



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final – Septembre 2015

Projet ECO-Reno

Rénovation à faible impacts environnementaux dans le
domaine de l'habitation

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche « Energie dans les bâtiments »
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Mandataire:

Communauté de Recherche HEIG-VD & AIT-CETT
Route de Cheseaux 1
CH-1401 Yverdon-les-Bains
www.heig-vd.ch

Auteurs:

Jacques Bony, HEIG-VD, jacques.bony@heig-vd.ch
Stéphane Citherlet, HEIG-VD, stephane.citherlet@heig-vd.ch
Didier Favre, HEIG-VD, didier.favre@heig-vd.ch
Catherine Hildbrand, HEIG-VD, catherine.hildbrand@heig-vd.ch
Sébastien Lasvaux, HEIG-VD, sebastien.lasvaux@heig-vd.ch
Blaise Périsset, HEIG-VD, blaise.perisset@heig-vd.ch

Responsable de domaine de l'OFEN: M. Andreas Eckmanns, OFEN, CH-3003 Bern

Chef de programme de l'OFEN: Rolf Moser, Enerconom AG, Weyermannstrasse 20, Case postale 6022, CH-3001 Bern

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 8100083 - SI/500704-01

Les auteurs de ce rapport portent seuls la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Résumé

Actuellement, il est possible de concevoir des bâtiments qui ne consomment pratiquement plus d'énergie pour le chauffage voire qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. En optimisant le choix des matériaux et des systèmes, ces bâtiments peuvent aussi avoir un faible impact sur l'environnement. Cependant, il en va tout autrement pour le parc immobilier de bâtiments existants. La rénovation de ces bâtiments, pour obtenir une diminution substantielle des impacts environnementaux tout en maîtrisant les coûts, est plus complexe. Dans ce contexte, ce rapport présente les résultats du projet ECO-Reno dédié à la "Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation". Il vise à améliorer les connaissances sur les aspects économiques et environnementaux dans le domaine de la rénovation en ne tenant pas uniquement compte de l'énergie consommée, mais en ayant une vision plus globale incluant une approche par écobilans, qui tient compte également des matériaux utilisés pour le bâtiment et des installations techniques. Les travaux du projet ECO-Reno, qui se sont déroulés en parallèle des travaux de l'annexe AIE 56, ont permis de définir une méthodologie pour réaliser les analyses environnementales et économiques des bâtiments en travaillant à la fois sur l'aide à la décision pour la rénovation et sur l'évaluation *a posteriori* de ces choix.

Plusieurs axes et études de cas ont ensuite été analysés dans ce projet, afin d'améliorer les connaissances et les outils dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments: analyses financière et environnementale d'une rénovation énergétique exemplaire (WP1), développement et utilisation d'une méthodologie d'aide au choix des épaisseurs optimales d'isolation sur le plan financier et environnemental pour les professionnels de la construction (WP2), comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et de système de chauffage électrique sur des habitats individuel et collectif (WP3). Enfin, différentes contributions, en plus de la méthodologie d'écobilans, ont été faites dans le cadre de l'annexe AIE 56 (p.ex. fiche synthétique pour présenter les performances énergétiques, financières et environnementales, des bâtiments avant et après rénovation).

Les résultats de ce projet ont montré qu'il est possible de réduire fortement les impacts environnementaux après rénovation. Cependant, les valeurs indicatives SIA 2040 ne sont pas toujours respectées ce qui montre que les objectifs de la société à 2000 Watts en Suisse sont un vrai défi. D'un autre côté, les coûts engendrés par la rénovation de bâtiment (notamment l'enveloppe thermique) peuvent être conséquent et constituer un frein pour les propriétaires. Concernant le chauffage électrique, son remplacement par d'autres systèmes de chauffage peut engendrer des coûts élevés notamment si un local technique et/ou de stockage doit être créé.

Les outils produits dans le cadre de projet permettent toutefois d'orienter les professionnels du bâtiment vers des choix en minimisant les impacts environnementaux tout en maîtrisant les coûts induits par la rénovation.

Abstract

Today, it is possible to design buildings with a nearly-zero energy consumption to buildings that produce more energy than they actually consume. By optimising the choice of materials and integrated technical systems, these buildings can also present a low environmental impact. However, the situation is rather different for the existing building stock. In this case, to get a substantial decrease of the environmental impacts while keeping up the costs, the choice of the most relevant energy related renovation solution turns out to be rather complex. Within this context, a project was conducted to investigate low environmental impact renovations of single and multi-family houses. This report presents their main findings. The ECO-Reno project aimed at improving the knowledge on the economic and environmental aspects of energy related renovation solutions by taking into account not only the operational energy consumption but also the outcome of a Life Cycle Assessment approach which integrates both building materials and technical systems. A methodology to perform building economic and environmental analyses was defined that considers both decision making aid for the renovation process and on the late assessment of the choices made.

