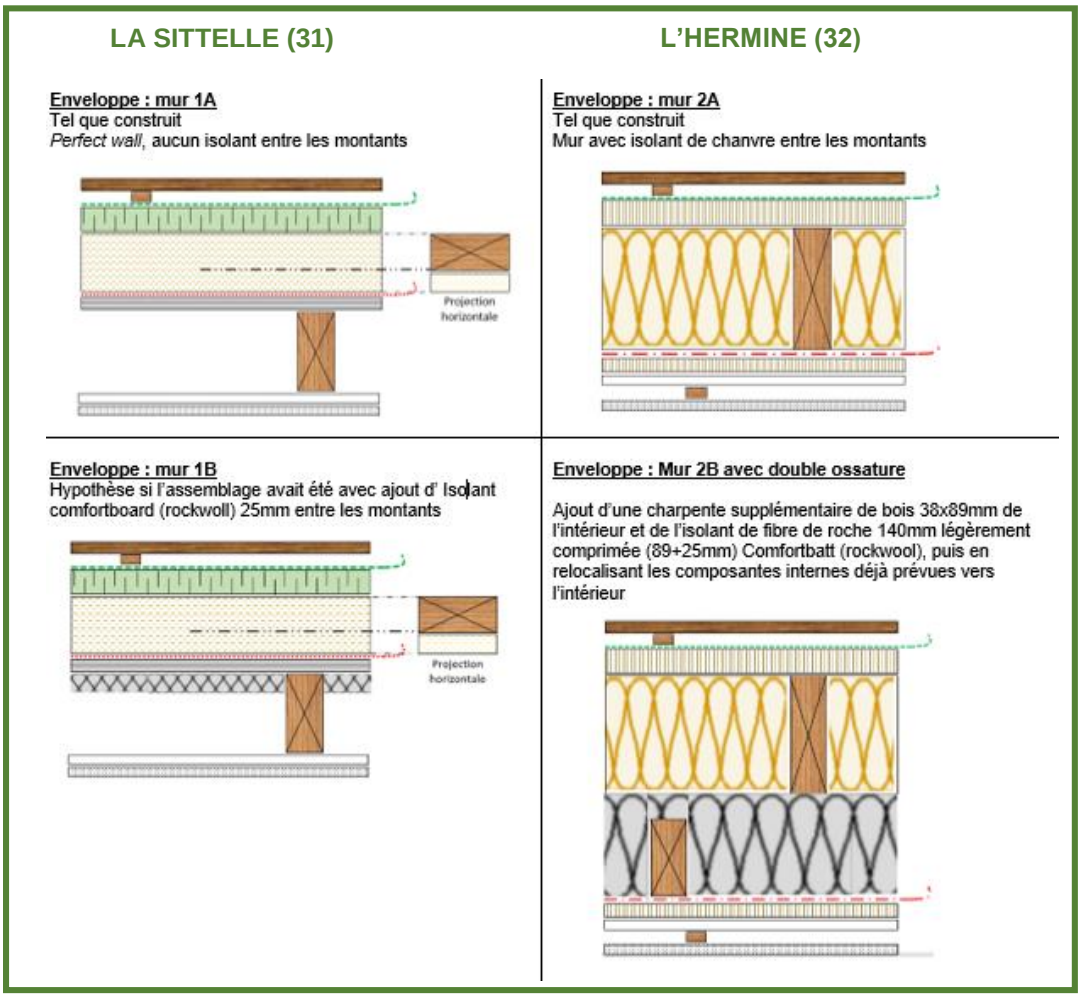
[12] Nomenclature dans l'industrie erronée et mal identifiée, de l'avis de l'auteur : un pare-air est bien plus qu'un pare-intempérie. Au surplus, si on nomme ce plan « pare-intempérie » alors il n'y a plus de « pare-air » nommé et identifié sur les détails communs de ce types d'assemblage, à moins de se rabattre sur le pare-vapeur intérieur et d'en « faire » un pare-air/vapeur par divers moyens souvent complexes et à la performance douteuse.

3.3 Autres comparatifs et objets d'analyse en phase II

La construction de deux nouveaux pavillons constituait une occasion unique de procéder à l'observation et au monitorage d'autres éléments. Cette partie présente les différentes études faites en parallèle, dont certaines sont déjà complétées.

3.3.1 Analyse économique, énergétique et cycle de vie de différents autres types de mur

Bien que deux systèmes muraux et un type de toiture aient été choisis pour bâtir et pour réaliser l'étude comparative entre les deux pavillons, divers autres scénarios ont été développés dès le départ, entre autres pour assurer un éventail comparatif plus vaste en lien avec la performance énergétique et environnementale. Le tableau suivant montre les différents scénarios de type « déclinaison », qui seront considérés tout au long de ce rapport, à partir des deux options de base 1A et 2A choisies pour la construction.



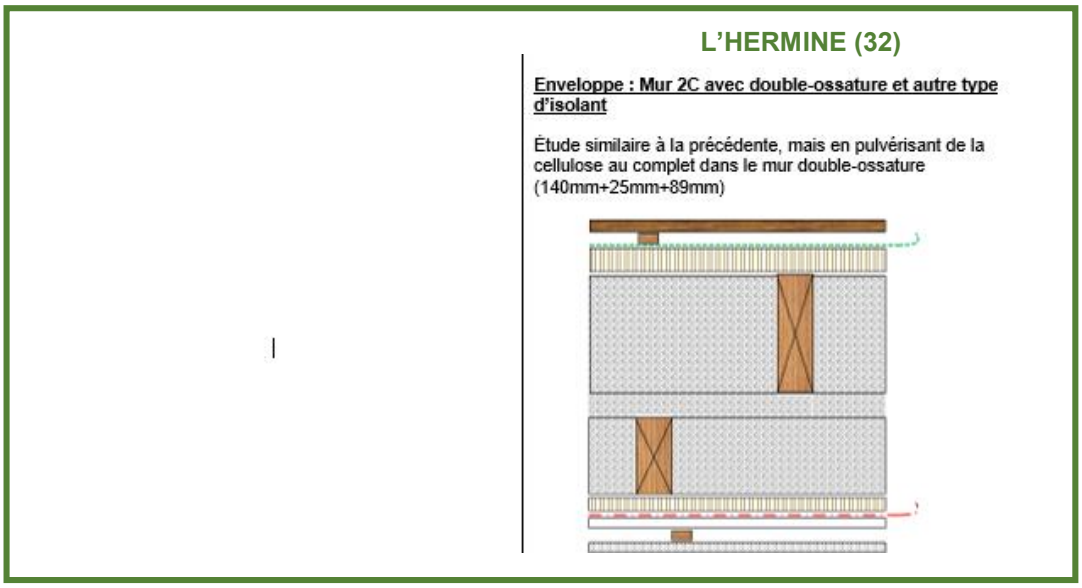


Figure 5 – Tableau général des scénarios et leur identification / description

3.3.2 Potentiel d'utilisation d'assemblages biosourcés

Les scénarios de la colonne des « 2 », soit les scénarios 2A, 2B et 2C de l'Hermine sont constitués de matériaux en grande majorité biosourcés tels que le bois, la fibre de bois, le chanvre ou la cellulose. L'impact de telles utilisations sur l'empreinte carbone noius apparaissait important à vérifier.

3.3.2 Régulation de l'humidité dans l'enveloppe

Les murs tels que construits sont basés sur deux aspects de la régulation différentes, alors que les murs 1A de La Sittelle intègrent un pare-vapeur au sens traditionnel du terme (moins de 15ng/pa•sm^2) et que les murs 2A de L'Hermine contiennent un frein-vapeur, faisant de l'assemblage un système perspirant.

3.3.3 Mur de masse

Un mur de masse en maçonnerie de blocs de béton a été intégré dans l'ensemble, uniquement dans L'Hermine, afin de pourvoir vérifier sa contribution, par gain solaire, au confort de l'habitat.

3.3.4 Dalle de béton radiante et comportement énergétique global

Le chauffage du RDC des deux pavillons est assuré par une dalle de béton chauffante (câbles électriques sous la dalle), alors qu'on retrouve des plinthes électriques conventionnelles à l'étage seulement. La contribution de la dalle à l'équation énergétique a été vérifiée par simulation et par la consommation réelle.

3.3.5 Sommaire des différences entre les deux pavillons

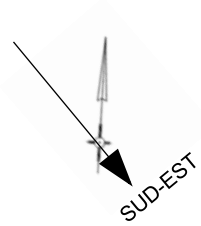
On retrouve sur les plans d'architecture un sommaire des différences principales entre les pavillons, sommaire qui est reproduit partiellement ci-après.

DISTINCTION ENTRE LES PAVILLONS		
Caractéristiques	**Pavillon 31**	**Pavillon 32**
Localisation	Pavillon le plus au sud (vers rivière)	Pavillon le plus au nord (vers Rang St-Jacques)
Identification lots	6 286 331	6 286 332
Entrée principale	Porche surplombé d'un toit dans le prolongement du toit principal	Galerie se prolongeant sur une façade latérale
Parement extérieur	Planche de bois ~~et résille de bois à l'étage façade~~ principale	Planche de bois
Isolation murs	Assemblage isolé complètement par l'extérieur	Assemblage avec isolation intégrée en les montants de bois
Charpente murs	2po x 4po	2po x 6 po
Contreventement	Contreplaqué ½ po	Panneau Sonoclimat ECO4 - 1 1/4po
Muret d'escalier intérieur	2po x 4po conventionnel avec contreplaqué formant caissons	Bloc de béton 7 ½ po épaisseur

Tableau 1 – Spécificité des pavillons – extrait des plans d'architecture
(Prendre note que les parements extérieurs, au final, sont identiques)

4. LA CONCEPTION DU PROJET

4.1 Orientation générale des pavillons



La rue Paquet est orientée sud-est (vers le bas), correspondant aux lignes vertes sur les cartes des courses du soleil. Les pavillons sont orientés suivant directement l'axe sud-est, permettant ainsi d'optimiser la fenestration « sud-est »pour capter le soleil du matin, contrairement à l'orientation plus « sud » préconisée généralement[13]. Les carrés rouge représentent les pavillons.

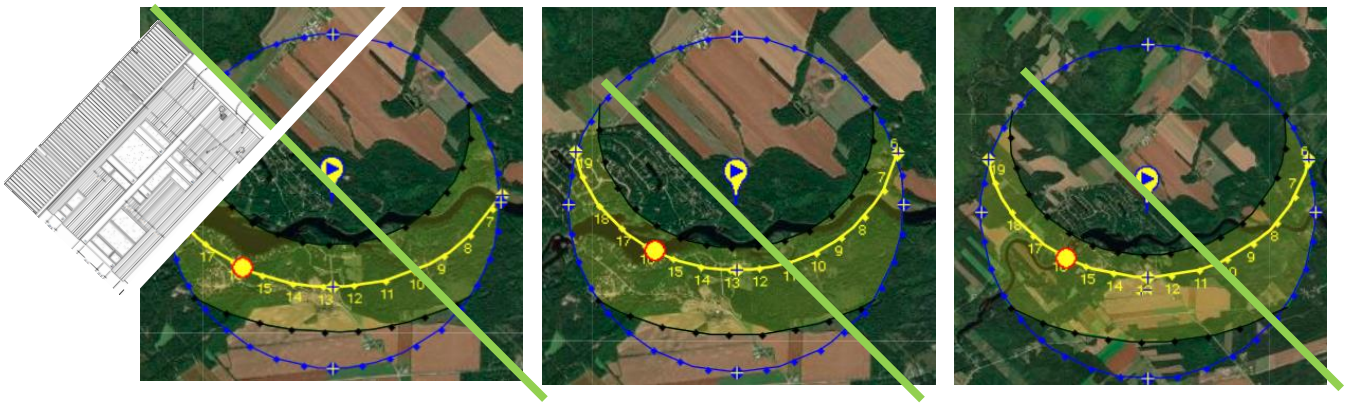


Figure 6 – Orientation générale du site et des pavillons, vue de la course du soleil le 20 septembre 2021, 20 janvier 2021, 20 avril 2022
Source : sunearthtools.com

4.2 Organisation du plan

La recherche réalisée en phase II tient non seulement compte de la performance attendue des enveloppes mais aussi du confort lié aux ambiances thermiques et aux ouvertures visuelles désirées sur toutes les façades, pour créer un effet d'immersion en forêt.

En rapport avec l'ambiance thermique, l'espace intérieur comprend un « puits » de ventilation permettant, par convection, de récupérer la chaleur résiduelle de la masse thermique de la dalle de béton et le transférer à l'étage supérieure. Ce type d'échange avait été discuté dès le départ avec l'équipe mécanique de LGT et s'est avéré efficace[14].

[13] Se référer au rapport de la phase I, alors que l'étude énergétique de rd2 démontrait qu'il était économiquement plus efficace de favoriser la captation du soleil du matin, alors qu'en après-midi il est courant de se retrouver en surchauffe. Le pavillon Le Pierrot (phase 1) vit effectivement dans cette situation en hiver, et il est orienté plutôt vers le sud.

[14] En fait, le chauffage des 2 chambres et de la salle de bain, qui donnent directement sur le puits, est assuré pour une grande partie du temps par la dalle du RDC, d'après les vérifications multiples faites en période hivernale 2021-2022.

En rapport avec les percées visuelles sur le boisé, un rétrécissement du corps central au RDC a permis d'optimiser les vues, sur pratiquement 360º, par les fenêtres. L'effet est certes réussi mais il diminue la compacité et la rentabilité des volumes. Au final, la volonté d'avoir des percées visuelles continues a prédominé sur la compacité des volumes. Mais cette décision n'a pas empêcher de faire une réflexion plus globale sur toute cette question de compacité, tel que discuté plus loin.

Figure 7 – photomontage plans et photos du pavillon 32 L'Hermine

4.3 Étude de compacité et autres calculs de dimensions

Le besoin d'intégrer une recherche complémentaire sur la compacité s'est développé de lui-même en regard d'une configuration articulée pour la réalisation des pavillons de la

phase II, par rapport au pavillon très simple, de forme majoritairement carrée, de la phase I. Cette réflexion s'est faite en deux temps, en cherchant d'abord à mieux définir la compacité[15], puis en procédant à une étude comparative entre différents bâtiments types.

La figure 8 suivante cherche à définir l'indice de compacité et ses conséquences, que ce soit en terme de limitation des surfaces de déperditions, en terme de configuration d'enveloppe, ou encore de diminution de quantité de matériaux et, implicitement, d'empreinte carbone.

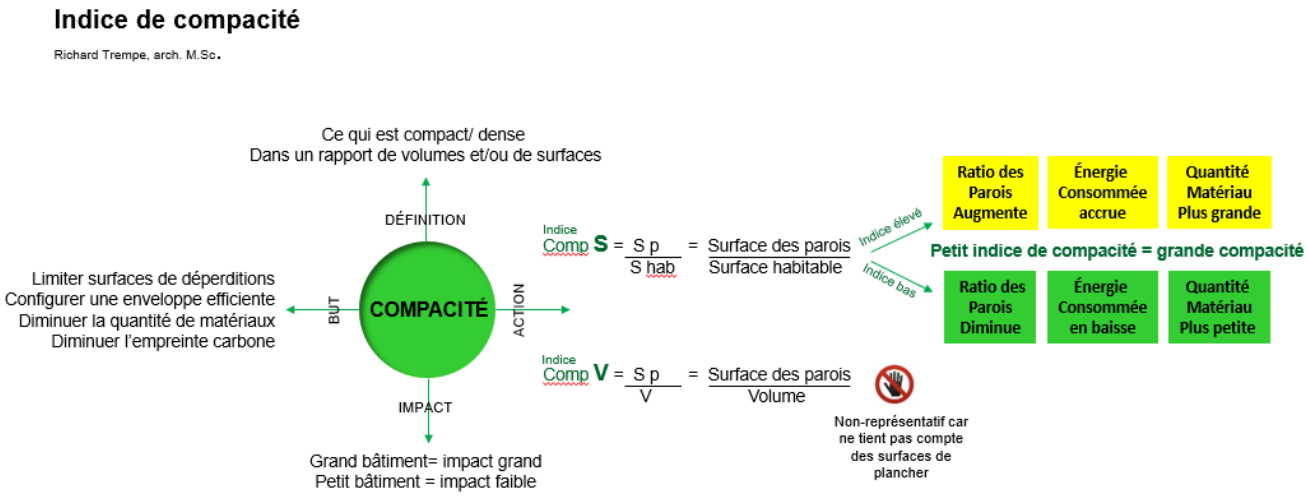


Figure 8 – Étude de l'indice de compacité (R.Trempe)

Dans un deuxième temps, les indications de la figure 8 ci-haut ont été appliquées sur 4 exemples, et différents calculs ont été faits en rapport aux configurations des murs, planchers et toits de même qu'en rapport aux ouvertures. On trouvera en annexe 1.5 l'ensemble des analyses faites. Ces analyses ne portent que sur les dimensions des éléments, sans égard aux matériaux ou à toute composition. Elles fournissent des pistes comparatives, entre les pavillons d'Auvergne et deux autres typologies de maisons bien documentées au Québec :

- La Sittelle et l'Hermine (phase II) ;
- Le Pierrot (phase I) ;
- **Le bungalow typique des années 1960 ;**
- **La maison du colon (maison typique subventionnée dans les années 1925).**

On notera que l'exercice de comparaison sur des petits bâtiments comme ceux ici analysés a moins d'impact que si l'analyse avait été faite sur de gros bâtiments. En bref, plus un volume est gros, plus l'impact de la compacité sera significative.

[15] Il existe dans la littérature sur le sujet une certaine confusion quant aux types de calculs de compacité et ce qu'ils peuvent représenter. La figure montrée ici constitue la démarche propre à l'auteur pour mieux représenter cet exercice de calcul.

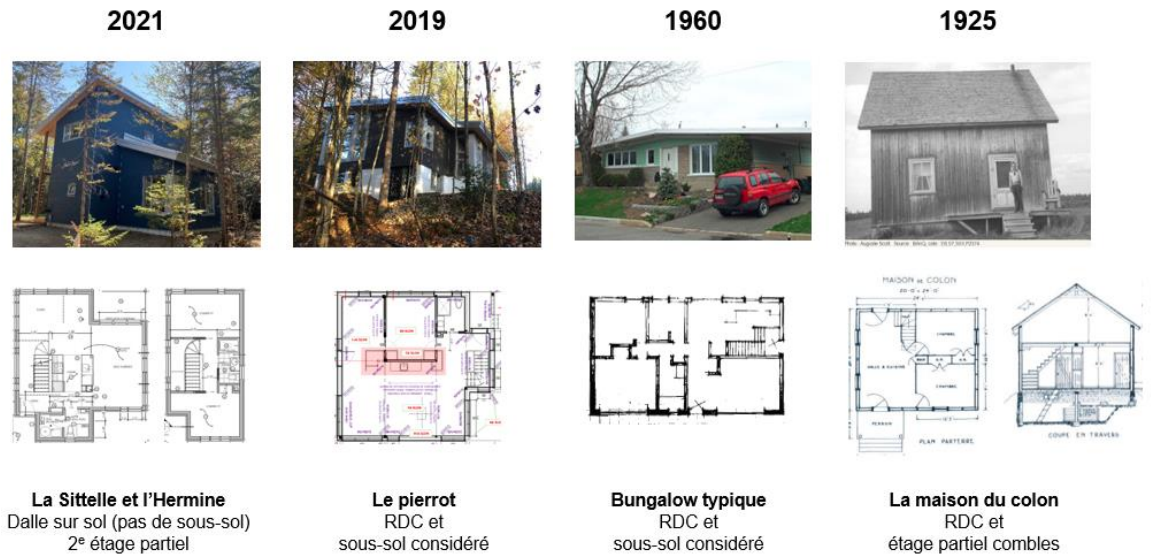


Figure 9 – les bâtiment qui ont servi à l'analyse comparative des volumes

On pourra consulter l'ensemble des informations tirées de cette analyse (annexe 1.5). Sommairement on retiendra les éléments qui suivent.

- <u>Quant au rapport entre l'épaisseur occupée par les parois murales de l'enveloppe et l'aire de plancher brute (projection horizontale)</u> :
  - Avec une superficie de plancher brute plus grande, le ratio des parois diminue ;
  - Avec une superficie de plancher plus simple (forme rectangulaire ou carrée), le ratio des parois diminue ;
  - L'impact d'un mur isolé par l'extérieur (SITE) comme La Sittelle <u>n'augmente pas</u> de façon significative le ratio car la superficie brute de plancher augmente (de 2%).

18%	18%	15%	11%	12%
Sittelle	Hermine	Le Pierrot	Bungalow	La maison du colon

- <u>Quant à la proportion des surfaces de murs par rapport aux surfaces de toitures</u> :
  - La toiture constitue une source accrue de déperdition thermique (plan horizontal ou incliné). Un rapport toiture/mur faible devrait être avantagé ;
  - La toiture constitue toutefois une surface facilement continue pour l'isolation, sans pont thermiques significatif et sans ouverture ;
  - L'optimisation de toitures simples constitue un avantage, et l'équilibre toiture/mur dépend de la configuration des éléments.

32%	32%	38%	43%	55%
Sittelle	Hermine	Le Pierrot	Bungalow	La maison du colon

- <u>Quant au rapport entre les surfaces des parois (murs et toitures) et le volume complet du bâtiment (**indice de compacité V**)</u> :

- Les grands volumes sont favorisés au détriment des volumes plus restreints ;
- L'indice de compacité par comparatif de volume n'est pas représentatif des conditions de rentabilité de surfaces habitables ;
- L'utilisation de l'indice de compacité par surface de plancher S est préférable ;

Sittelle	Hermine	Le Pierrot	Bungalow	La maison du colon
0,31	0,31	0,21	0,22	0,29

- Quant au Rapport entre les surfaces des parois (murs et toitures) et les projections brutes de plancher (**indice de compacité S**) :
  - En dépit d'une plus grande surface de plancher, Le Pierrot a un ratio plus faible, donc une proportion optimisée des surfaces des parois par rapport aux surfaces de plancher ;
  - Les zones non-utilisées comme les dégagées sur 2 étages (La Sittelle) ou un toit cathédrale (Le Pierrot) augmentent l'aire des parois, donc augmentent l'indice.

Sittelle	Hermine	Le Pierrot	Bungalow	La maison du colon
2,69	2,71	1,9	1,7	1,9

- Quant à la proportion des murs sous le niveau du sol délimitant des espaces habitables par rapport aux murs hors-sol :
  - Considérant l'isolation naturelle de la terre et l'étanchéité optimisée, l'exploitation d'un volume enfoui sous le sol, même partiellement (Le Pierrot, façade sud, dégagé en sous-sol) peut s'avérer judicieuse ;
  - Taux d'Infiltrométrie bas plus avantageux avec parties en sous-sol.

- Quant à la proportion d'ouverture et l'impact des périmètres d'ouverture :
  - Un petit rapport « périmètre / fenêtre » est plus efficace car il démontre une plus grande surface vitrée pour moins de périmètre. Des fenêtres grandes et carrées seraient à primer, alors que plusieurs petites fenêtres individuelles ont un effet contraire ;
  - Ce rapport n'a cependant aucun lien avec la quantité d'ouvertures ou leur positionnement ;

Sittelle	Hermine	Le Pierrot	Bungalow	La maison du colon
0,76		0,72	0,98	1,1

- Quant aux zones susceptibles de former un pont thermique :
  - Le total des jonctions comprend : mur/toit, mur/dalle ou plancher RDC, mur/dalle de fondation, angle de mur sortant, angle de mur entrant ;
  - Les bâtiments les plus articulés (La Sittelle – L'Hermine) contiennent évidemment le plus de jonctions ;
  - Rapport avec les aires de plancher : la configuration joue donc ici un rôle important ;

- Plus un bâtiment est petit, plus le rapport jonction / parois sera grand. Néanmoins, une forme simplifiée carrée (la maison du colon) sera malgré tout avantagée.

L'étude de compacité et des ratios de coins, de formes et de périmètres de fenêtres constitue un outil de conception permettant de cibler les points faibles d'une enveloppe, voire d'anticiper les ponts thermiques les plus significatifs. Un tel exercice peut permettre d'éviter des surprises au chantier et limiter les opérations typiques de colmatage à l'aveugle. Il permet de cibler les points faibles, dans l'esprit des nouvelles dispositions du Code de l'Énergie, qui initie dorénavant les notions de coefficients de déperditions thermiques linéaires et ponctuels, en ajout aux coefficients déjà considérés de déperditions surfaciques.

4.4 Autres critères de performance

Tout comme le projet de la phase I, La Sittelle et L'Hermine intègrent dans l'approche de conception divers éléments en lien avec des paramètres à caractère bioclimatique. Nous reprenons ici certains éléments, tirés du tableau 4 du rapport de 2020.

Critères de performance identifiés	Actions entreprises
Implantation du bâtiment	Les pavillons sont implantés dans un environnement boisé semi-intense, avec clairière crée par le champs d'Épuration du côté sud-est, maximisant ainsi l'apport de lumière.
Orientation du bâtiment	- Orientation SE soit l'exposition considérée comme optimale pour les gains solaires en période hivernale
Volume du bâtiment	- La question de compacité a été mise de côté au profit des percées visuelles créant un volume plus articulé mais avec un indice de compacité plus élevé.
Hauteur et profondeur des aires de vie	- Optimisation afin de pouvoir emmagasiner le maximum de gain solaire en hiver[16]
Séparation des aires de jour et de nuit selon l'orientation	- Aires d'utilités localisées le long de la façade nord ou du côté Est à l'étage.
Entrée du pavillon à l'abri du vent	- Entrée protégée, côté Est, à l'abri des vents dominants de l'Ouest.
Protection contre la surchauffe et optimisation des gains solaires l'hiver	- Incorporation de larges bordures d'avant-toit limitant la pénétration du soleil à l'étage. - Utilisation du verre triple[17].
Aération naturelle	- Position stratégique des volets ouvrants aux endroits permettant un renouvellement d'air naturel traversant.
Protection des façades contre l'eau	- Protection maximale par les bordures d'avant-toit. Aucune tête de fenêtre de l'étage n'est exposée à la pluie, même lors de fortes pluies poussées par le vent.

Tableau 2 – Intégration de certains critères de performance dans le projet

[16] Le projet a incorporé le concept de l'inertie thermique dans le choix de certains matériaux, ce point sera discuté dans les parties suivantes.
[17] Le verre triple a été utilisé de façon unilatérale. Toutefois, il est probable que l'usage de verre double aux parties les plus ensoleillées du côté sud-est ait pu contribuer à optimiser les gains solaires (équation gain *vs* surchauffe).

4.5 Détails, simulation et calcul des résistances thermiques

4.5.1 Calcul de la résistance thermique effective

La résistance thermique des assemblages a été calculé par Richard Trempe et révisée par Denis Bourgeois, pour les fins de calcul d'efficacité énergétique. Les tableaux des annexes 1.3 (murs) et 1.4 (toiture) détaillent chacun des éléments. On trouvera au tableau qui suit le sommaire des calculs. Chaque assemblage tel que réalisé et chaque assemblage des différents scénarios envisagés rencontrent les exigences Novoclimat, et dépassent par le fait même les exigences minimales du code de construction CCQ2010 (partie 11).

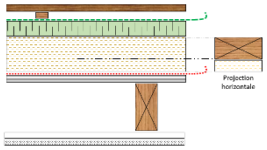
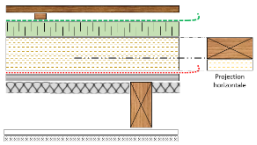
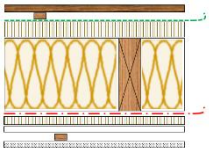
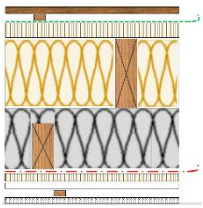
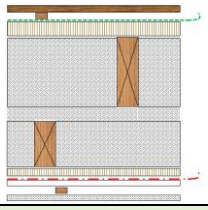
Ref	Assemblage	Calcul Reff (m2 • s / W)	Calcul Reff (impérial)	Commentaires
1A		RSI 4,44	R25.2	Il s'agit de la paroi réalisée à La Sittelle
1B		RSI 5,02	R28.5	Augmentation de Reff de 12% en isolant partiellement entre les montants
2A		RSI 4,72	R26.6	La paroi isolée réalisée de L'Hermine (2A) serait légèrement plus efficace que celle de la Sittelle (1A), de 4%
2B		RSI 6,78	R38.5	La double ossature apporte une augmentation du Reff, passant de 4.72 à 6.78 (augmentation de 30%). Matériel/main d'œuvre et affectation au plancher à considérer dans l'étude
2C		RSI 6,63	R37.6	Le remplacement du chanvre/fibre de roche (2B) par de la cellulose (2C) n'a pas d'incidence significative sur la résistance thermique effective
	Comparatif Partie 11 Code de construction (2010)	RSI 3,7	R21.0	1A : Reff 16% plus élevée 2A : Reff 21% plus élevée
	Comparatif Novoclimat (2014)	RSI 4,14	R23.5	1A : Reff 7% plus élevée 2A : Reff 12% plus élevée

Tableau 3 – Sommaires des résistances thermiques effectives des divers scénarios

Quant à la toiture, la résistance thermique effective a été calculé à RSI 7,28 (R41.52), avec comme référence la valeur de Novoclimat de RSI 7,22 (R41). On prendra note que la composition de toiture est similaire à celle qui avait été utilisée au premier pavillon Le Pierrot (projet de recherche phase I), avec en sus pour les deux nouveaux pavillons un rehaussement, pour créer une cavité aérée continue de 38 mm.

On rappellera que de déterminer la Reff des composantes par simple calcul analytique constitue en fait une approximation. À cet égard, et compte tenu des types assemblages relativement complexes utilisés ici pour certains scénarios, les charpentes pourraient influencer les résultats de diverses façons, et possiblement à la baisse[18]. À cet égard, la double-ossature (2B/2C), qui représente incontestablement la voie la plus intéressante en terme de rendement thermique, contient un certain nombre d'éléments traversants non-désirables en bois, donc (un peu plus) conducteurs, aux angles de soutien, si l'on compare par exemple avec le mur SITE (2A), dont la charpente est totalement recouverte d'isolant par l'extérieur.

4.5.2 Simulation des détails

La simulation vise essentiellement à guider la conception des détails en lien avec le comportement hygrothermique de l'enveloppe, afin de prévenir les risques de condensation, de développement fongique et de corrosion. La simulation des assemblages a été faite au fur et à mesure que les détails de construction se raffinaient, suivant des allers-retours « détail/simulation ». La simulation a été réalisée par Luca Ferrara, CPI, chargée de projets de la firme UL. La même firme avait procédé aux simulations de la phase I du projet. On trouvera en annexe 2 le rapport complet de UL, daté du 13 mai 2021. Les parties en italiques ici-bas ont été tirées intégralement du rapport.

Essentiellement la simulation se définit ainsi :

> *Le logiciel WUFI Pro permet de simuler, sur plusieurs années, le transfert transitoire unidimensionnel de chaleur et d'humidité dans une composition d'enveloppe modélisée. Pour ce faire, le logiciel prend en compte plusieurs facteurs influençant les performances hygrothermiques d'une composition d'enveloppe, tels que son orientation et son angle d'inclinaison, la quantité de pluie et de rayonnement solaire qu'elle reçoit selon le moment de l'année et sa localisation géographique, les variations de l'humidité relative ambiante extérieure et intérieure selon le climat et le niveau d'occupation de l'édifice, les variations des propriétés thermiques et pare-vapeur des matériaux selon leur température et leur teneurs en eau, etc.*

Les simulations ont porté sur 5 scénarios (3 pour les murs et 2 pour la toiture) :

[18] Le calcul analytique comprend des imprécisions d'autant plus grandes avec la présence de plus d'une zone non-homogène (plans discontinus d'isolation). Idéalement des simulation numérique (ASHRAE RP-1365) seraient requises pour l'évaluation plus exacte des double-ossatures.

Murs extérieur[19] :

Scénario 1A Mur SITE tel que réalisé La Sittelle (pavillon 31)
Scénario 1B Mur SITE avec l'isolant partiel entre les montants de bois (non-réalisé)
Scénario 2A Mur SIPE conventionnel tel que réalisé L'Hermine (pavillon 32) – indiqué « 2 » au rapport

Toitures :

Scénario T1 Toiture complètement isolé par l'extérieur, avec aération, tel que réalisée sur les deux pavillons
Scénario T2 Toiture avec isolation entre les fermes (non-réalisé)

Les simulations ont porté sur une période d'analyse de 10 ans, avec une orientation nord-est, afin de prendre en compte les conditions les plus sévères pour la région de Québec (Sainte-Christine-d'Auvergne n'est pas incluse dans le choix des localités). On doit aussi considérer que les mouvements d'air ne sont pas pris en compte dans la simulation[20].

1 Exemples d'études d'assemblages variées en cours de conception

Le rapport UL contient les résultats des assemblages finaux qui auront été utilisés lors de la construction. Toutefois, de nombreuses simulations préalables, avec tous les scénarios et diverses variantes ont été analysés. Les tableaux ci bas en montrent quelques exemples (se référer au rapport UL pour l'explicatif des différents paramètres). Les lettres en rouge se rapportent à des notes en page suivante.

Tableau 4 -Mur 1A / Humidité initiale (sans infiltration d'eau) / 40% HR intérieur en hiver / tel que réalisé

Composante	Température		Teneur en eau maximale atteinte		Humidité relative (moyenne sur 30 jours) maximale atteinte et nombre de jours par année où cette moyenne sur 30 jours dépasse 80% (%)				Index de moisissure (selon les critères spécifiés dans le ASHRAE 160 2016)	
					Surface ext.		Surface int.			
	Surface ext.	Surface int.	% de la saturation normale des pores du matériel (relatif à la porosité du matériel)	Date	%	Nombre de jours	%	Nombre de jours	Index max. surface ext.	Index max. surface int.
Parement de bois	-33.6	-31.6	20.8%	2020-10-01 7:00	90.1	87.7	89.8	21.1	0.1	0.2
Pare-vent/pare-pluie Tyvek	-29.7	-29.7	0.4%	2020-10-03 14:00	86.3	8.4	87.7	13.9	0.0	0.0
EPS	-29.6	-17.0	0.0%	2020-10-18 7:00	88.1	13.9	90.2	1.8	0.0	0.0
Polyisocyanurate	-14.0	14.7	0.2%	2020-10-01 0:00	88.5	1.4	63.9	0.0	0.0	0.0
Pare-air/pare-vapeur	14.8	14.8	0.4%	2020-10-01 2:00	a 67.5	0.0	b 92.4	2.8	0.0	0.1
Contreplaqué	14.8	17.0	27.4%	2020-10-01 0:00	92.5	3.0	78.2	0.0	c 0.8	0.1
Gypse	19.1	19.7	2.8%	2020-10-01 0:00	71.0	0.0	70.8	0.0	0.0	0.0

Tableau 5 (partiel) - Mur 1B avec fibre de roche (partiel) entre montant et variation EPS / grande humidité initiale (sans infiltration d'eau) / 40% HR intérieur en hiver

Composantes	Température				Teneur en eau n			Humidité relative (moyenne sur 30 jours) maximale atteinte et nombre de jours par année où cette moyenne sur 30 jours dépasse 80% (%)								Index de moisissure (selon les critères spécifiés dans ASHRAE-160 2016)			
								Surface extérieure				Surface intérieure							
	Surface ext.		Surface int.		% de la saturation des pores du matériel (relatif à la porosité du matériel)			%		Nombre de jours		%		Nombre de jours		Index max. surface extérieure		Index max. surface intérieure	
	1.5" EPS	2" EPS	1.5" EPS	2" EPS	1.5" EPS	2" EPS	1.:	1.5" EPS	2" EPS	1.5" EPS	2" EPS	1.5" EPS	2" EPS	1.5" EPS	2" EPS	1.5" EPS	2" EPS	1.5" EPS	2" EPS
Parement de bois	-33.6	-33.6	-31.7	-31.7	20.8%	20.8%	2020-	90.0	90.0	87.4	88.3	89.8	89.8	21.4	21.4	0.1	0.1	0.2	0.2
Pare-vent/pare-pluie Tyvek	-29.6	-29.7	-29.6	-29.6	0.4%	0.4%	2020-1	85.9	86.0	9.9	10.3	86.7	86.8	15.0	15.1	0.0	0.0	0.0	0.0
EPS	-29.5	-29.6	-16.6	-12.5	0.0%	0.0%	2020-	87.0	87.2	15.1	15.2	83.5	83.1	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0
Polyisocyanurate	-14.7	-10.4	3.6	7.0	0.2%	0.2%	2020-	82.2	81.6	0.3	0.2	66.6	65.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pare-air/pare-vapeur	3.7	7.1	3.7	7.1	0.5%	0.5%	2020-	73.9	73.8	0.0	0.0	95.2	93.6	272.4	218.5	0.0	0.0	2.1	0.3
Contreplaqué	3.8	7.2	6.0	9.4	27.5%	27.4%	2020-	a 95.3	93.6	274.6	241.9	b 1.0	87.9	268.1	51.6	c 3.8	1.9	2.7	0.7
Rockwool	7.0	10.5	16.2	16.3	0.2%	0.2%	2020-	88.7	84.9	263.1	14.7	75.2	73.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Gypse	19.3	19.2	19.7	19.7	2.77%	2.77%	2020-	72.4	71.2	0.0	0.0	70.8	70.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

[19] Les trois scénarios de murs correspondent à ceux déjà énumérés dans ce rapport : 1A, 1B et 2A. Les scénarios 2B et 2C n'ont pas été simulés.

[20] Il existe des simulations de type thermodynamique qui prennent en compte les mouvements d'air mais elles sont encore assez rares dans l'industrie en raison des coûts prohibitifs.

L'ajout d'isolant entre les montants (mur 1B) constitue à priori une avenue intéressante, permettant d'améliorer le confort tout en comblant partiellement les creux créés par la charpente, en améliorant possiblement aussi l'acoustique, et permettant au final de rentabiliser un espace vide. Toutefois, avec la simulation, on voit l'impact que représente l'ajout d'isolant entre les montants, et ce même en une très petite quantité (38mm), pour un système de type SITE. On remarquera sur les tableaux que :

a) Au mur 1A, le contreplaqué côté extérieur atteint des taux élevés de 92.5% sur 3 jours seulement, alors que pour le mur 1B de 241 jours (avec EPS de 50mm) et même 274 jours (EPS de 38mm) **;**

b) Du côté intérieur, aucun problème n'est envisagé pour le mur 1A, alors que pour le mur 1B, la durée d'humidité dépassant le 90% atteint 268 jours (EPS 38mm) ou 52 jours (EPS 50mm)

c) Le risque de contamination fongique est réel pour le mur 1B à 3.8 (avec EPS 38mm, alors que le maximum indiqué dans ASHRAE-160 est de 3).

Cette analyse sommaire met en évidence le risque d'incorporer un isolant du côté intérieur, soit du côté chaud du plan d'étanchéité à la vapeur d'eau. Le risque est d'autant plus grand lorsque l'on diminue l'épaisseur d'isolant extérieur EPS, déplaçant ainsi, par le fait même les zones du point de rosée (car on isole moins par l'extérieur, le mur est donc plus froid en profondeur). Des tentatives ont été faites pour optimiser l'espace perdu entre les montants, mais aucune solution viable n'a été trouvée.

Tableau 6 (partiel) - Toiture T1 / grande humidité initiale / cavité ventilée[21] / 40% HR intérieur en hiver / double-ossature[22] / tel que réalisé

Composantes	Température				Teneur en e			Humidité relative (moyenne sur 30 jours) maximale atteinte et nombre de jours par année où cette moyenne sur 30 jours dépasse 80% (%)								Index de moisissure (selon les critères spécifiés dans ASHRAE-160 2016)			
								Surface extérieure				Surface intérieure							
	Surface ext.		Surface int.		% de la saturation des pores du matériel (relatif à la porosité du matériel)			%		Nombre de jours		%		Nombre de jours		Index max. surface extérieure		Index max. surface intérieure	
	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH		5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH
Membrane toiture	-31.7	-31.8	-31.7	-31.8	2.6%	2.0%	2	00	89.0	88.3	8.8	7.6	96.7	95.1	26.3	22.2	0.0	0.0	0.1	0.1
Contreplaqué extérieur	-31.7	-31.7	-30.4	-30.6	24.6%	24.6%	2	00	99.4	99.1	27.2	23.1	94.5	85.6	23.2	9.9	1.6	1.0	0.5	0.1
Pare-vent/pare-pluie Tyvek (3000 ng/Pasm2)	-29.2	-29.4	-29.2	-29.4	0.6%	0.5%	20	00	90.8	81.3	22.2	1.6	d 91.1	81.7	22.4	3.9	0.0	0.0	d 0.0	0.0
Isolant chanvre	-29.2	-29.4	-17.8	-18.0	53.5%	51.4%	20	00	e 91.4	82.0	22.5	4.5	95.0	95.0	65.2	56.9	0.3	0.1	2.7	2.2
Polyisocyanurate	-14.8	-14.9	19.0	19.0	0.2%	0.2%	2	00	94.7	94.7	56.8	45.3	81.9	80.2	4.7	1.8	0.3	0.2	0.0	0.0
Pare-vapeur/pare-air	19.1	19.1	19.1	19.1	0.5%	0.5%	2	00	78.8	77.5	0.0	0.0	87.6	87.6	1.1	1.1	0.0	0.0	0.1	0.1
Contreplaqué	19.1	19.1	19.2	19.2	27.4%	27.4%	2	00	87.7	87.8	1.2	1.2	70.4	70.4	0.0	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0

Tableau 7(partiel) - Toiture T2 / grande humidité initiale / cavité ventilée / 40% HR intérieur en hiver / fermes comblées

Composantes	Température				Teneur en ea			Humidité relative (moyenne sur 30 jours) maximale atteinte et nombre de jours par année où cette moyenne sur 30 jours dépasse 80% (%)								Index de moisissure (selon les critères spécifiés dans ASHRAE-160 2016)			
								Surface extérieure				Surface intérieure							
	Surface ext.		Surface int.		% de la saturation des pores du matériel (relatif à la porosité du matériel)			%		Nombre de jours		%		Nombre de jours		Index max. surface extérieure		Index max. surface intérieure	
	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH		5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH	5 CAH	50CAH
Membrane de toiture	-31.2	-31.5	-31.2	-31.5	2.9%	2.2%	20	f 88.9	88.3	22.5	7.9	96.8	95.3	73.6	22.4	0.0	0.0	0.1	0.1
Contreplaqué extérieur	-31.2	-31.4	-29.9	-30.2	24.6%	24.6%	20	99.5	99.2	137.4	23.5	94.8	87.0	222.1	57.5	1.9	1.0	1.1	0.2
Pare-vent/pare-pluie Tyvek (3000 ng/Pasm2)	-28.5	-28.9	-28.5	-28.9	0.7%	0.5%	20	g 90.8	83.9	220.9	45.1	91.6	86.0	233.9	62.5	0.0	0.0	h 0.1	0.0
Panneau fibre de bois	-28.4	-28.9	-26.7	-27.2	39.5%	22.1%	20	92.1	87.3	239.5	87.9	94.6	93.7	259.6	198.7	1.2	0.1	2.3	0.8
Cellulose	-26.0	-26.5	18.1	18.1	1.2%	1.1%	20	94.0	93.6	259.9	198.3	78.3	72.1	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0
Membrane hygrovariable	18.1	18.1	18.1	18.1	88.0%	88.0%	20	77.3	71.9	0.0	0.0	75.0	73.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Panneau fibre de bois	18.2	18.1	19.2	19.2	22.1%	22.1%	20	75.0	75.0	0.0	0.0	71.6	71.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1
Gypse	19.6	19.6	19.6	19.6	2.77%	2.77%	20	70.9	70.3	0.0	0.0	70.4	70.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

[21] Les tableaux montrent les résultats avec respectivement 5 CAH et 40 CAH.
[22] Prendre note que le tableau détaille les matériaux intérieurs jusqu'au contreplaqué. Les fermes en-dessous font partie de « l'environnement intérieur » pour la simulation et ne sont pas nommées ici.

L'utilisation de l'espace des fermes préfabriquées pour isoler, comme dans la toiture T2, constitue une pratique courante, contrairement à la double ossature utilisée pour la toiture T1. Néanmoins, on remarquera que :

d) Le matériau dans T1 avec un potentiel d'humidité élevé, sur un nombre de jour élevé, est le chanvre, avec un indice de contamination fongique de 2.7 (près du seuil critique de 3). Le chanvre est toutefois situé ici dans l'environnement « extérieur » aux plans d'étanchéité, donc avec un potentiel d'assèchement réel ;

e) Toujours pour T1, le polyisocyanurate recouvre aussi des périodes à haut risque d'humidité, mais encore ici dans l'environnement « extérieur » ;

f) À l'opposé, pour le toit T2, à partir du contreplaqué jusqu'aux matériaux situés du côté intérieur aux plans d'étanchéité, les taux d'humidité sont élevés et le nombre de jours tout autant ;

g) Les panneaux de fibre de bois et la cellulose, deux matériaux plus vulnérables aux conséquences de la condensation, ont des taux appréhendés élevés d'humidité ;

h) Bien que l'indice de contamination soit ici de 2.3, soit en deçà du seuil de 3.0, il s'agit ici d'une condition intérieure, avoir moins de possibilité d'assèchement.

Le toit T1 ne présente que peu de risque de dommages internes, alors que le toit T2 semble comporter certains risques, en dépit de l'utilisation prévue d'une membrane hygrovariable faisant office de frein vapeur. En outre, ces premières analyses avaient été faites sans considérer des accidents (infiltrations d'eau), conditions qui pourraient fragiliser la performance du toit T2.

Jumelé aux autres avantages que procure le toit T1, dont le chevauchement facile des membranes aux jonctions, la toiture T1 a été retenue pour les deux pavillons.

Ce type d'assemblage constitue une amélioration apportée au premier design du toit de pavillon réalisé en phase I.

2 Analyse détaillée des murs 1A et 2A[23] utilisés pour la réalisation des pavillons

Toutes les simulations dans le rapport de UL ont été réalisées suivant quatre conditions, soit :

CAS 1 Une humidité initiale donnée (normée) sans infiltration d'eau (EMC80) HR40%
CAS 2 Une humidité initiale doublée, toujours sans infiltration d'eau (EMC80X2) HR40%
CAS 3 Une humidité initiale doublée, toujours sans infiltration d'eau (EMC80X2) HR50%
CAS 4 Une humidité initiale doublée, avec infiltration d'eau (EMC80X2) HR50%

Nous avons extrait les commentaires du rapport UL afin de permettre un comparatif direct entre les deux murs 1A et 2A, soit ceux qui ont été développés et sélectionnés pour la construction des pavillons.

[23] Le rapport de simulation réfère au mur « 2 » mais il s'agit bien du mur qui est nommé « 2A » dans le présent document, soit le mur utilisé pour le pavillon L'Hermine (32).

Cas	Pavillons 31 La Sittelle **Mur 1A – mur isolé à l'extérieur SITE**	Pavillon 32 L'Hermine **Mur 2A – mur de type conventionnel SIPE**
1	*Les risques de problèmes reliés à l'humidité dans la composition murale sont donc très faibles. […]* *En considérant la présence de grands débords de toiture (qui protègent les murs extérieurs) ainsi que l'emplacement des bâtiments (dans une zone densément boisée), nous sommes d'avis que de faibles quantités d'eau s'infiltreront dans la cavité extérieure.* *Les indices de croissance fongique demeurent théoriquement nuls (zéro) pour chaque composant de l'assemblage murale 1A.*	*Les indices de croissance fongique demeurent théoriquement nuls (zéro) pour chaque composant de l'assemblage murale 2A.* *Voir commentaires de gauche (mur 1A) de nature similaire.*
2	*En comparaison avec le cas 1 (ci-haut), les indices de croissance fongique demeurent similaires ou sont très légèrement augmentés pour quelques composants.* *Toutefois, ces indices restent largement sous la valeur de trois (3), la limite établie par la norme ASHRAE 160-2016*	*En ce qui concerne les indices de croissance fongique, bien que les valeurs aient augmenté par rapport au cas 1, elles demeurent néanmoins sous la limite de 3. La possibilité de formation de moisissure est donc théoriquement faible ou inexistante selon le matériel.* *Il est important de tenir en compte le fait que l'isolant en chanvre a une bonne gestion de l'humidité de plus qu'une bonne résistance à la formation de moisissure. L'isolant en laine de chanvre a la capacité d'absorber le surplus d'humidité dans l'air ambiant en temps humide et de le repousser en temps plus sec.*
3	*[…] L'humidité relative intérieure en hiver est augmenté de 40% à 50%. Cette hausse de l'humidité relative intérieure impacte minimalement les résultats des simulations.* *Les risques de corrosion des éléments métalliques et les risques de croissance fongique demeurent donc très similaires à ceux du cas 2.* *Il est donc théoriquement possible d'avoir une humidité relative intérieure minimale de 50% sans affecter la performance hygrothermique de l'enveloppe verticale.*	*Avec l'augmentation de l'humidité relative en hiver (de 40% à 50%), les risques de corrosion des éléments métalliques augmentent au niveau du pare-vent/pare-pluie et à la surface extérieure du panneau de fibre de bois. Ces risques n'étaient présents que lors des deux ou trois premières années de simulation avec le cas 2.* *[…] Selon les résultats du cas 3, ces risques sont présents en permanence lors des dix années de simulation. Pour les autres composants, les risques demeurent similaires à ceux du cas 2.* *Les risques de croissance fongique sont aussi similaires à ceux du cas 2*

4	*Pour ce cas, une cavité mal ventilée et drainée, où l'eau des pluies peut s'infiltrer et se déposer sur le pare-intempérie Tyvek, a été simulée. Ce cas a été simulé afin d'examiner les résultats lors d'un scénario plus catastrophique* *[…] Tout de même, en considérant que l'eau pluviale pénètre la cavité murale extérieure et atteint le pare-intempérie, les risques liés aux problèmes d'humidité sont relativement faibles* *Toutefois, la majorité de la composition murale (de la surface extérieure du polyisocyanurate jusqu'en surface intérieure du gypse) démontre de faibles risques ou même aucun risque de corrosion des éléments métalliques. Ces faibles risques de corrosion, présents de la surface extérieure du polyisocyanurate à la surface extérieure du contreplaqué, ne sont présents que lors de la première année en service. Ce qui démontre encore une fois une bonne capacité d'assèchement intramurale.* *Les risques de croissances fongiques sont augmentés lorsque comparés aux autres cas. Toutefois, les indices de croissance fongique ne dépassent pas la limite de trois (3) exigée par la norme ASHRAE 160-2016, ce qui indique qu'il n'y a théoriquement pas de risques de développement de moisissure*	*Selon les résultats, des risques de développement de moisissure sont possibles au niveau de la surface intérieure du parement de bois24 et à la surface extérieure du panneau fibre de bois extérieur.* *Il serait donc important que ces matériaux soient de grade extérieur (traités contre la moisissure) afin de diminuer les possibilités de croissances fongiques.* *Toutefois, comme mentionné auparavant, nous pensons que ce cas est le moins réaliste de tous les cas simulés. Par conséquent, si la cavité murale extérieure est bien ventilée et bien drainée, il devrait théoriquement y avoir des risques très minimes de développement de moisissures* *Les risques de corrosion des éléments métalliques sont encore une fois augmentés par rapport aux autres cas.* *La possibilité de corrosion demeure constante (au cours des dix années de simulation) de la surface extérieure du parement de bois à la surface extérieure de l'isolant en chanvre.* *Il serait envisageable que les éléments métalliques insérés dans la composition murale, surtout du côté extérieur de l'isolant en chanvre, soient traités contre la corrosion*

Tableau 8 – Tableau comparatif des murs extérieures 1A et 2A

3 Commentaires généraux en lien avec le choix des murs 1A et 2A

Le rapport UL est d'avis que, dans le cas du mur 1A (mur SITE pavillon 31 La Sittelle) : […] *généralement, selon les résultats des simulations, la composition murale 1A démontre théoriquement une bonne performance hygrothermique. Les risques de problèmes liés à l'humidité sont relativement faibles grâce au bon pouvoir d'assèchement vers l'intérieur de cette composition*.

Quant au mur 2A (mur conventionnel pavillon 32 L'Hermine), on y indique que : […] *les risques de corrosion et de croissance fongique augmentent. Le parement de bois extérieur serait à risque de corrosion. En ce qui concerne les autres composants à risque de corrosion, les teneurs en humidité diminuent avec les temps (entre une à trois années), démontrant encore une fois une bonne capacité d'assèchement. Selon les résultats des simulations, la composition murale 2 démontre théoriquement une performance hygrothermique adéquate, surtout lorsque les teneurs d'humidité initiale sont faibles. Il serait toutefois bénéfique que les matériaux de cette composition murale soient bien protégés et gardés au sec lors de la construction de l'édifice*.

Les simulations démontrent que tant le mur 1A que le mur 2A constituent des assemblages en théorie performants. En dépit du fait que certains risques plus élevés de

désordres apparaissent aux résultats pour le mur 2A, ce sont des cas extrêmes (CAS 4) avec de l'infiltration d'eau liquide dans les parois. À cet égard, tant le choix des matériaux (tel que le chanvre aux bonnes capacités d'assèchement) que les transferts hygrothermique (frein vapeur favorisant l'assèchement) réduisent significativement ces risques.

Quant à la toiture, la composition à double ossature isolée par l'extérieur apparait être un assemblage durable et performant : *La composition de toiture T1 a une assez bonne capacité d'assèchement avec le temps. Les résultats des simulations nous démontrent que les risques de corrosion des éléments métalliques sont généralement faibles, avec l'exception de risques élevés à la jonction de l'isolant en chanvre et du polyisocyanurate. Tous les risques de corrosion sont toutefois réduits après une année (pour les risques faibles) ou deux années (pour les risques plus élevés) du bâtiment en service. Le revêtement de toiture est en acier galvanisé et est donc protégé contre la corrosion. Selon les simulations, ce revêtement n'est théoriquement jamais à risque élevé de corrosion.*

4.5.3 Développement des détails de construction

Certains détails de construction, tirés des plans d'architecture, ont été reproduits en annexe 1.1. L'élaboration des détails s'est faite de façon simultanée avec la simulation, et certaines données de base étaient déjà aussi fournies au même moment par rd2 (efficacité énergétique). Cet exercice d'*essais, questionnements et retours* est très pertinent dans une optique d'optimisation des détails.

Un des critères de design des détails repose sur la simplification recherchée des plans d'étanchéité. Une étude comparée ici entre le mur SITE à gauche (La Sittelle, pavillon 31) et le mur conventionnel de type SIPE à droite (L'Hermine, pavillon 32) montre des distinctions significatives : une seule étape principale d'étanchéité (si l'on met de côté le pare-pluie et le pare-intempérie), du côté gauche (SITE) serait à priori souhaitable.

Mais une seule étape pour tous les plans continus est certes intéressante, en autant qu'elle puisse être faite de manière parfaite : une brèche, un pli ou une membrane discontinue, et à la fois les protections contre l'eau, l'air et la vapeur d'eau en seront affectés.

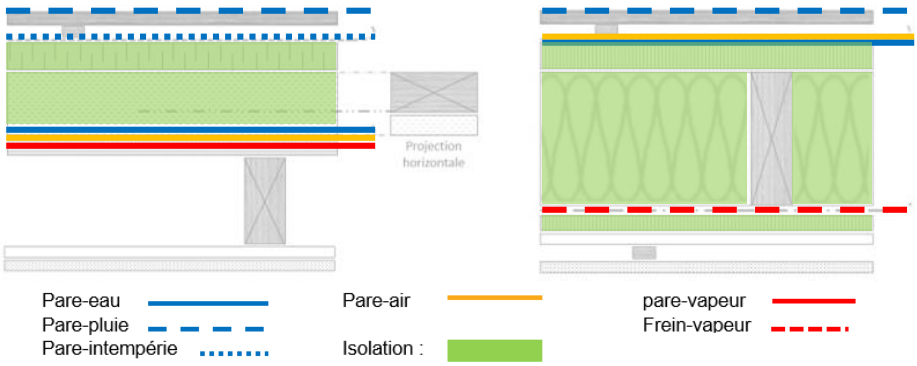


Figure 10 - Position des plans d'étanchéité et autres éléments secondaires

La question des plans d'étanchéité se complexifie toujours aux jonctions, alors que plus souvent qu'autrement, l'usage de « bouche-trous » est utilisé, en pulvérisant de l'isolant afin de tenter de réaliser des barrières continues contre les fuites d'eau, d'air et/ou de vapeur d'eau. Les détails ici-bas montrent une telle situation, à la rencontre des pare-vapeur / pare-air du haut de mur et de la rive de toit. Peu importe l'approche SITE ou SIPE, de tels détails surviennent. La situation montrée ici et ne constitue pas une approche optimisée de l'enveloppe : tout mouvement de charpente ou de matériaux fera de ces zones les points les plus vulnérables. Ce type de détail est à limiter car il demande une gymnastique aux installateurs, d'où le risque accru de défaillance en service. On verra à l'étape de la construction comme ce détail fut simplifié et amélioré.

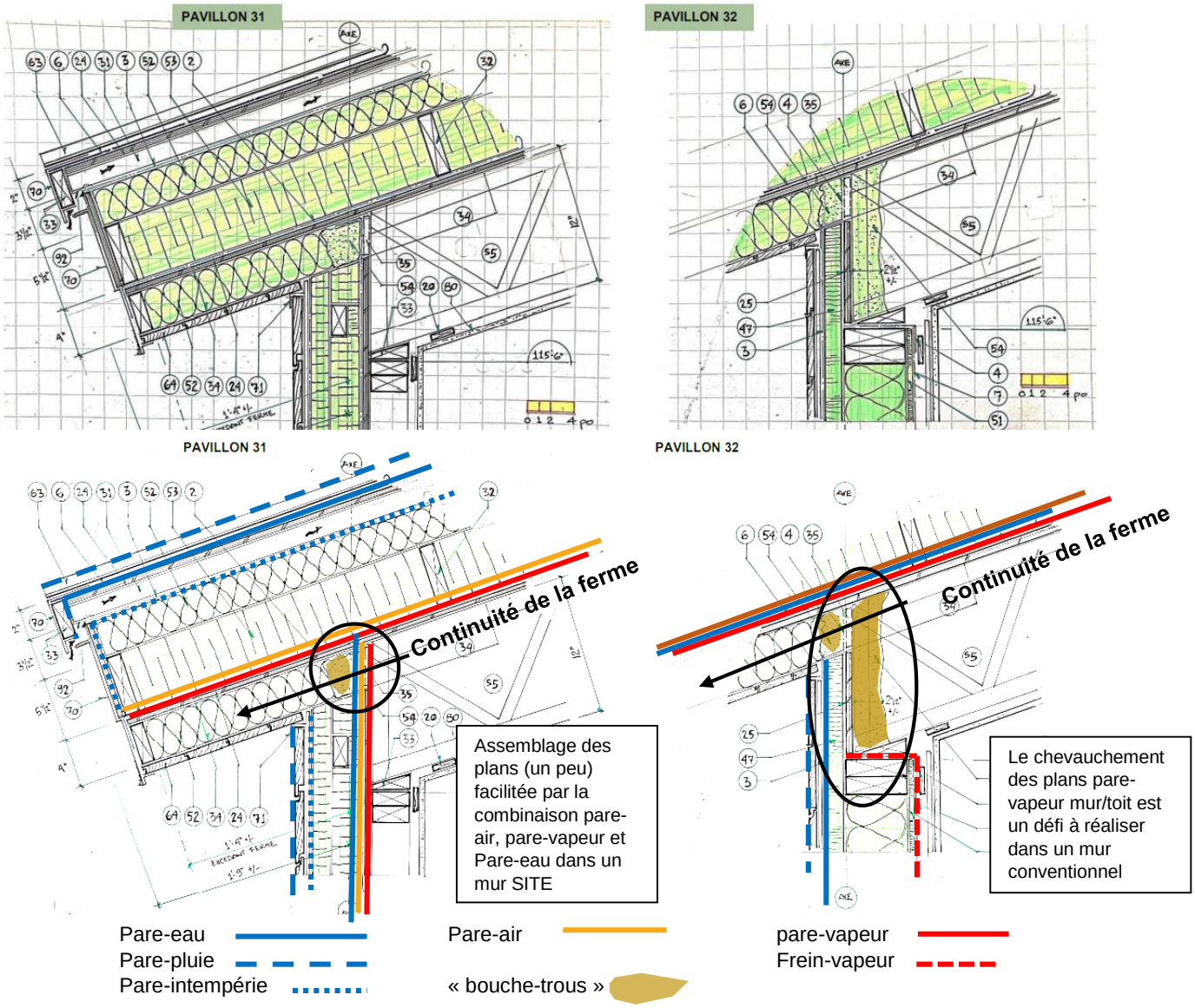


Figure 11 – Positionnement des plans d'étanchéité sur un détail typique et problèmes aux jonctions

4.5.4 Commentaires sur les matériaux utilisés

Certains matériaux ont été sélectionnés pour le projet en raison de certaines propretés recherchées, dont en autres :

1. Le polystyrène expansé EPS est largement utilisé dans le projet, en raison de sa faible empreinte environnementale (billes gonflées et 97% d'air) et aussi de sa bonne performance en condition mouillée (fondations sous le sol) ;

2. Le polyisocyanurate, jumelé à un isolant fibreux de roche ou de chanvre constitue une avenue intéressante pour assurer une résistance thermique élevée en fonction son l'épaisseur ;

3. Le chanvre a été utilisé tant pour les murs (L'Hermine) que les toitures, en raison de ses propriétés hydrophobes et sa bonne capacité d'assèchement ;

4. La membrane *Membrain* pour faire office de frein-vapeur (L'Hermine) constitue un choix économiquement viable et offre une bonne résistance mécanique ;

5. La membrane auto-adhésive *Sopraseal stick 1100* offrait une alternative intéressante aux membranes minces, facilitant les travaux aux jonction.

4.6 Efficacité énergétique

L'analyse énergétique des pavillons a été réalisé par Denis Bourgeois, PhD, de la firme rd2. Plusieurs outils informatiques ont été utilisés et sont détaillés au rapport reproduit en annexe 3.

L'efficacité énergétique est considéré ici sous divers angles :

- La consommation énergétique
- La rentabilité économique *vs* les solutions technologiques avancées
- Le confort

À ces considérations s'ajoutera l'empreinte carbone (analyse de cycle de vie ACV), traitée indépendamment par la firme CT Consultants en partie 4.7 de ce rapport.

4.6.1 Scénarios de consommation et analyse

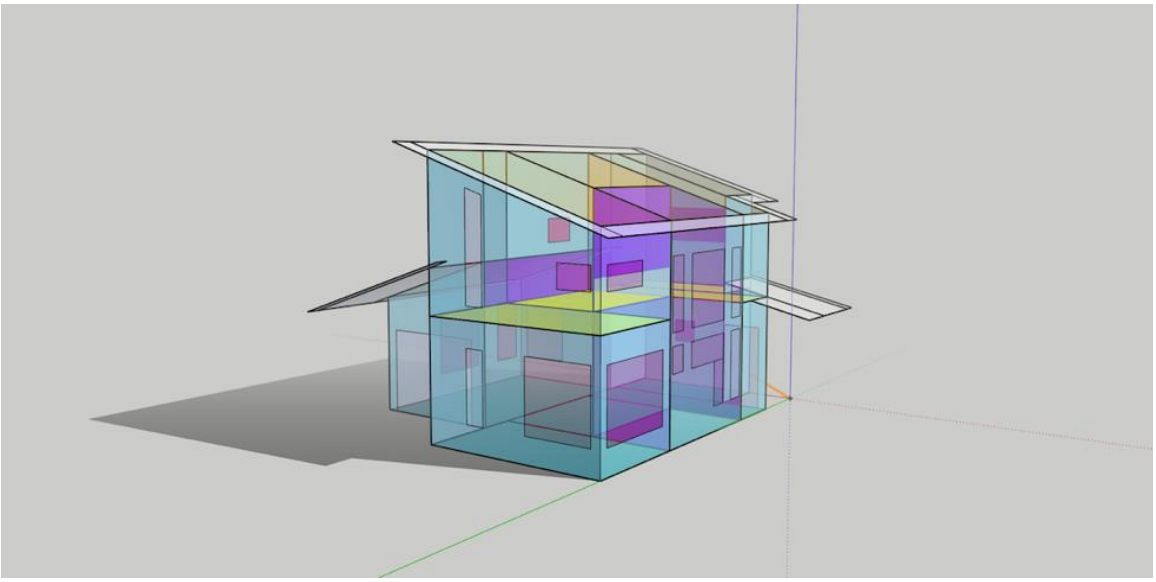


Figure 12 – extrait du rapport rd2 : Rendu d'un pavillon
à partir du plugin OpenStudio, intégré à l'outil 3D SketchUp. Les couleurs ici permettent de distinguer les surfaces selon leur nature (ex. planchers, murs, plafonds) et les choix constructifs.

Le rapport a traité différentes options de murs et de toitures. Les résultats contenus au rapport de rd2 reprendront donc les murs 1A,1B et 2A,2B et 2C mentionnée déjà précédemment. Le rapport rd2 ajoute aussi les scénarios de référence suivants :

- *« P11 »* murs strictement conformes aux exigences réglementaires au Québec
- *« Novo »* murs strictement conformes aux exigences du programme Novoclimat

L'étude a considéré une exploitation basée sur les données d'*Énerguide*, mais aussi sur un deuxième type d'exploitation considéré plus réaliste, par rd2, de l'occupation locative prévue, ce qui donne comme consommation théorique attendue :

- Scénario *Énerguide* : 17 112 kWh/année
- Scénario « locatif » : 12 978 kWh/année[24]

Pour les fins d'étude, ce sont les données d'*Énerguide* qui ont été utilisées pour établir la base comparative entre les différents scénarios d'assemblage. Le rapport fait état d'une part de la consommation énergétique suivant les scénarios d'assemblages, et d'autre part, de la consommation énergétique selon diverses pratiques pour chauffer le volume intérieur. Le tableau de la page suivante reprend quelques-uns des paramètres analysés dans le rapport rd2.

[24] Consommation se basant sur les données réelles d'octobre 2021 à janvier 2022 et une projection pour le restant d'année, selon les chiffres fournis par Richard Trempe (cet élément sera discuté ultérieurement au rapport).

Bâtiment	Assemblage mural scénarios	**Scénario 1** Scénario chauffage 100% plinthe électrique		**Scénario 2** Scénario réel avec chauffage radiant (Dalle sur sol) -température opérative[25]-		**Scénario 3** Scénario avec surchauffe de la dalle en période hors pointe[26]	
		kWh/a	Tarif D	kWh/a	Tarif D	kWh/a	Tarif D
	Exigences minimales Qc	19 031	1 510 $	20 804	1 649 $	19 704	1 551 $
	Novo	18 395	1 451 $	20 313	1 604 $	19 297	1 513 $
31 **Sittelle** (163)	1A-SITE Tel que construit	17 112	1 333 $	19 626	1 541 $	18 692	1 458 $
	1B-Ajout isolant montants	16 762	1 301 $	19 233	1 505 $	18 358	1 428 $
32 **Hermine** (161)	2A-SIPE Tel que construit	16 969	1 320 $	19 382	1 519 $	18 486	1 440 $
	2B-Double-ossat (laine)	15 927	1 224 $	18 239	1 414 $	17 505	1 351 $
	2C-Double-oasst (cellul.)	15 992	1 230 $	18 316	1 421 $	17 571	1 357 $

Tableau 9 - Tableau comparatif de consommation énergétique

Du tableau compilatif, on peut retenir entres autres les éléments suivants :

- Les résistances thermiques effectives avaient été déterminées à Reff 25.21 pour La Sittelle et Reff 26,81 Pour L'hermine, soit environ 4% de différence, alors que la consommation théorique varie de l'ordre de 2% (non significatif). Les données de consommations théoriques corroborent donc les calculs de résistance thermique.
- Les assemblages choisis pour la construction (1A et 2A) permettraient des économies d'énergie annuelles de l'ordre de 12% à 15% par rapport aux exigences minimales.
- Au niveau énergétique, l'ajout d'isolant partiel entre les montants (1B) n'est pas intéressant (une économie de 2% et une réduction d'environ 25$ annuellement).
- L'ajout d'une double-ossature en considérant strictement l'efficacité énergétique (c'est –à-dire sans considérer l'espace occupé et l'ajout de matériaux) apparait une solution intéressante, avec une réduction théorique de 8% des coûts d'énergie.
- En fonction de l'économie, et sans considérer le confort qui cela apporte, l'ajout d'une dalle sur sol n'est pas viable dans des édifices de petit gabarit comme ceux sous étude. Il en coûte environ 13% de plus en frais de chauffage, sans considérer le surcoût au moment de la construction. Toutefois, en optimisant le fonctionnement de la dalle (emmagasiner l'énergie hors des périodes de pointe), les coûts se rapprochent de ceux d'un chauffage standard par plinthes électriques.

[25] Considérant le type d'enveloppe très étanche et bien isolée, le rapport rd2 est d'avis que la température ressentie par les occupants serait influencée principalement par l'effet radiant, d'où une température établie en combinaison avec celle de l'air et celle radiante, ce qui améliore le confort.
[26] Il s'agit d'exploiter la masse thermique de la dalle pour emmagasiner la chaleur, et abaisser les consignes en période de pointe.

Les données analysées ici seront reprises en fin de rapport, dans la section de l'exploitation, pour les comparer aux donnée réelles de consommation et aux coûts de construction.

4.6.2 Mur de masse : impact de l'inertie thermique

Le mur de bloc de béton intégré au volume intérieur central du bâtiment 32 (L'Hermine) a été analysé par rd2, à partir des informations générales et des conditions du site (ensoleillement, canopée, …). Le rapport a étudié les impacts du mur en considérant *à contrario* les possibilités suivantes :

- De supprimer les fenêtres donnant sur le mur de bloc ;
- De faire pivoter le pavillon de 180º ;
- En anticipant une obstruction partielle de 50% des fenêtres à cet endroit, par la végétation.

En se concentrant sur le résultat du scénario 2A tel que construit (le rapport dresse l'ensemble des scénarios), on apprend que :

- La suppression des fenêtres devant le mur n'est pas économiquement viable, c'est donc dire, qu'à priori, le gain net simple obtenu par le rayonnement solaire est significatif : 19 103 kWh sans fenêtres, versus 18 486 kWh, avec une augmentation de la facture énergétique de 3 à 4% ;
- En pivotant le bâtiment, les gains solaires par les fenêtres donnant sur le mur diminuent, confirmant ainsi qu'une orientation avec une exposition généreuse la matin (SSE ou ESE) est bénéfique ;
- L'augmentation significative de végétaux (avec un coefficient d'assombrissement passant de 20% tel que selon étude à 50%) serait nettement désavantageux, avec des coûts qui pourraient être augmentés de l'ordre de 12% en raison de l'assombrissement général par une canopée plus volumineuse ou des vitrages mal entretenus.

Il semble donc que la position du mur de masse à l'intérieur soit adéquate, de même que la position et l'orientation des ouvertures qui le réchauffent. Un suivi sur place permettra éventuellement d'en évaluer sa contribution réelle, élément qui sera abordé à la fin de ce rapport.

4.7 Analyse du cycle de vie

L'analyse a été réalisée par CT Consultants (rapport en annexe 4), suivant les cinq scénarios développés précédemment, le tout réalisé avec le logiciel *Athena AIEB*, à partir des déclarations environnementales des produits.

Le graphique (page suivante) dresse un portrait global suivant les six indicateurs utilisés dans le rapport CT. Il montre un score plus faible (plus avantageux) pour les options 1A (tel que construit La Sittelle) et 2C (double ossature et cellulose, L'Hermine). Toutefois

les différences entre les options sont petites, voire non-significatives selon CT, sauf pour les options les « moins avantageuses » 2A (tel que construit Hermine) et 2B (Double-ossature chanvre / fibre de roche Hermine).

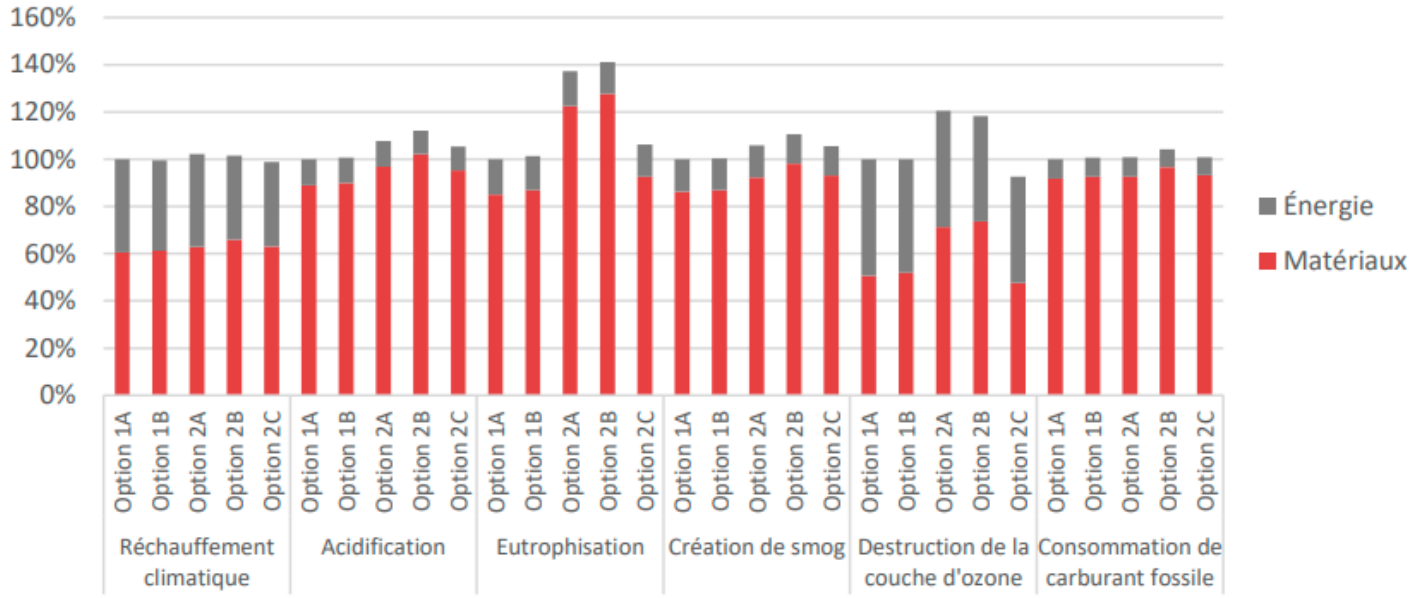


Figure 13 - Impact relatif des différentes options pour les catégories d'impact avec les parts liées aux matériaux et à l'énergie (Option 1A = 100 %) – Source CT Consultants

4.7.1 Impacts environnementaux du cycle de vie

Le rapport indique au préalable que l'impact lié aux matériaux englobe l'impact attribuable à leur production, leur transport, leur installation et leur fin de vie.

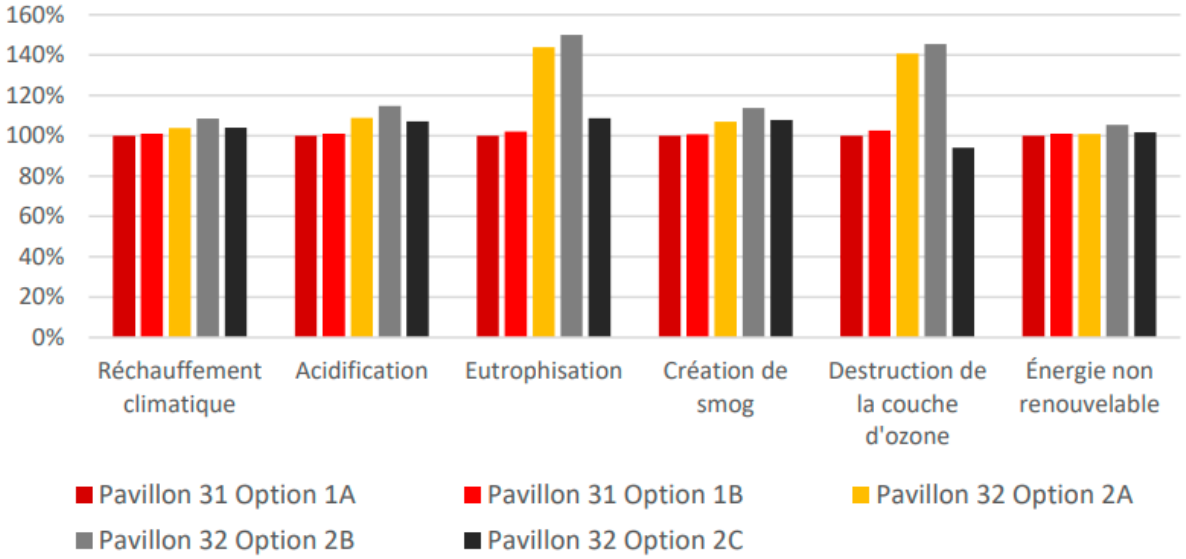


Figure 14 – Score d'Impact des pavillons et de leurs options– Source CT Consultant

Les résultats de cette évaluation d'impact peuvent se résumer aux éléments suivants, tirés du rapport de CT :

- *L'ajout de 25 mm de laine minérale (Pavillon 31 – option 1B), engendre entre 1 et 2,6% d'augmentation par rapport au scénario 1A pour les différentes catégories d'impacts.*

- *En ce qui concerne le pavillon 32 – option 2A, le mur composé d'un panneau Sonoclimat et de laine de chanvre engendre une hausse entre ~1 et 8% pour les catégories réchauffement climatique, acidification, destruction de la couche d'ozone et consommation d'énergie fossile par rapport au pavillon 31 – option 1A*

- *Une hausse de 40 et 44% est observée pour les catégories eutrophisation et smog, respectivement. Pour expliquer l'écart marqué à la catégorie eutrophisation, il est possible que la laine de chanvre possède un impact plus élevée que d'autres isolants relatif à cette catégorie en raison des émissions agricoles qui ont lieu pour la culture du chanvre, bien qu'il soit également possible que des enjeux méthodologiques liés à des bases de données en soient responsables […].*

- *Pour le pavillon 32 - option 2B, les hausses sont plus marquées (entre 5 et 14%) pour les catégories réchauffement climatique, acidification, destruction de la couche d'ozone et consommation d'énergie fossile par rapport au scénario de référence (Pavillon 31 – option 1A).*

- *Finalement, le pavillon 32 – option 2C, engendre des hausses d'impacts pour les catégories réchauffement climatique, acidification, eutrophisation, destruction de la couche d'ozone et consommation d'énergie fossile (entre ~ 2 et 9%), mais une baisse d'environ 6% à la catégorie création de smog […]*

- *Au final, le scénario de référence, c'est-à-dire le pavillon 31 – option 1A est celui qui engendre le moins d'impact à toutes les catégories, à l'exception de la catégorie création de smog pour le pavillon 32 – option 2C.*

Certains matériaux ont des impacts plus significatifs : *Ainsi, il est possible de bien distinguer la part d'impact attribuable de la laine de chanvre, du panneau sonoclimat, ainsi que pour l'isolant supplémentaire (laine de roche ou cellulose) et la double ossature. Il est notamment à souligner que l'impact carbone du panneau sonoclimat est presque le double de celui de la laine de chanvre et que l'impact carbone du chanvre est environ 5 % du plus que celui de la combinaison de la cellulose et de la 2e ossature de bois.*

4.7.2 Impacts liés à l'énergie d'exploitation

Les consommations d'énergie annuelle ont été établies, pour chaque option, par Denis Bourgeois (rd2), puis transmises à Charles Thibodeau (CT).

C'est l'Option 2B (Double-ossature chanvre / fibre de roche Hermine) qui engendrerait le moins d'Impact, car elle consomme le moins. Toutefois, il n'y a que 10% entre la plus consommatrice et la moins consommatrice. En conséquence, et en regard de l'énergie d'exploitation, peu de différences sont à considérer.

4.7.3 Impact globaux des pavillons

Il s'agit du cumul des impacts liés aux matériaux et ceux liés à l'énergie d'exploitation.

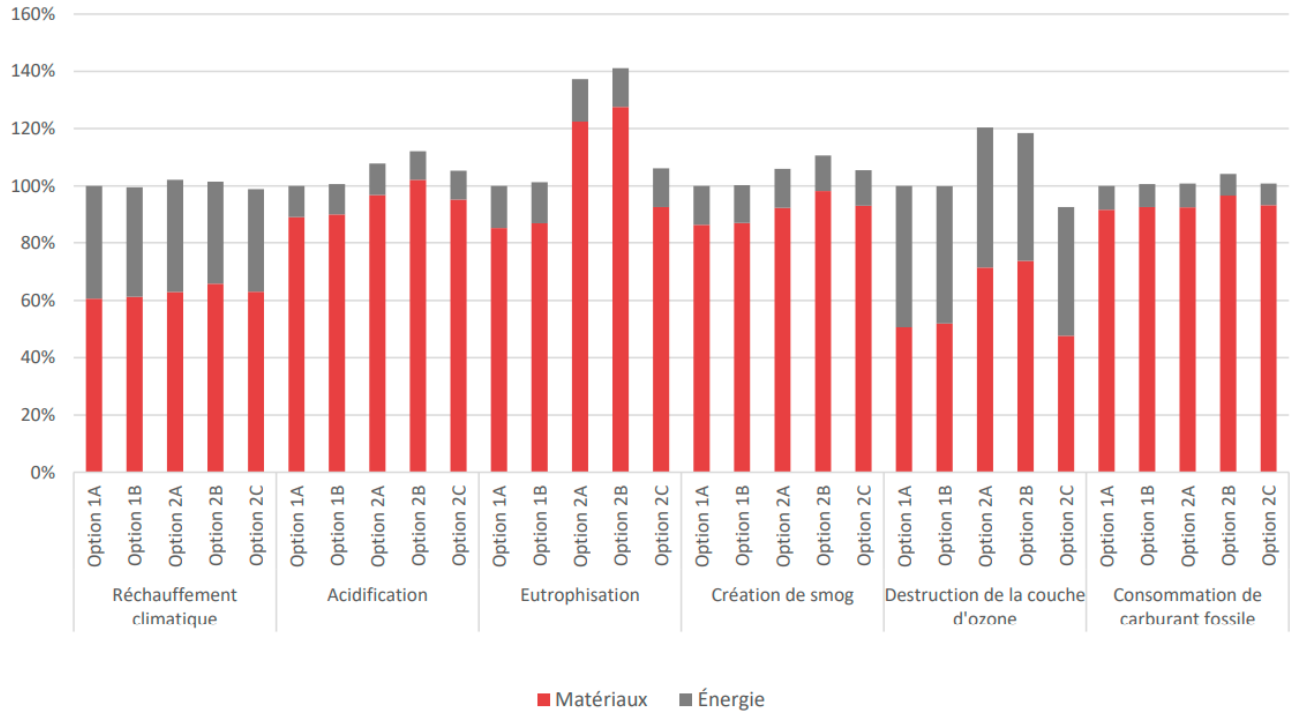


Figure 15 - : Impact relatif des options pour les catégories d'impact considérées et parts liées aux matériaux et à l'énergie (l'impact de référence est l'option 1A (100 %)) – Source rapport CT

Les options 1A et 2C engendrent les sores les plus faibles (donc les plus avantageux), alors que les options 2A et 2B sont les plus élevées, dans toutes les catégories, sauf une exception. Le rapport relativise ces scores, somme toute très rapprochés :

> *Par ailleurs, il est pertinent de rappeler que les différences obtenues entre les scores d'impacts des options n'apparaissent pas significatives si la différence est en-deçà d'un certain seuil. Alors que ce seuil peut être établi à 10%, il est proposé de le fixer à 5% dans la présente ACV comparative, car seuls quelques matériaux diffèrent entre les différentes options. Sur la base de ce seuil de 5%, les cinq options sont jugées équivalentes pour les catégories réchauffement climatique et consommation d'énergie fossile. Pour les catégories acidification, eutrophisation et création de smog, les scores d'impacts des options 1A et 2A sont alors jugées significativement plus faibles que les autres options. Pour la catégorie destruction de la couche*

d'ozone, l'option 2C est réputée pour obtenir un score significativement plus faible que les autres options. Au final, il est difficile d'établir avec certitude laquelle des options impliquent le moins d'impact environnemental, mais il est plutôt clair que les options 2A et 2B ne sont pas celles qui en procurent le moins.

4.7.4 Analyse comparative en lien avec les ajouts d'isolation

À notre demande, CT a complété son étude en analysant l'effet de l'isolation additionnelle : 1B versus 1A et 2B / 2C versus 2A.

	PAVILLON 31		PAVILLON 32		
	OPTION 1A	OPTION 1B	OPTION 2A	OPTION 2B	OPTION 2C
Total	42460	42257	43370	43088	41993
Matériaux	25740	26014	26735	27957	26758
Énergie	16720	16243	16634	15131	15235
Total	100%	99,5%	102,1%	101%	98,9%
Matériaux	100%	101,1%	103,9%	108,6%	104,0%
Énergie	100%	97,1%	99,5%	90,5%	91,1%

Tableau 10 - ANALYSE COMPARATIVE DÉTAILLÉE DES DIFFÉRENTES OPTIONS – CATÉGORIE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE – Source CT

L'analyse montre que pour les options 1B et 2C, par rapport à 1A, l'impact global est positif, alors que l'impact carbone additionnel est compensé par une réduction de l'impact de consommation énergétique. Pour l'option 2B par rapport à 2A, la compensation n'est pas au rendez-vous, donc la consommation ne permet pas de « rentabiliser » en terme de réchauffement climatique l'intervention. On comprend donc que l'utilisation de la cellulose (2C) apparait, sur ce point, plus avantageuse que le chanvre et la fibre de roche (2B).

Si l'on compare directement les deux murs tels que construits, soit 1A (Sittelle) et 2A (Hermine) : *il est possible de constater que pour une consommation d'énergie très similaire (0,5% de différence), l'impact carbone du système isolant est plus grand pour l'option 2A.*

4.7.5 Intégration d'un score unique

Une méthode alternative a été utilisée au final pour permettre une visualisation plus globale des résultats (voir rapport en page 22 pour la méthodologie). Le rang des différentes options (tableau page suivante) confirme sensiblement les résultats par thèmes utilisés dans le rapport de CT, alors que Les options « gagnantes » sont 1A, 1B et 2C, pour terminer avec l'option 2A (4e rang) et 2B (5e rang).

Catégories d'impact	PAVILLON 31		PAVILLON 32		
	OPTION 1A	OPTION 1B	OPTION 2A	OPTION 2B	OPTION 2C
Réchauffement climatique	1.07E+00	1.08E+00	1.11E+00	1.16E+00	1.11E+00
Acidification	1.98E+00	2.00E+00	2.16E+00	2.28E+00	2.12E+00
Eutrophisation	5.26E-01	5.37E-01	7.57E-01	7.89E-01	5.72E-01
Création de smog	1.75E+00	1.77E+00	1.88E+00	2.00E+00	1.89E+00
Destruction de la couche d'ozone	3.13E-03	3.22E-03	4.41E-03	4.56E-03	2.95E-03
Consommation de carburant fossile	1.98E+01	2.00E+01	2.00E+01	2.09E+01	2.01E+01
Total	2.51E+01	2.54E+01	2.59E+01	2.71E+01	2.58E+01
Rang	1	2	4	5	3

Tableau 11 - SCORES UNIQUES DES DIFFÉRENTES OPTIONS – Source CT

On devra encore ici noter les très faibles différence entre les scores, en deça du seuil habituellement représentatif de 5%, sauf pour l'option 2B dont le 5e rang est donné avec un certain retard par rapport aux autres résultats, <u>en dépit du fait que l'option 2B est celle qui consommerait le moins d'énergie annuellement</u>.

5. LA RÉALISATION DES TRAVAUX

Les travaux ont été réalisée au cours de l'été 2021 et ont été complétés en octobre. Ils ont été effectués par Carsim, le même entrepreneur retenu pour les travaux de la phase I, et ce sont les mêmes équipes qui ont réalisées les deux pavillons simultanément pour la phase II. Il s'agit là d'un critère important à prendre en compte dans l'optique de réaliser un suivi comparatif des deux constructions.

5.1 Ajustement de détails

Un des facteurs clés des travaux a consisté à ajuster certains détails, en lien avec leur « constructibilité » et leur performance attendue : un détail est vivant dès l'étape de l'esquisse… et jusqu'au dernier clou enfoncé. C'est dans cette optique que certains détails ont été raffinés, d'autres améliorés, entre autres aux jonctions mur-toit. La présence des fermes pourvues de pièces en porte-à-faux servant de charpente de soutien des avant-toits, tel que l'on voit assez souvent, empêchait de réaliser une liaison continue entre les plans d'étanchéité de la toiture et ceux des murs. En fait, en raison de l'usage d'une double-ossature au toit, la possibilité que cette double-ossature reprenne les charges d'avant toit était facilement envisageable. Les prolongements des fermes ont donc été amputés sur une bonne partie des rives de toits (figure 17) pour être remplacées par le prolongement de l'ossature de toit, qui compose une partie de la double-ossature. La double-ossature a le mérite de diminuer considérablement les ponts thermiques. En plus, elle permet de facilité les jonctions vulnérables.

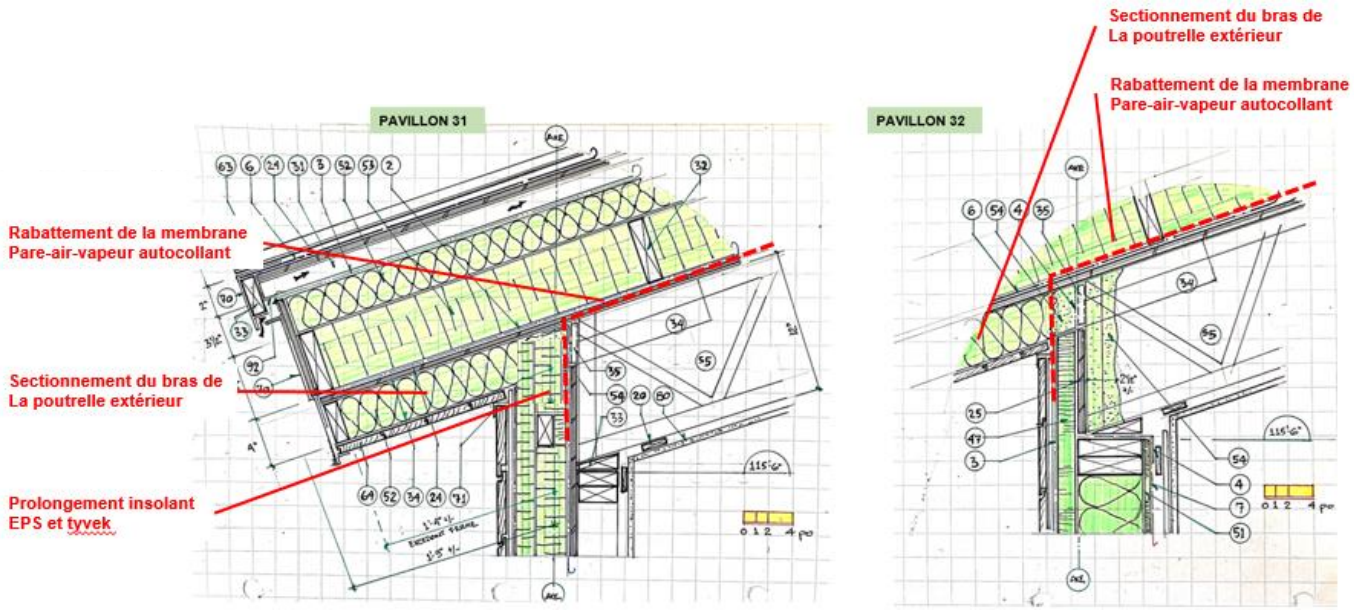


Figure 16 – Modifications types apportées en cours de chantier pour améliorer l'efficacité

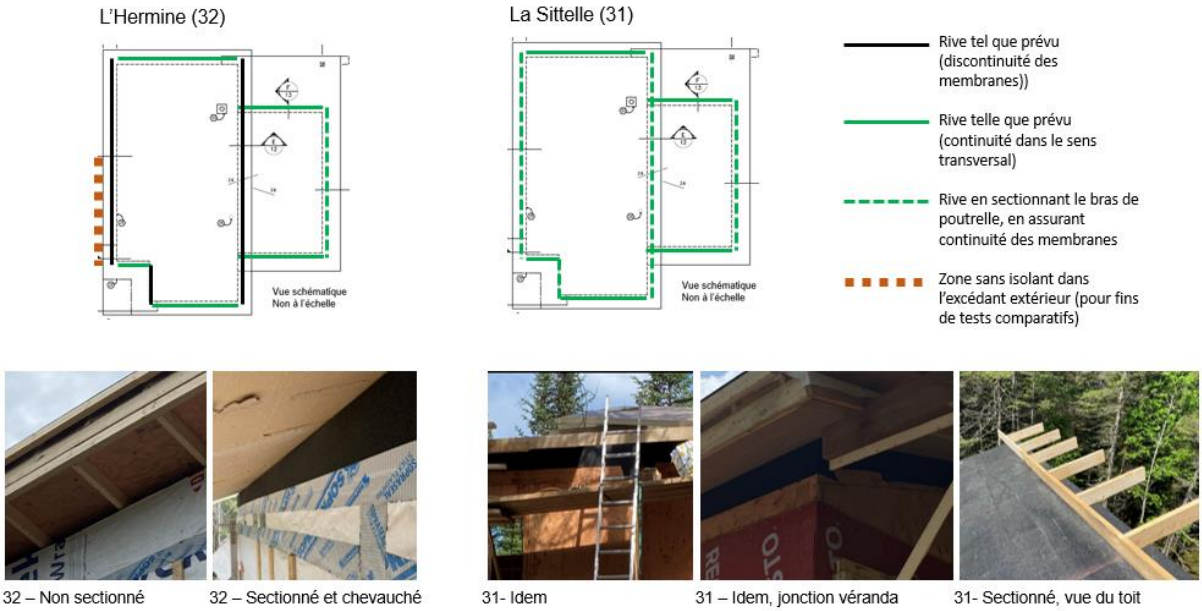


Figure 17 – Localisation des modifications apportées aux rives de toit

5.2 Déroulement du chantier

Photos 2 – Avancement des travaux à la dalle chauffante et création du puits de ventilation naturelle

Photos 3 – Détails du murs SIPE (L'Hermine) avec fibre de bois chanvre, frein-vapeur
et double-fourrure pour le passage électrique

Photos 4- Détails du mur SITE (La Sittelle) au périmètre des ouvertures et insertion de bris thermiques isolants

Photos 5 – Travail minutieux requis aux chevauchements des membrane et solinage de type « cuvette » sous les fenêtres, permettant l'évacuation d'eau en cas de bris de fenêtre.

Photos 6 – Divers détails de finition et de revêtement extérieur

5.3 Suivi post-construction

Suite à la construction, le projet de recherche s'est orienté comme prévu vers l'analyse de la performance en service, afin de vérifier si la construction répondait bien aux attentes, et, le cas échéant, quelles pourraient être les améliorations à apporter. Cette étape majeure a pris forme au moyen de plusieurs outils de vérifications, dont :

- Un essai en infiltrométrie pour quantifier le taux de fuite d'air par l'enveloppe ;
- Un relevé d'occupation des lieux et le suivi d'activités précises ;
- Un relevé des consommations énergétiques réelles ;
- Une thermographie en hiver pour évaluer les pertes de chaleur et les fuites d'air ;
- Un suivi régulier des conditions internes des assemblages au moyen du monitorage électronique.

6. LA PERFORMANCE EN SERVICE

L'infiltrométrie, la thermographie et le monitorage ont fait l'objet de rapports distincts reproduits aux annexes 5 à 8. Le sommaire de chacun d'eux sera présenté dans la présente partie.

6.1 Test d'infiltrométrie

Se référer aux annexes 5 et 6. Le test a été réalisé le 1er octobre 2021. Conformément aux procédures, le bâtiment a été mis sous pression négative de 50Pa (équivalant à des vents de l'ordre de 33km/heure). Le résultat, qui consiste à donner le taux de changement d'air impacté par les fuites à travers l'enveloppe, surpasse certaines exigences, comme le montre ces extraits tirés du rapport d'infiltrométrie, mais échoue à celle de Novoclimat 2.0 (1,5 CAH) :

1,90 CAH@50Pa (changement d'air à l'heure à 50 pascals).

Il faut comprendre que plus le taux est bas, plus la maison a une bonne étanchéité à l'air. Voici des moyennes pour comparer le taux de votre maison à celles de la province :

Maison Novoclimat 1 :	maximum 2,50 CAH@50Pa
Maison Novoclimat 2.0 :	**maximum 1,50 CAH@50Pa et jumelé 2,00 CAH@50Pa**
Maison récente :	3,57 CAH@50Pa
Maison :	4,55 CAH@50Pa
Maison ancienne :	supérieur à 6,00 CAH@50Pa

Figure 18 – Résultats de l'essai en infiltrométrie L'Hermine (pavillon 32) – Source rapport De Vinci

1,65 CAH@50Pa (changement d'air à l'heure à 50 pascals).

Il faut comprendre que plus le taux est bas, plus la maison a une bonne étanchéité à l'air. Voici des moyennes pour comparer le taux de votre maison à celles de la province :

Maison Novoclimat 1 :	maximum 2,50 CAH@50Pa
Maison Novoclimat 2.0 :	**maximum 1,50 CAH@50Pa et jumelé 2,00 CAH@50Pa**
Maison récente :	3,57 CAH@50Pa
Maison :	4,55 CAH@50Pa
Maison ancienne :	supérieur à 6,00 CAH@50Pa

Figure 19 – Résultats de l'essai en infiltrométrie La Sittelle (pavillon 31) – Source rapport De Vinci

Ces taux dépassent largement ceux qui avaient été obtenus à la PHASE 1, soit un taux 0,67 CAH. Cette différence était, de l'avis du consultant De Vinci, appréhendée compte tenu des éléments suivants :

- Plus petits bâtiments, et articulés avec plusieurs angles ;
- Pas de sous-sol (zone plus facilement étanche, améliorant le résultat final) ;
- Nombre élevé de jonctions de murs et de toit en surélévation.

Nous avons repris certaines données tirées de l'étude de compacité précédemment analysée afin de vérifier les points distinctifs qui peuvent expliquer une telle différence de lectures d'infiltrométrie.

Calcul référé (section 4.2)	La Sittelle / L'Hermine Phase II	Le Pierrot Phase I	Commentaires
Ratio toiture / mur	32%	38%	Plus la proportion de toiture est grande, mieux sera le résultat car une toiture est continue et sans ouvertures (Différence de 16% proportionnellement)
Indice de compacité (S)	2.7	1.9	Plus le chiffre est petit, plus c'est efficace. Différence calculée ici de l'ordre de 30%
Proportion d'ouvertures	38%	31%	Différence notable de 20%

Tableau 12 – Tableau comparatif de certains éléments tirés de l'étude de compacité

Considérant que le test d'infiltrométrie tel que réalisé se base sur un volume d'air appliqué sur toutes les parois de l'enveloppe, il va s'en dire que les bâtiments à fort indice de compacité (donc plus de parois pour un volume ou une surface donnée) sont désavantagés.

Réseau de Vinci nous a expliqué que le test à taux de changement d'air à l'air (CAH) représente, dans une analyse *Novoclimat*, un des 3 types de tests pouvant être réalisé. Les deux autres tests qui peuvent être considérés en lieu et place du CAH sont :

- SFN (Surface de fuite normalisée)
- TFN (Total de fuite normalisée)

Le TSN uniformise les fuites en po^2/100pi^2 de surface, tenant ainsi directement en compte la grandeur de surfaces. Ce calcul ne permet pas non plus de répondre à l'exigence *Novoclimat* avec les pavillons de la phase II (1,13 versus 0,75 max accepté).

Le TFN sert à déterminer la pression par pi^2 de surface. Dans les deux cas sous étude, le résultat est de 0.10 PCM, alors que *Novoclimat* accepte un maximum de 0.57 PCM. En conséquence, et vue que *Novoclimat 2.0* n'exige qu'un seul des 3 tests soit rencontré, les assemblages rencontreraient *Novoclimat 2.0*.

6.2 Thermographie

La thermographie a été réalisée le 31 janvier 2022 (soir et nuit), par Simon Bélanger, T.P. de la firme Partie 5, en collaboration avec l'auteur de ce rapport. S'inspirant des procédures DDN (devis directeur national), elle constitue une appréciation qualitative qui

s'est déroulée ici en deux étapes: d'abord en dépressurisation, puis en pressurisation. Cette façon de faire permet de mieux cibler les faiblesses et distinguer clairement les fuites d'air des ponts thermiques. Les figures reproduites ici-bas sont tirées du rapport de thermographie de partie 5.

Le rapport, reproduit en annexe 7, cible d'entrée de jeu une défaillance marquée d'infiltration au caisson de cheminée de l'Hermine (à l'étage). Cette défaillance était déjà connue car des infiltrations d'eau sont survenues en décembre et d'autre ultérieurement à la thermographie. Des réparations effectuées en mars ont confirmé une fuite d'air (et une entrée d'eau via les solins de couronnement au niveau de la cheminée de l'Hermine).

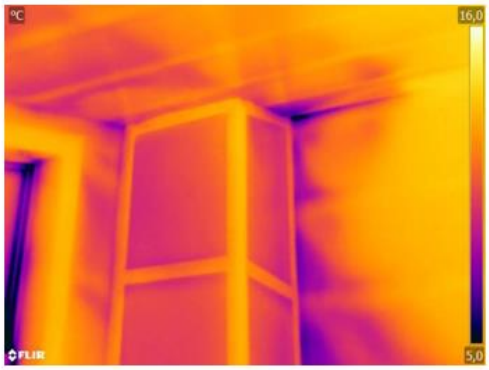


Figure 3 : L'Hermine (P-) T75

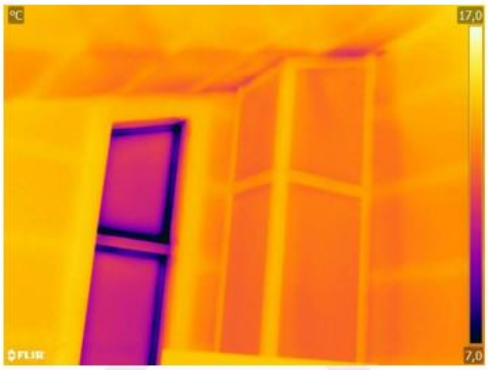


Figure 4 : La Sittelle (P-) T73

Il semble que pour le reste de l'enveloppe en général, les mouvements d'air soient peu présents et jugés de « mineurs ». En relation avec les portes et les fenêtres et leurs jonctions, aucune anomalie justifiant des correctifs a été notée. Pour les mouvements d'air en lien avec les sorties électromécaniques, on dénote ici que *« Ces mouvements d'air anormaux peuvent être corrigés en atteignant la jonction pare-air du mur ».* Un de éléments majeurs se trouve, pour les deux pavillons, aux sorties des séchoirs à linge.

Les ponts thermiques dans l'assemblage de mur semblent affecter légèrement plus les parois de L'Hermine : *« Ce phénomène est normal en raison de la différence de température du parement au droit de la cavité d'air qui est ventilée et donc plus froide que les fourrures qui sont légèrement plus chaudes en raison du transfert thermique par conduction. Les ponts thermiques sont davantage visibles dans le cas de l'Hermine, où l'assemblage de mur est plus succinct, tandis que dans le cas de la Sittelle, l'assemblage de bois supportant le parement est entrecoupé d'isolant rigide* ».

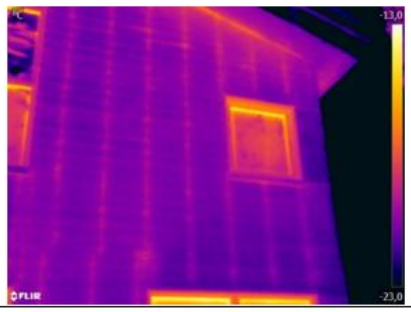


Figure 5 : L'Hermine (P-) T51

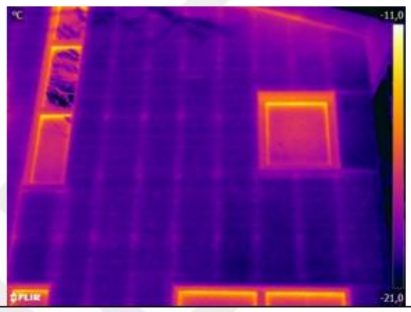
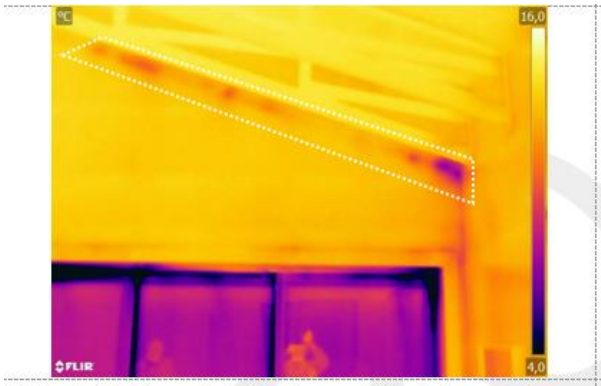


Figure 6 : La Sittelle (P-) T23

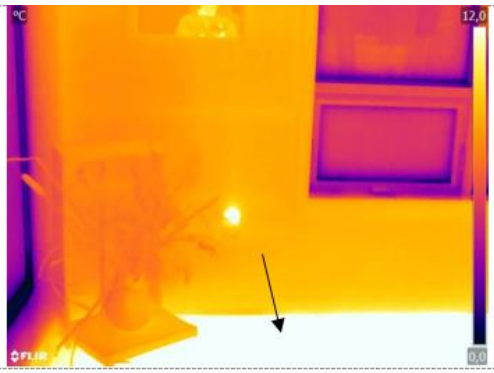
Certaines anomalies ponctuelles sont notées au fil du rapport de thermographie, dont en voici quelques une (L'Hermine) :



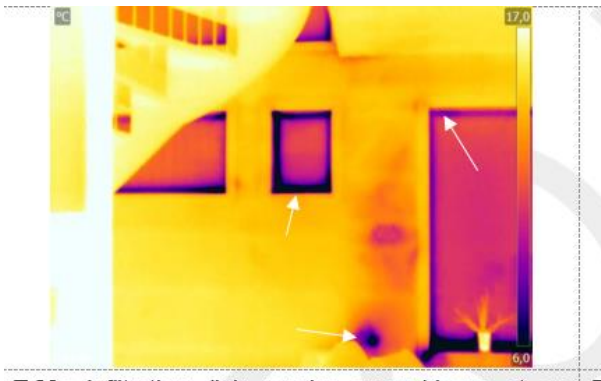
T 3 : Infiltration d'air froid parallèle à la membrure inférieure de la poutrelle de toiture (encadré).

T 4 : Comparatif en pression positive.

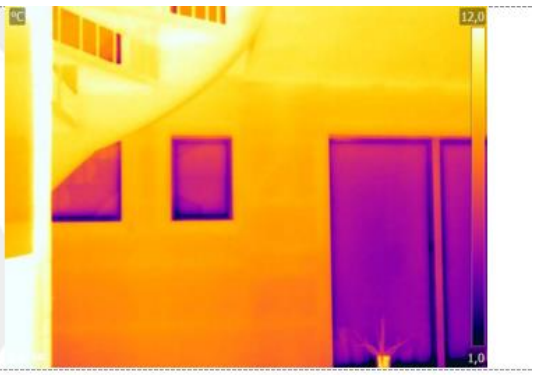
T 11 : Infiltration d'air froid par les assemblages de fenêtre et au périmètre de celle-ci.



T 12 : Comparatif en pression positive. Fonctionnement du plancher radiant.



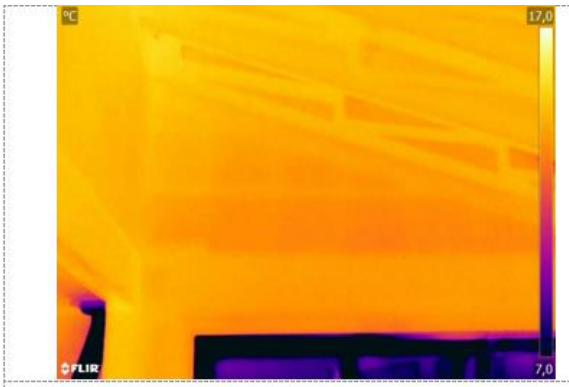
T 26 : Infiltration d'air par les assemblages et en périphérie des fenêtres ainsi que près du boîtier électrique extérieur.



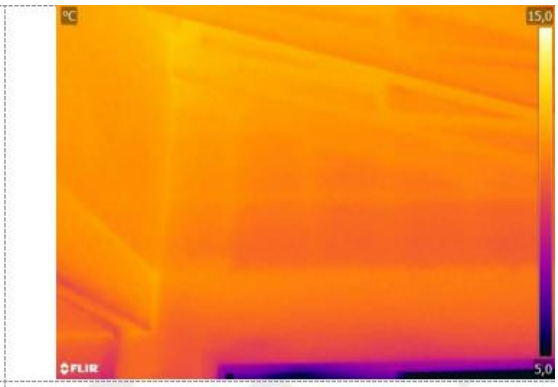
T 27 : Comparatif en pression positive.

Bien que ponctuelles et jugées comme « mineurs », il semble qu'un assemblage de type SIPE, avec plusieurs plans d'étanchéité, puisse être plus vulnérable à des mauvaises installations, comme ici sur T26, alors que le passage des filages derrière le plan pare-air (parce que le pare-air est à l'extérieur) crée un circuit de mouvement d'air très visible.

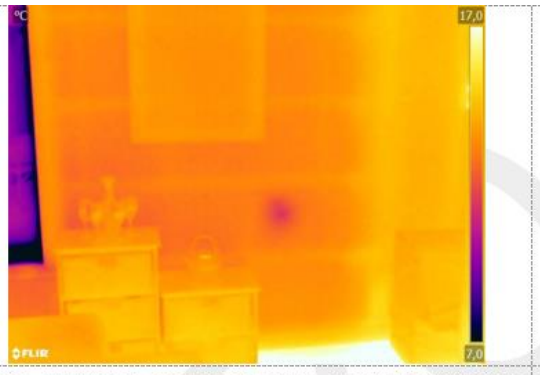
Le même exercice de vue générale peut se faire aussi pour l'enveloppe de La Sittelle :



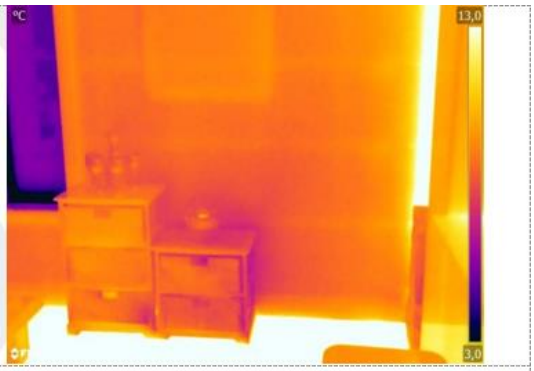
T 1 : Bon comportement.



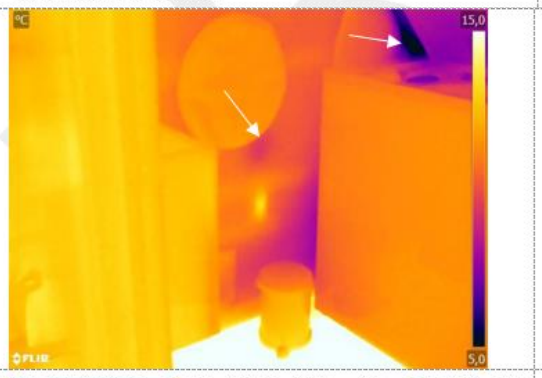
T 2 : Comparatif en pression positive.



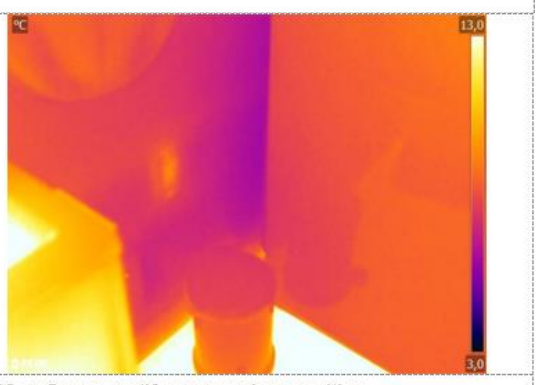
T 21 : Infiltration d'air froid diffus au droit du boîtier électrique extérieur.



T 22 : Comparatif en pression positive.



T 45 : Infiltration d'air froid près du conduit de sécheuse et de façon plus diffuse en partie courante du mur.



T 46 : Comparatif en pression positive.

La lecture des thermogrammes et les relevés faits la nuit du 31 janvier portent à croire qu'en terme de nombre d'anomalies, La Sittelle (mur SITE) comporte définitivement moins d'anomalies thermiques, lesquelles se répandent moins dans l'enveloppe (voir le thermogrammes T21 montrant une fuite d'air en lien avec un boitier, mais à surface très

limitée). En contrepartie, lorsqu'il y a vraiment un problème de pare-air, comme le montre l'image T45 (salle d'eau RDC), les conséquences sont directes, avec dans ce cas un mouvement d'air ressenti plus important.

Le SITE ne pardonne pas en cas de défaillance : c'est en fait toute l'étanchéité qui devient vulnérable. Par cette faiblesse, et sans autre plan d'étanchéité habituellement prévu au-devant, il est possible de considérer qu'en terme de performance, eu égard au mouvement de l'air et au confort, Le SITE ne constituerait pas nécessairement une meilleure option que le mur conventionnel SIPE.

C'est bien plus par une mise en place exemplaire que l'un et l'autre pourront assurer une performance initiale et durable. On rappellera d'ailleurs qu'aux tests d'infiltrométrie, les deux bâtiments obtenaient sensiblement le même taux (1,65CAH pour La Sittelle et 1,90CAH pour l'Hermine).

Il est aussi plausible de croire que l'ajout d'une pellicule tyvek « pare-intempérie » devant le système SITE, ait pu améliorer son efficacité, comme il avait d'ailleurs eté fait aussi, au moment de la phase I.

6.3 Monitorage

Le monitorage de l'enveloppe est un enregistrement en continu de données à même les assemblages, et ce depuis le mois de novembre 2021. On parle ici d'une vérification de la *performance* car les conclusions que nous en tirons sont faites en lien avec la durée, soit les variations climatiques et d'occupation des lieux dans le temps[27]. Ces vérifications sont d'autant plus précises si des cycles complets de saison sont monitorés. Dans le présent cas, et en fonction des échéanciers de remise d'analyse, elles couvrent une partie de l'automne 2021 et l'hiver jusqu'2022.

La période du programme de subvention de la SHQ a restreint quelque peu la quantité de données recueillies. Le monitorage et les analyses se poursuivent toutefois au-delà de la période subvention, afin d'obtenir, le cas échéant, des cycles saisonniers complets.

Le monitorage électronique a été réalisé conjointement par Charles Beaulé, ing. de Partie 5, et le soussigné, et un rapport a été rédigé à cet effet par Charles Beaulé, document reproduit en annexe 8. On trouvera aussi toute l'information technique concernant la localisation des zones d'enregistrement et l'endroit spécifique des zones dans chaque partie des assemblages à l'annexe 1.6.

La présente section intègre les éléments marquants contenus dans le rapport de monitorage, dont plusieurs extraits y sont tirés, de même que les observations spécifiques faites par le soussigné en condition d'usage.

[27] Pour illustrer cette distinction on peut prendre une lecture thermographique d'un point donné, qui nous révèlera de façon précise, dans une condition spécifique, un rendement thermique, alors que le monitorage permettra d'évaluer l'évolution des conditions de ce point précis, selon les températures et les conditions d'humidité sur une longue période de temps.

6.3.1 Zones d'analyse ciblées

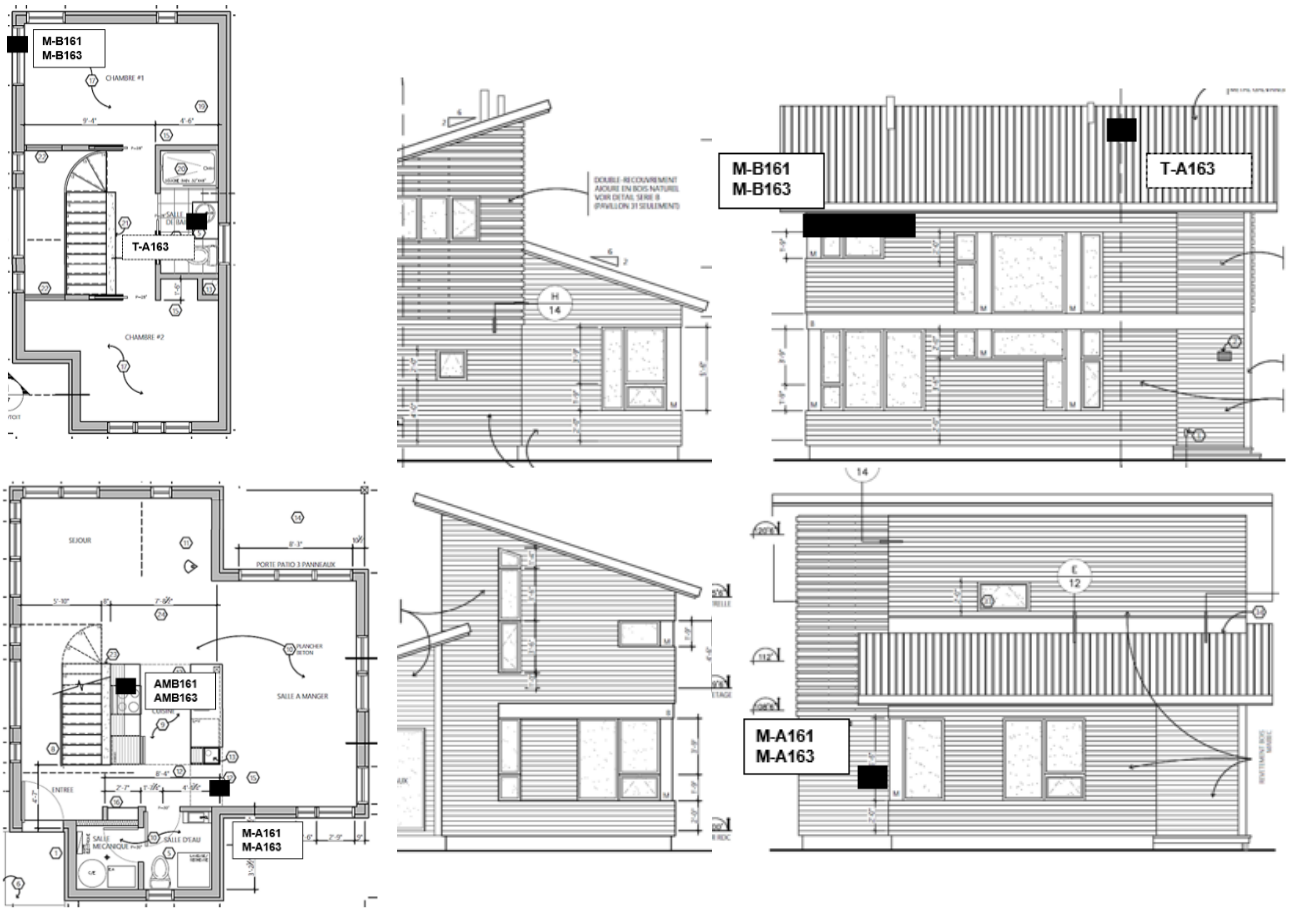


Figure 20 – Localisation des zones d'enregistreurs de données (sonde)

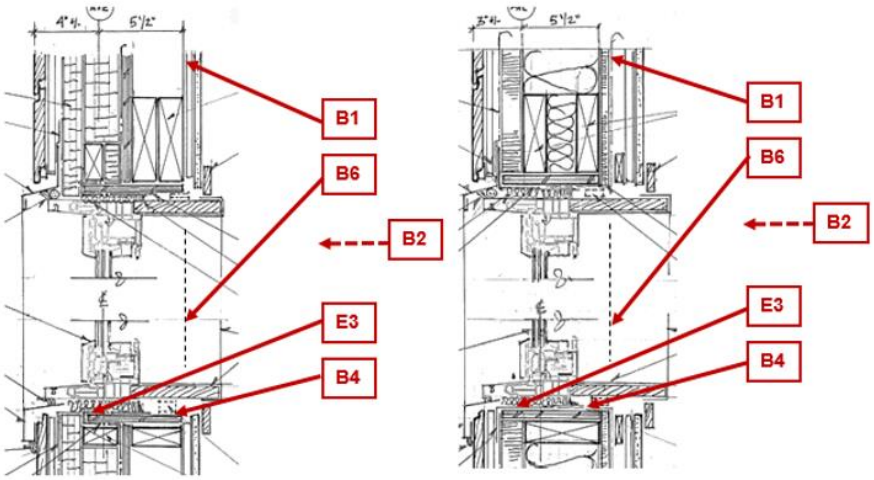
Localisation des enregistreurs de données et description des informations recueillies			
Pavillon	**Code**	**Localisation**	**Informations recueillies**
161 Sittelle	M-A161	Salle d'eau RDC	Relevé dans les composantes du mur extérieur
163 Hermine	M-A163		
161 Sittelle	M-B161	Coin chambre étage	Relevés dans les composantes du mur extérieur et autres vérification jonctions fenêtres et coins de mur
163 Hermine	M-B163		
161 Sittelle	AMB161	Haut armoire près de la cuisine	Conditions ambiantes intérieures
163 Hermine	AMB163		
163 Hermine	T-A163	Zone toit chambre près salle de bain	Relevés dans les composantes de la toiture
185 Pierrot	T-A185	Zone toit près cuisine	
Terrain	AMB-EXT	Dans la remise 161-163	Conditions ambiantes extérieures[28]

Tableau 13 – Localisation détaillée et types d'informations recueillies aux enregistreurs

[28] Problème de lecture d'enregistreur en cours d'étude. La station météo la plus près a été utilisée par Partie 5 comme données extérieures.

6.3.2 position typique des prises de données

L'annexe 1.6 détaille la localisation de chacune des prises de données (thermocouples) servant à la l'analyse. La figure suivant en montre un exemple, dans un point de lecture (chambre à l'étage).



M-B163 M-B161

B1	Face intérieure bâti de bois de coin fenêtre/mur/toit	Face intérieure Frein vapeur au coin fenêtre/mur/toit
B2	Face intérieure montant de bois, entre-mur, mi-hauteur	Face intérieure Frein vapeur zone mi-hauteur de mur
B3	Membrane sous fenêtre, vers l'extérieur	Membrane sous fenêtre, vers l'extérieur
B4	Membrane sous fenêtre, vers l'intérieur	Membrane sous fenêtre, vers l'intérieur
B5	Voir Jonction mur-toit	Voir Jonction mur-toit
B6	Face intérieure bâti de bois de coin mi-fenêtre sous B1	Face intérieure Frein vapeur mi-fenêtre sous B1
B7	Voir Jonction mur-toit	Voir Jonction mur-toit

Figure 21 – Localisation détaillée et photomontage de la zone

6.3.3. Analyse des résultats

Les informations qui suivent ont été tirées du rapport de Charles Beaulé. Il avait procédé aussi au monitorage de la phase I du projet de recherche et a été impliqué dans le choix des localisations et les stratégies d'analyses du monitorage électronique.

.1 Conditions intérieures

Pavillon	Température (°C)			Humidité relative (%)			Pression de vapeur (Pa)		
	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.
L'Hermine	15,2	19,1	23,4	28	36	46	487 Pa -2,7 °C	797 Pa 3,6 °C	1060 Pa 7,8 °C
La Sitelle	14,2	17,9	24,8	27	36	45	482 Pa -2,9 °C	747 Pa 2,6 °C	1132 Pa 8,8 °C
Extérieur[2]	-34,3	-9,0	7,0	36	76	99	17 Pa -37,0 °C	279 Pa -12,3 °C	936 Pa 6,0 °C

Tableau 14 – Conditions ambiantes dans les pavillons – extrait rapport Partie 5

Le rapport montre que les conditions sont similaires. Prises isolément, la première partie du monitorage (novembre-décembre) montre une humidité légèrement supérieure dans L'Hermine, en dépit d'une occupation plus faible, ce qui pourrait s'expliquer ainsi :

- *En période plus chaude et plus humide, la membrane hygrovariable installée dans la composition murale de l'Hermine permet une plus grande migration de la vapeur d'eau extérieure vers l'intérieur de l'édifice, par diffusion, que ne le fait la membrane pare-vapeur de la composition murale de la Sitelle;*

- *Le taux de changement d'air à l'heure est légèrement plus élevé dans l'Hermine que dans la Sitelle. Cela peut être dû :*
  - *À un niveau d'étanchéité à l'air de l'enveloppe moindre pour l'Hermine que pour la Sittelle; et/ou,*
  - *À un apport en air frais plus important par le système d'échangeur d'air de l'Hermine que celui de la Sitelle.*
  -

Figure 22 – Comparaison de taux d'humidité ambiants intérieurs – source Partie 5

.2 Comparatif général des murs extérieurs

Les points suivants sont notés au rapport (le souligné vient de l'auteur, de même que le les notes de bas de page, en complément au texte) :

- *L'ensemble des surfaces situées du côté intérieur du plan d'étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau des compositions murales se maintiennent en tout temps au-dessus du point de rosées correspondant aux ambiances intérieures. Il n'y a donc eu aucune occurrence de condensation de la vapeur d'eau contenue du côté intérieur de ce plan d'étanchéité pendant la période de monitorage ;*

- *Du côté intérieur du plan d'isolation de la composition murale (surfaces A1, A2 et A3) les températures sont plus froides pour la Sittelle* - Mur SITE - *que pour l'Hermine, probablement en raison de la cavité d'air plus grande derrière les finis de gypse de la Sitelle qui éloigne davantage la composition murale de la chaleur ambiante intérieure[29]. Les risques de condensation du côté intérieur du plan d'isolation, donc du côté intérieur du plan d'étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau, sont donc plus importants pour la Sittelle[30];*

- *Les surfaces qui peuvent se trouver à des températures égales ou inférieures au points de rosée correspondants au conditions ambiantes intérieure se retrouvent toutes du côté extérieur du plan d'étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau (A5, A6 et A7). Ces surfaces sont donc en théorie protégées de la vapeur d'eau contenue dans les ambiances intérieures, donc à faibles risques de condensation causé par cette vapeur d'eau. Pour la Sitelle, l'ensemble de ces surfaces se retrouvent complètement à l'extérieur de l'ossature murale et du revêtement intermédiaire membrané, ce qui n'est pas le cas pour l'Hermine dont les surface A5 et A6 se trouvent du côté intérieur du revêtement intermédiaire, donc dans l'axe verticale de l'ossature murale. La composition murale de la Sitelle est donc moins à risque de problèmes d'humidité en cas de défaillance de son plan d'étanchéité à l'air et à la vapeur d'eau, alors que ce genre de défaillance pourrait affecter davantage l'ossature murale et le revêtement intermédiaire de l'Hermine;*

- *Les températures de surface situées dans l'axe du plan d'isolation murale, ou à l'extérieur (A5, A6 et A7), sont, de façon générale, légèrement plus chaude dans la composition murale de la Sitelle que celle de l'Hermine. Cela*

[29] Cette condition procure une certaine sensation de froideur ou d'ambiance plus « creuse », condition rapportée par des personnes qui ont pu comparer l'ambiance à l'intérieur des deux pavillons.
[30] Il s'agit de risque minime : un mur SITE bien construit ne court aucun problème. Par contre un mur de type SITE est plus vulnérable, en présence d'une fuite d'air en raison de son plan d'étanchéité unique.

tend à indiquer une meilleure résistance à la condensation de ces surfaces pour la Sitelle, mais aussi des déperditions thermiques plus importantes[31];

- *L'impact des colombages de bois de l'ossature de bois du mur de l'Hermine, qui traversent le premier plan d'isolation thermique de cette composition, est plus grand que l'impact des fourrures de bois qui traversent le premier plan d'isolation thermique de la composition de la Sitelle (voir A5 et A6). L'utilisation du bris thermique entre le revêtement intermédiaire et la fourrure de bois de la composition de la Sitelle apparait très efficace pour rendre la fourrure thermiquement « invisible[32] ».*

De l'ensemble des informations contenus au rapport, les éléments suivants apparaissent les plus significatifs :

- Strictement en terme d'étanchéité à l'air, l'enveloppe de La Sittelle serait légèrement avantagée, ce qui corrobore les résultats d'infiltrométrie faits par le réseau De Vinci à l'automne 2021 ;

- Les parois situées plus vers l'extérieur sont plus chaudes pour les murs de La Sittelle, ce qui montre la présence d'une déperdition thermique par conduction légèrement plus importante dans La Sittelle. Toutefois les ponts thermiques dans les plans isolants sont plus accentués dans le cas de l'Hermine, tel que confirmé aussi par la thermographie[33] ;

- La résistance à la condensation avantage les parois de l'Hermine, en raison de la position du frein-vapeur positionné plus près de la chaleur ambiante par rapport à la position du plan d'étanchéité dans les murs de La Sittelle. Par contre, en présence de condensation, la composition murale de L'Hermine est plus à risque de dommage car la zone de possible de désordre est situé à l'intérieure du panneau de revêtement intermédiaire, contrairement au mur SITE de La Sittelle ;

- Concernant les risques de condensation aux zones de fenêtres, il est plus bas pour La Sittelle, car la fenêtres est positionnée dans une zone plus chaude. Sur ce point, il s'agit plus ici d'un détail de construction que d'une caractéristique liée au système SITE.

[31] Les déperditions thermiques seraient donc, théoriquement, plus importantes dans le cas de La Sittelle. Cette situation toutefois n'est pas nécessairement et uniquement en lien avec le type de mur, mais aussi en lien avec les matériaux, différents, utilisés dans chacun des systèmes.
[32] Dans une étape ultérieure de cette étude, l'usage de profilés Z en fibre de verre, maintenant disponibles sur le marché, pourrait être intégré, en lieu et place des bris thermique « bois/isocyanurate » faits « maison » pour ce projet.
[33] Au final, la consommation réelle confirmera qu'il n'y a pas de différence significative.

7 L'EFFICACITÉ : COÛTS ET EXPLOITATION

A l'instar de la plupart des études et des enseignements prodigués sur l'enveloppe[34], cette recherche s'est concentrée sur des aspects techniques et constructifs. Mais un des objectifs de la recherche portait aussi sur la question de la *rentabilité* (ou non) des efforts de haute performance déployés autant dans les assemblages de La Sittelle que de L'Hermine.

7.1 Analyse comparée des coûts de construction

Le rapport technique de la phase I avait mis en évidence le coût supplémentaire que pouvait représenter le mur SITE par rapport à différents autres systèmes. On se souviendra du tableau 8 du premier rapport (phase I) que :

- Un système mural SITE représentait une augmentation de 107% du coût des murs. Rapportée sur l'ensemble du projet, cette augmentation était estimée à 7% (310 000$ versus 289 280$), le tout en utilisant le pavillon Le Pierrot (185) comme base de calcul ;
- Un surcoût supplémentaire de 3% (donc passant de 7% à 10%) avait été estimé si de l'isolation partielle entre les montants avait été prévue.

En continuité avec l'étude de coût de la phase I, le tableau suivant dresse un sommaire des différents scénarios, dont nous avons demandé à la firme Carsim (l'entrepreneur général des travaux des phases I et II) d'en évaluer les coûts. On notera que les variations de prix ne portent que sur les murs extérieurs et leurs jonctions, aucun autre élément n'est modifié d'un scénario à l'autre, afin de ne pas influencer les variations de montants.

Scénario	Coût de construction global (sans taxes)	Coût supplémentaire par rapport à ÉTALON	%	Commentaires
1A Mur SITE tel que construit Sittelle	292 100$	+ 21 300$	+ 7.8%	
1B Mur SITE avec isolant entre les montant (partiel)	294 100$	+ 23 300$	+ 8.6%	Aucun avantage ni économique ni en performance (risque de condensation)
ETALON (le moins cher): Mur de base de type 2A (avec laine verre au lieu du chanvre)	270 800$	0	0	Mur traditionnel, matériaux standards), 10 000$ de moins que 2A (chanvre et frein vapeur)
2A Mur SIPE avec chanvre Tel que construit Hermine	280 800$	+ 10 000$	+ 3.6%	
2B Double ossature (chanvre et fibre de roche)	295 800$	+ 25 200$	+ 9.2%	Augmentation significative de la résistance thermique de l'aire de projection au sol Inclut tout travaux de jonctions
2C Double ossature (cellulose)	289 400$	+ 18 100	+ 6.8%	

Tableau 15 – Synthèse des coûts en lien avec les scénarios de murs extérieurs

[34] Les ouvrages qui existent portent sur des propriétés et des états, sans nécessairement analyser la performance post-construction.

Le mur SITE tel qu'utilisé comporte certes des avantages par rapport au système conventionnel, mais cette phase II confirme les coûts supplémentaires de l'ordre de 7.8% par rapport à un mur conventionnel, soit plus de 20 000$ dans le cas d'un petit bâtiment comme les pavillons sous étude.

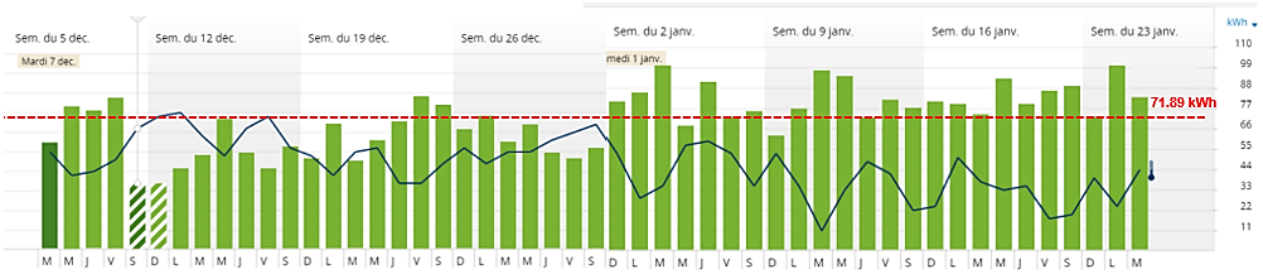
Le tableau met aussi en relief, toujours à partir du coût de base, l'intérêt que pourrait procurer le doublage, ou tout autre travail en ce sens, de l'ossature de bois, afin de minimiser les ponts thermiques, tout en optimisant l'isolation. On parle alors ici d'un surcoût de 6.8% (18 100$).

Enfin, il y aura lieu de questionner des isolants tels que le chanvre et peser leurs avantages et inconvénients, alors qu'on y voit une augmentation de coût de près de 10 000$, soit 3%[35].

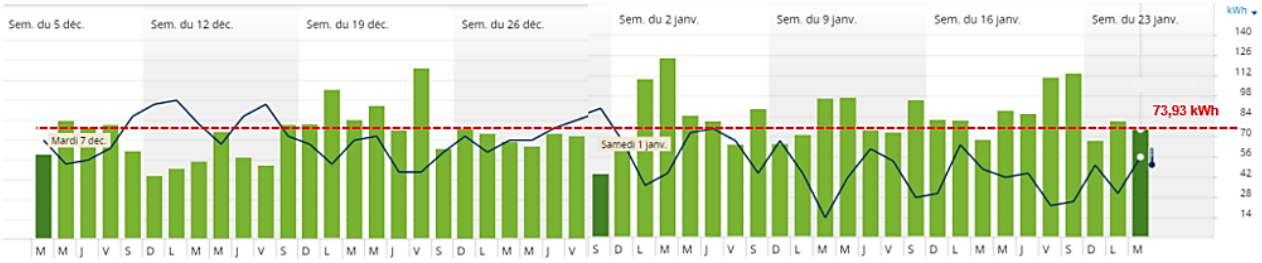
7.2 Consommation énergétique

7.2.1 Analyse préliminaire de la consommation réelle et projections annuelles

Le premier volet d'étude visant à établir la consommation énergétique des pavillons a été réalisé à la fin janvier 2022, après trois mois de mise en service, tel que montré[36] ici-bas.



161 rue Paquet – L'Hermine – Moyenne 71.89 kWh (50 jours) – 6,71$/jour
Nombres de journées d'occupation entre 7 décembre et janvier : 17 jours + 16 demi-jours / 26 nuits (incluant 23-25 décembre famille)



163 rue Paquet – La Sittelle – Moyenne 73,93 kWh (50 jours) – 7,39$/jour
Nombre de journées d'occupation entre 7 décembre et 3 janvier : 13 jours + 14 demi-jours / 20 nuits

Figure 23 –Données Hydro-Québec pour les mois de décembre à janvier 2022

[35] Le coût supplémentaire d'utiliser un frein-vapeur de type *Membrain* n'est pas jugé important par l'entrepreneur Carsim, sur l'ensemble du projet, mais il est inclus dans ce montant.
[36] Le tableau ne montre qu'une partie de la compilation, débutée en octobre 2021.

Ces premières données, auxquelles ont été retranchées la consommation avant la mise en service, nous indiquent que la consommation dans le pavillon 32 (L'Hermine) est légèrement plus basse, de l'ordre de 224 kWh, soit 3% :

161	**L'Hermine**	**Total 7 445 kWh**
163	**La Sittelle**	**Total 7 221 kWh**

Un telle différence, quoique peu significative pourrait s'expliquer par la configuration physique, le type d'assemblage ou l'occupation des lieux :

- Les diverses études de proportions et compacité (annexe 1.5) avantageraient plutôt L'Hermine en terme de consommation plus faible, car le type d'enveloppe fait en sorte qu'elle soit très légèrement plus compacte ;
- La résistance thermique du mur 2A (L'Hermine) est de R28.53 comparativement à celle du mur 1A (La Sittelle) qui est de R25.22. Donc en stricte terme de transfert thermique, L'Hermine serait encore ici avantagée[37].
- Concernant l'occupation de lieux, le tableau reproduit ci-après nous montre, toujours pour une période limitée se terminant en fin janvier 2022, que l'occupation des lieux n'aurait peu ou pas d'incidence sur la consommation globale, en comparant les moyennes quotidiennes et le nombre de personnes.

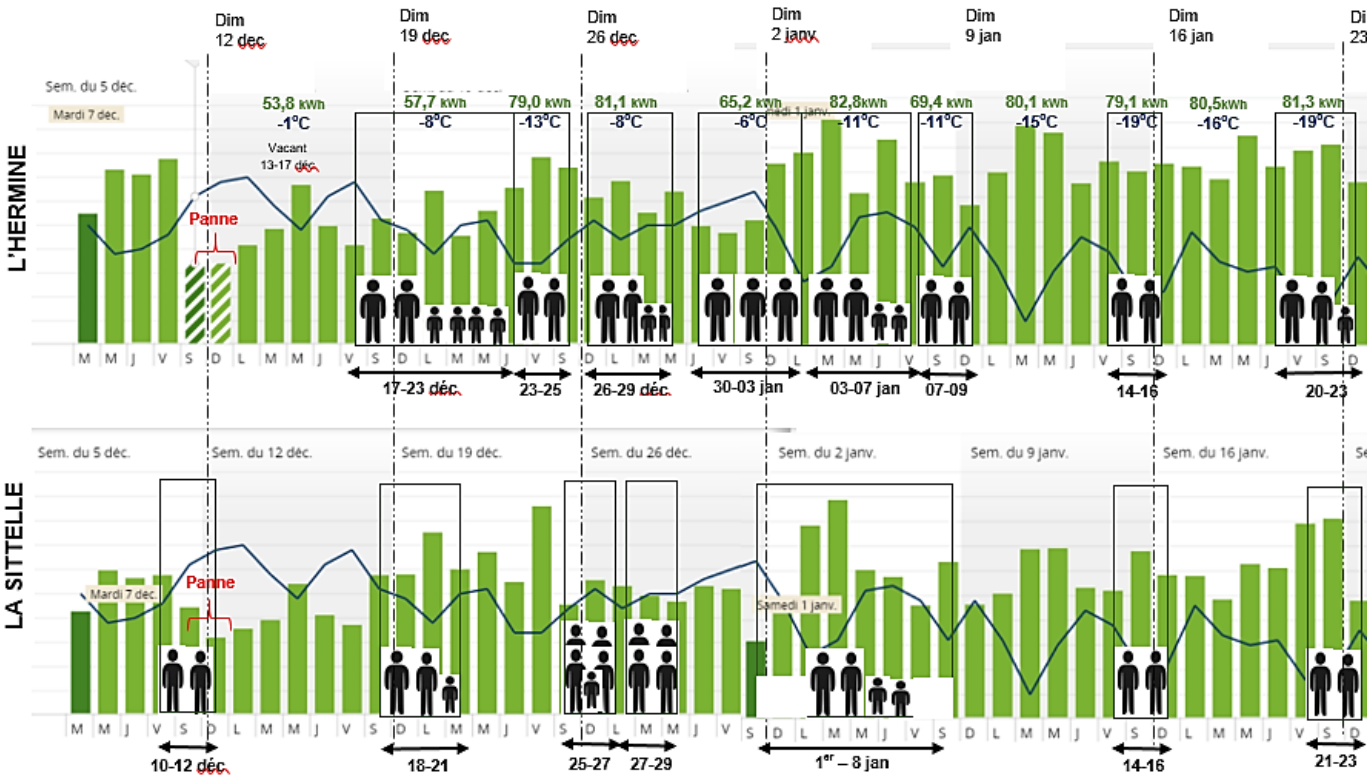


Figure 24 – Visualisation de l'occupation des lieux (locatif court terme), superposée à la consommation

[37] À cet effet, un comparatif fait par Denis Bourgeois, et reproduit plus long dans cette section, montre encore là un avantage pour l'assemblage de L'Hermine, mais très faible (total annuel inférieur de 78 kWh soit 0,5%

Il semble donc que l'occupation ou non des lieux ne semble pas avoir d'impact significatif. Entre autres pistes d'explications :

- Le chauffage constitue la majeure partie de la consommation et les consigne sont les mêmes, avec ou sans invités ;
- En période de grand froid, le chauffage constitue encore plus la majeure partie de la consommation, ce qui aplatirait toute différence vacant / non-vacant ;
- Presque toutes les périodes d'occupations se sont déroulées par grands froids ;
- L'échangeur d'air fonctionne aussi selon les mêmes consignes vacant / non-vacant ;
- Les personnes dégagent une quantité non-négligeable d'énergie, dans un petit espace clos ;
- Usage (sporadique) du foyer ;
- Masse thermique « régulatrice » assurée par la dalle de béton et le mur de bloc (pour l'Hermine) ;
- Exposition solaire des façades ;
- Usages des électroménagers par les invités : il semble que les activités de cuisson et de lavage/séchage soient limitées au minimum, ou même nuls, durant de courts séjours de ce type.

À l'étape de l'étude en fin janvier, nous avons projeté une consommation énergétique annuelle basée sur un comparable directe de consommation énergétique (le Pierrot, au 185 rue Paquet, phase I de l'étude), mais aussi en nous basant sur les calculs de l'annexe 1.5 (compacité), pour valider le tout.

Ces évaluations ont donné une projection annuelle de la consommation de :

163	**La Sittelle**	**Total 13 945 kWh**
161	**L'Hermine**	**Total 13 524 kWh**

Pour les fins des études énergétiques et d'analyses de cycles de vie qui nécessitaient une telle projection, nous avions légèrement surévalué la quantité à 15 200 kWh.

7.2.2 Analyse finale de la consommation réelle et projections annuelles

Le relevé le plus récent de consommation électrique a été réalisée le 26 avril, donnant ainsi 192 journées de lectures, soit plus de la moitié – et la pire – de l'année. En appliquant

les mêmes critères de projection, la consommation projetée, encore plus précise, serait maintenant de :

161 L'Hermine Total 12 838 kWh
163 La Sittelle Total 13 385 kWh

La différence d'énergie serait de 526 kWh (4%) entre les deux pavillons, correspondant à des coûts d'énergie de 52$ annuel. Au final, La Sittelle consommerait légèrement plus. La consommation des pavillons est très basse, peu importe le système. En dépit du fait qu'il n'y ait pas de sous-sol à chauffer, et malgré l'articulation des façades, elle se situe largement en deçà de la maison témoin Hydro-Québec (22 000 kWh, dont 57% pour le chauffage).

Une dernière analyse a été faite pour tenter de lier l'occupation à la consommation, en utilisant le critère de *nuitées x personnes*, afin de raffiner l'analyse.

		Période 16 oct – 6 déc	Période 7déc - 4fév	Période 5fév -5avril	TOTAL AU 24 AVRIL 2022
161 Hermine	Consommation (kWh) (172 jours)	2 282	4 372	3 415	10 069
	Nuitées x personnes	0	102	122	224
	Nuitées	0	26	32	58
163 Sittelle	Consommation (kWh) (172 jours)	2 320	4 653	3 711	10 684
	Nuitées x personnes	16	89	104	209
	Nuitées	6	22	27	55

Tableau 16 – comparaison avec la compilation électrique et la consommation et des nuitées

L'occupation dans La Sittelle est légèrement moins élevée de 7%, que dans L'Hermine. Donc encore ici ce n'est pas l'occupation qui peut expliquer le léger surcoût de consommation dans La Sittelle. La configuration physique et le type d'assemblage qui devraient théoriquement avantager L'Hermine, semble donc être confirmé comme source probable d'économie d'énergie, quoi que très petite.

7.2.3 Étude de la consommation en fonction des scénarios de murs extérieurs

À notre demande, rd2 a estimé, en terme de kWh, les gains et pertes probables que l'on peut retrouver en utilisant l'un ou l'autre des scénarios discutés dans ce rapport.

	... vs p11					
novo	-753	**... vs novo**				
p31_1a	-2 228	-1 475	**... vs p31_1a**			
p31_1b	-2 661	-1 908	-433	**... vs p31_1b**		
p32_2a	-2 306	-1 553	-78	356	**... vs p32_2a**	
p32_2b	-3 672	-2 919	-1 444	-1 011	-1 367	**... vs p32_2b**
p32_2c	-3 578	-2 825	-1 350	-917	-1 272	94

Les résultats sont en kWh/année
Ces résultats représentent des **écarts** de consommation énergétique annuelle **... vs** une (parmi plusieurs) référence, ex. ... vs p11
Les résultats sont strictement attribuables aux options constructives des **murs** (conductance + inertie thermiques)
Les résultats reflètent des conditions d'opération *typique* , soit celles du programme **ÉnerGuide** (qui diffèrent de celles observées *in situ*)

Des exemples, pour faciliter la lecture du tableau ...
... l'option **p32_2b** (double ossature, chanvre + fibre de roche) est la plus performante
... l'option **p32_2b** génère des économies d'énergie annuelle de **3 672 kWh** (environ 330$) vs le minimum prescrit par la **Partie 11** du CH1 du CCQ
... l'option **p32_2b** génère des économies d'énergie annuelle de **94 kWh** (environ 9$) vs l'option **p32_2c**
... l'option **p32_2b** génère des économies d'énergie annuelle de **1 444 kWh** (environ 130$) vs l'option **p31_1a**

Tableau 17 – Analyse comparée des scénarios – source rd2

Le tableau fait état par exemple d'une réduction annuelle projetée de 78 kWh[38] si l'on utilise le scenario 2A (Hermine) par rapport à 1A (Sittelle). L'écart entre ces scénarios est très mince. Toutefois, on peut déduire de ce tableau, des différences notables, entre autres si l'on compare tous les systèmes au Code de construction (diminutions variant de 2 228 kWh à 3 578 kWh soit 300$ à 350$).

7.2.4 Consommation et choix stratégique de chauffage

Le rapport rd2 a traité des différentes options de chauffage, en lien avec les avantages à tirer d'une dalle chauffante telle qu'utilisée ici, pouvant servir aussi de stockage thermique pour le chauffage des espaces en période de pointe de demande d'électricité. Cet aspect n'est pas couvert plus amplement par la présente étude mais constitue de toute évidence une considération qui mériterait à être explorer.

7.2.5 Captation solaire

Une ébauche d'analyse a été faite, en complément au sujet principal de l'étude, concernant le gain en terme de température et de confort que pourrait représenter un mur de masse tel que la paroi de bloc de béton installée dans l'entrée de L'Hermine.

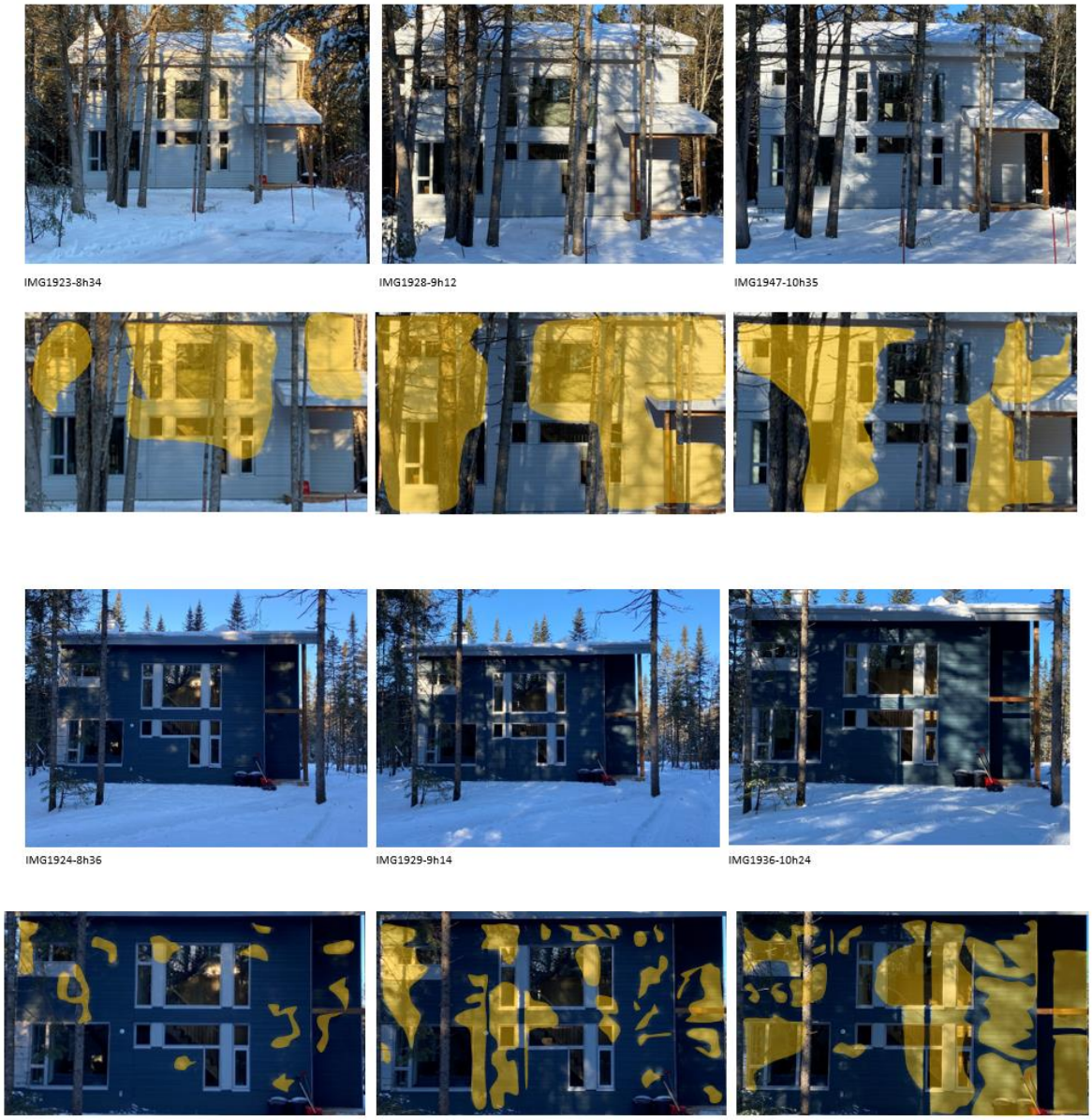
L'élément avait été mis en place pour en vérifier la performance, avec une orientation sud-est largement fenêtrée, et faisant face à une zone déboisée (secteur du champ d'épuration).

On pourra se référer au rapport de rd2 qui discute de la position approprié pour une telle installation par rapport à son orientation.

[38] Cette différence semble d'ailleurs se confirmer par la consommation réelle.

Au-delà du relevé, l'élément de maçonnerie procure incontestablement une sensation de bien-être et de confort dans l'espace, en plus d'absorber le son, par rapport à son comparatif dans La Sittelle, en contreplaqué.

Concernant les relevés, ils ont été limités à seulement trois visites, en raison de l'occupation des lieux, et compte tenu que des conditions de plein soleil étaient requises. Mais une chose est sure et plus importante que prévue, la quantité de branches en ombres projetées presque à l'horizontale (conditions d'hiver) limitent possiblement l'effet du soleil sur le réchauffement à l'intérieur.



Photos 7 – Conditions d'ensoleillement sur L'Hermine (images du haut) et La Sittelle (image du bas) à différentes heures de matinée – janvier 2022 – étude en cours de réalisation

Photos 8 – Relevés de températures de surfaces L'Hermine (à gauche) et La Sittelle (à droite)
Étude en cours de réalisation

8 CONCLUSION

Cette recherche réalisée sur les pavillons *d'Auvergne laboratoire vivant* s'inscrit à travers des enjeux de société touchant à la fois aux aspects environnementaux, énergétiques et économiques, tout en considérant le confort et de bien-être.

Les objectifs énoncés en début de rapport comprenaient deux volets principaux :

- Développer une méthodologie d'évaluation de performance simple et reproductible sur des bâtiments résidentiels,

- Communiquer les résultats du projet de recherche au profit des professionnels de la construction.

Une première phase avait été réalisés en 2019-2020. Elle avait porté sur l'enveloppe thermique du pavillon *Le Pierrot* (185 rue Paquet). Le rapport concluant à une bonne performance du système mural étudié tout un hiver, le système SITE (perfect wall). Le rapport tentait aussi de définir ce que pouvait représenter la « haute-performance » et établissait un cadre d'analyse en réponse aux objectifs de la recherche. Il proposait aussi une poursuite de la recherche sur d'autres pavillons de même type. Cette présente phase II de la recherche, entamée en 2021, y répond. Sans reprendre tous les résultats énumérés précédemment dans ce rapport de l'étude 2021-2022, les points essentiels y seront ici rappelés.

8.1 Considérations conceptuelles

Certaines approches ont été privilégiées dans le travail de conception effectué pour développer les nouveaux pavillons et en optimiser leur enveloppe.

Mener des études formelles

Une étude de forme telle la compacité ou encore des ratios de coins, de formes, de périmètres de fenêtres, etc. constitue un exercice permettant de mieux comprendre l'enveloppe, voire d'anticiper les ponts thermiques les plus significatifs. La rationalisation des surfaces et arêtes permet de cibler les points faibles.

Penser la paroi et le volume en terme de rentabilité et de compacité : une rationalisation effectivement, qui est vue dans le concept de projet global. Une rationalisation qui n'entraine aucun coût supplémentaire, au contraire. Elle diminuera les coûts et entrainera à cet égard moins de jonctions, moins de matériaux, moins d'empreinte environnementale, moins de consommation énergétique.

Prévoir l'imprévu

Intégrer la simulation comme outil d'analyse devient (ou doit devenir espérons-le) progressivement un incontournable en phase conception, dans une perspective de pérennité. Développer des détails non seulement pour gérer ce qui est prévisible, mais aussi répondre voire anticiper des conditions potentiellement problématiques, en chantier ou par après… telle n'est pas l'ultime quête d'un détail performant ?

Intégrer les impacts énergétique et écologiques tout au long du projet

Il s'agit te tendre à faire un projet meilleur, en attaquant de front différents aspects fondamentaux. Mais comment les aborder… et surtout de front ? L'écologie n'est plus une image « écolo », mais une valeur d'économie, d'efficacité et de rentabilité. La maison écologique n'est pas nécessairement celle que l'on pense.

Figure 9 – Faire entrer la maison dans l'écologie ou faire entrer l'écologie dans la maison ?
Source : à gauche Google image / à droite La Sittelle

Que représente un bâtiment *éco*…performant ? Dans l'esprit de l'auteur, il conviendrait peut-être de faire une architecture dont l'empreinte environnementale sera limitée au minimum, combinée à une consommation énergique limitée au minimum, tout en assurant une durabilité optimale, et tout en favorisant la notion du bien-être. Les pavillons d'*Auvergne laboratoire vivant* tendent, au moins un peu, à une vision écologique, qui doit passer inévitablement par cette préoccupation ultime : la question de l'énergie et de l'empreinte carbone, des préoccupations majeures répandues dans l'industrie, mais encore peu dans le résidentiel.

Les études combinées d'efficacité énergétique et d'ACV (analyse du cycle de vie) nous mettent rapidement au pied de choix parfois opposés, comme par exemple toute la question de l'isolant supplémentaire et son impact de fabrication et d'installation. Le comparatif entre les cinq scénarios[39] de cette étude a bien démontré que ce ne sont pas les assemblages les plus isolés qui sont globalement plus intéressants. En fait on

[39] On ne doit pas confondre la performance en ACV des 5 scénarios en lien avec leur approche constructive (mur SITE vs mur SIPE vs double-ossature). L'ACV est fait à partir des matériaux proprement dits, sans égard autres considérations.

parviendrait à optimiser notre enveloppe lorsque l'impact carbone additionnel relié au surplus de matériau serait compensé par une réduction significative de la consommation énergétique[40] :

Le choix des matériaux constitue, de fait, un défi majeur. La réalisation de la phase II d'*Auvergne laboratoire vivant* a permis à cet égard d'intégrer pour un des scénarios construits (L'Hermine) des matériaux biosourcés, afin d'en vérifier le bon comportement hygrothermique, qui s'est d'ailleurs concrétiser selon le suivi après travaux[41]. Le choix de tels matériaux, strictement au niveau performance[42], constitue un élément d'intérêt.

8.2 Comportement des systèmes et parois

Les projets qui ont été construits ne sont pas nécessairement représentatifs du milieu général de construction. Ils le sont certes plus que des maisons témoins expérimentales qui sont construites de façon « trop » méticuleuses. Mais il n'en demeure pas moins que les pavillons ont été faits en y portant une attention particulière. Avec les résultats suivants : deux enveloppes complètement différentes mais aux performance quasi-équivalentes et supérieures aux constructions conventionnelles. Tant le mur SITE (La Sittelle) que le mur SIPE (L'Hermine) ont été monitorés, et ils ont données des résultats excellents.

Toutefois, alors que le mur SITE de la phase I avait été investiguée de façon individuelle, la phase II permettait un comparatif (scénario 1A), qui a permis d'y associer certaines limitations, en le comparer au système conventionnel amélioré SIPE (scénario 2A).

[40] L'alimentation à la base d'hydro-électricité constitue une énergie « verte » et à une plus faible empreinte carbone que d'autres sources, comme l'a montré le rapport CT en « relocalisant » un des pavillons d'Auvergne en Ontario et en Alberta.
[41] Prendre note que dans le cas du chanvre, la propriété de déphasage n'a pu être mesurée dans le cadre du monitorage électronique, alors que ce type de comportement serait mesurable avec des changements subis de température sur le même côté d'une paroi. A développer ultérieurement.
[42] La question du surcoût desdits matériaux représente un enjeu dans la construction usuelle, et des ajustements sont souhaitables.

Identification des particularités du système SITE[43] (scénario 1A – La Sittelle) en comparaison au SIPE (scénario 2A – L'Hermine)	
Avantages du SITE par rapport au SIPE	**Désavantages du SITE par rapport au SIPE**
- Plans d'étanchéité principaux tous protégés de la pluie, du soleil et des basses températures - Étanchéité à l'air située du côté « chaud » par rapport à l'isolation - Pas de matière putrescible trappée entre deux plans d'étanchéité - Facilité de mettre en œuvre des matériaux dont la perméance est plus élevée vers l'extérieur, augmentant la vitesse d'assèchement - Recouvrement des ponts thermiques optimisée - Protection durant travaux assurée par le plan principal d'étanchéité, rapidement mise en place dans l'avancement des travaux - Espace libre entre les montants pour l'électromécanique	- Fixation du parement extérieur plus éloigné de la charpente, requérant une stratégie spécifique d'ancrage à chaque système - Espace libre « perdu » entre les montants et (quoique faible) augmentation de l'aire de projection au sol d'environ 2% - Pose « parfaite » requise du plan principal et unique d'étanchéité : toute fuite pouvant entrainer plus aisément des désordres[44] - La présence d'une fuite d'air est détectable directement car le « chemin » de l'air est plus direct qu'un système à plusieurs positions de plans d'étanchéité[45]. - Acoustique à considérer en raison des murs vides - Notion de confort plus délicate, en lien avec la température de confort[46] alors que des températures plus fraiches sont constatées en surface des parois - Déperditions de chaleur légèrement plus rapide (d'après le monitorage)

Tableau 18 – Comparatif de systèmes de murs

[43] Se référer au tableau 7 du rapport d'études de la phase I, daté du 23 mars 2020.
[44] La présence d'une pellicule pare-intempérie, soit une plan d'étanchéité supplémentaire intégré au système SITE, apparait à propos, tenant compte de cette faiblesse.
[45] Il y a lieu de se questionner : est-ce que l'avantage constructif du système SITE compense pour les faiblesses qu'il pourrait provoquer plus facilement, en condition de chantier ordinaire ?
[46] Les premières lectures de températures de surface intérieure faites en conditions d'ensoleillement, l'hiver, nous porte à penser que la température de surface des parois pourrait être légèrement plus basse, ce qui impacte sur la température de confort. Suivi à faire.

Les personnes qui ont expérimenté un certain temps les deux pavillons rapportent aussi une sensation de confort accru dans l'Hermine, ceci pouvant être le résultat à la fois de l'absence de vides dans les murs et la présence d'un isolant fibreux dense tel que le chanvre, jumelé probablement à la présence d'un mur de masse en plein centre de l'espace, comparé à un caisson de contreplaqué dans La Sittelle.

La simulation a montré qu'un assemblage SIPE avec membrane hygrovariable possède des capacités d'assèchement supérieurs, avec une gestion de l'humidité tout aussi intéressante que le SITE.

Au-delà et indépendamment des systèmes, des matériaux biosourcés ont été intégrés dans les murs de l'Hermine, afin d'en vérifier les répercussions. Les différences des analyses en ACV ou en efficacité énergétique sont, de fait, bien plus le résultat du choix des matériaux que du système constructif SITE ou SIPE proprement dit. Les analyses en ACV mettent ainsi en évidence certaines faiblesse pour les critères en *eutrophisation* ou en *destruction couche d'ozone*[47], pour la laine de chanvre et pour la fibre de roche, ce qui affecte les résultats des scénarios 2A et 2B (SIPE), sans lien direct avec le système comme tel. D'un autre côté, fait surprenant, les matériaux de polyisocyanurate et isolant EPS utilisés pour le scénario 1A semblent constituer un choix avantageux au point de vue environnemental, considérant évidemment aussi le gain énergétique résultant[48]. De tels conclusions démontrent à quel point des analyses plus poussées nous permettent de relativiser des idées souvent préconçues sur les matériaux.

8.3 Suggestions au-delà du genre et de l'espèce

L'exercice de réaliser les deux nouveaux pavillons, en continuité de la réflexion déjà entamée avec un premier il y a deux ans, met en évidences certaines considérations importantes:

- Répondre aux besoins primitifs d'une enveloppe : protéger les parois exposées pour minimiser l'entrée d'eau et la gestion conséquente d'humidité ;
- Développer de meilleurs réflexes de conception au lieu d'adopter systématiquement un assemblage précis, il n'y a pas nécessairement une façon de faire unique et meilleure de faire ;
- Voir la haute-performance comme un défi de détail de jonction et non pas seulement un défi dans le choix de système ;
- Intégrer certaines considérations à caractère bioclimatique, dans la mesure du possible ;

[47] Le rapport d'ACV de CT Consultants émet l'hypothèse que de tels résultats puissent être une question de collecte de données dans les informations fournies par le fabricant
[48] Par ordre décroissant en partant de la meilleure option : 1A, 1B, 2C, 2A, 2B. A noter que du 1er au 4e rang, la différence est peu significative (moins de 5% d'écart)

- Considérer l'enveloppe et les ambiances intérieures comme un vecteur du confort, que ce soit en terme de température des parois, convection naturelle et masse thermique[49] ;

- Intégrer dans le projet, si cela peut s'appliquer, les bienfaits de conditions d'usage en sous-sol, que ce soit pour l'étanchéité, l'isolation ou la fraîcheur. Sans vouloir vivre comme des hobbits, l'étude de compacité el le comportement du pavillon Le Pierrot (phase 1), qui possède un entre-sol, a tout de même démontré des avantages non-négligeables à cet égard.

8.4 Développement futur et partage

Il y aurait lieu d'entrecroiser éventuellement la démarche *d'Auvergne laboratoire vivant* avec les études qui débutent ou qui sont en cours de réalisation entre autres auprès du SEREX de même que du CIRCEB[50]

8.5 Perspective générale

En utilisant comme base d'étude deux petits bâtiments aux configurations un peu plus complexes que la normale, et avec des ouvertures de fenêtres en quantité et en grandeur un peu plus importantes que la normale, la performance supérieures des enveloppes respectives de L'Hermine et de La Sittelle a néanmoins été confirmée par la vérification en service, plus spécifiquement au niveau de l'étanchéité à l'air, qui surpasse les références Novoclimat et au niveau de la consommation énergétique, qui se retrouvera aux environ de 12 000 à 13 000 kWh sur un total annuel.

Les pavillons ont été construits suivant deux principes de murs différents. Quoique les deux systèmes SITE et SIPE aient excellé sur la période d'étude *automne 2021 - hiver 2022,* les cinq scénarios que nous avons étudiés ont démontré le potentiel technique d'autres systèmes, dont la double-ossature avec isolation à faible empreinte (ACV), double-ossature qui pourrait prendre la forme d'une configuration intégrant une ossature évoluée[51]. Nous avons déjà constaté que la double ossature, expérimentée en toiture (comme ici réalisé dans les pavillons), apporte une simplification des détails et une continuité aisément atteinte des plans d'étanchéité. Appliquer les leçons tirées des phases I et II du projet et réaliser éventuellement une telle approche serait prometteur.

Plus cette recherche évolue et plus nous croyons que <u>le succès d'une enveloppe n'est pas uniquement rattaché à son concept mais surtout à l'excellence de sa réalisation, à ses détails, et à la gestion des accidents</u>. À cet égard, des systèmes conventionnellement utilisés tels que le SIPE, peuvent être grandement bonifiés par l'intégration de membrane hygrovariable (sous certaines limitations) et de matériaux à plus forte perméance à la

[49] La présence combinée de la dalle chauffante, du mur intérieur massif et des parois de murs extérieure légèrement plus chaudes, dans l'Hermine, démontre comment les propriétés des matériaux peuvent jouer sur le bien-être.
[50] Étude dont fait partie l'APCHQ qui débute une recherche comparée mettant en évidence le SITE (*perfect wall*), étude similaire à celle faisant l'objet de ce rapport.
[51] Espacement de certains éléments répétitifs avec points d'ancrage intermittents.

vapeur d'eau vers l'extérieur[52], ou encore d'un troisième plan d'étanchéité rattaché à l'eau, tel que développé pour les murs de L'Hermine (SIPE, scénario 2A).

Cette étude a utilisé plusieurs indicateurs de performances : infiltrométrie, thermographie, monitorage électronique, enquête. Sans aller systématiquement aussi loin, il reste que certains essais de base tels que l'infiltrométrie et la thermographie[53] devraient être plus accessibles et plus utilisés dans le domaine résidentiel. Quant aux calculs énergétique et analyse de cycle de vie, il s'agit là de guides encore peu utilisés dans le domaine résidentiel.

Le rapport de la phase I concluait ainsi :

> *Il nous apparait essentiel de mesurer le résultat par rapport à l'effort… encore faut-il identifier l'effort à prioriser. À cet égard, et en nous basant sur les analyses de performances faits ici, de même que des références et programmes certification, il serait intéressant de développer et promouvoir un outil d'aide à la décision tant pour la conception, la mise en service qu'en post-construction. Un tel exercice serait non seulement bénéfique pour les projets d'Auvergne laboratoire vivant mais pour la communauté en général.*

Nous croyons toujours en cette nécessité de saisir l'opportunité de ces études afin de développer un tel outil d'aide, idéalement en combinaison avec les résultats à venir des études similaires faits actuellement par d'autres organismes

Richard Trempe arch. M.Sc.

[52] Le mur type de l'Hermine se différencie totalement du mur SIPE conventionnel avec panneau OSB vers l'extérieur (diffusion restreinte de l'humidité) et par un pare-vapeur intérieur (diffusion impossible de l'humidité vers l'intérieur)
[53] Des personnes qualifiées en la matière sont nécessaires (un marché à développer dans le résidentiel)