Several issues have been addressed by this project: economic and environmental analyses of a reference outstanding case (WP1), development and use of a methodology allowing the building sector key actors to determine the optimal insulation thickness under both economic and environmental considerations (WP2), comparison of different scenarios for the renovation of a direct electric heating system for single and multi-family houses (WP3). Finally, different contributions were provided within the framework of the IEA annex 56 such as the LCA methodology to assess energy related renovation solutions and a renovation report summary of the energy, economic and environmental performances of the building before and after renovation.

Overall, this project showed that it is possible to significantly reduce the environmental impacts of buildings following an energy related renovation. As far as environmental indicators are concerned, the indicative values stated by the SIA 2040 are not always fulfilled, which shows that the objectives of the 2000-Watt society in Switzerland pose a real challenge. In addition, the related renovation costs could be substantial and hinder the energy renovation process of buildings. The electric heating system retrofit could also increase the costs particularly if additional technical rooms are required.

Within that context, the results obtained in the ECO-Reno project can provide a useful guide to the building sector key actors in their choices to minimise the environmental impacts while keeping up the costs induced by the renovation.

Introduction générale

Actuellement, il est possible de concevoir des bâtiments qui ne consomment pratiquement plus d'énergie pour le chauffage voire qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment. En optimisant le choix des matériaux et des systèmes, ces bâtiments peuvent aussi avoir un faible impact sur l'environnement. Il en va tout autrement pour le parc immobilier de bâtiments existants. La rénovation de ces bâtiments, pour obtenir une diminution substantielle des impacts environnementaux tout en maîtrisant les coûts, est plus complexe. Les exemples existants sont peu nombreux et encore peu connus des professionnels de la construction et des propriétaires de bâtiment. Dans ce contexte, le projet ECO-Reno vise à faire progresser les connaissances sur les aspects économiques et environnementaux de rénovations de bâtiments en ne tenant pas uniquement compte de l'énergie consommée, mais en ayant une vision plus globale en incluant une approche par écobilans, qui se base sur une structuration du calcul des impacts par une analyse de cycle de vie (ACV). Celle-ci permet d'avoir une vision globale des aspects financiers et environnementaux d'un bâtiment rénové en tenant compte de l'énergie consommée durant la phase d'utilisation, des matériaux utilisés pour le bâtiment et des installations techniques.

Cependant, de nombreuses questions se posent lors d'une rénovation énergétique : doit-on plutôt rénover l'enveloppe, se concentrer sur les installations techniques ou procéder aux deux simultanément ? Au niveau de l'isolation thermique de l'enveloppe, quelles sont les épaisseurs optimales qui réduisent les impacts environnementaux tout en maîtrisant les coûts ? Est-il intéressant du point de vue financier et environnemental de remplacer les chauffages électriques des bâtiments existants par des systèmes nécessitant la création de nouvelles distributions pour le chauffage ? N'est-il pas plus intéressant de rénover l'enveloppe thermique de ces bâtiments et de conserver le chauffage électrique ?

Pour répondre à ces différentes problématiques, des analyses énergétiques et financières permettent d'apporter des premières réponses. Toutefois, afin de compléter la vision des performances d'un bâtiment après rénovation, il est apparu important de réaliser des écobilans. Ainsi, plusieurs axes ou études de cas ont été analysés dans ce projet, afin d'améliorer les connaissances et les outils dans le domaine de la rénovation énergétique des bâtiments, dont voici les principaux :

- Développement d'une méthodologie pour effectuer l'écobilan des bâtiments rénovés. Ce travail s'est déroulé en lien étroit avec les partenaires de l'annexe AIE 56.
- Analyse financière et environnementale d'une rénovation énergétique exemplaire (réduction d'un facteur 10 de la consommation de chauffage).
- Analyses de scénarios de rénovation de l'enveloppe complète (façade, toiture et plancher), de composants particuliers (isolation thermique, vitrages) ou d'installations techniques de production de chaleur pouvant être installées en remplacement du chauffage électrique.
- Développement et utilisation d'une méthodologie d'aide au choix des épaisseurs optimales d'isolation sur le plan financier et environnemental pour les professionnels de la construction.
- Développement et utilisation d'une fiche synthétique pour présenter les performances énergétiques, financières et environnementales, des bâtiments avant et après rénovation.

Les travaux ont été menés à la fois sur des habitats individuels ou collectifs afin d'obtenir des résultats plus représentatifs en travaillant à la fois sur l'aide à la décision pour la rénovation et sur l'évaluation a posteriori de ces choix. Ces différents travaux sont structurés en quatre workpackages (WP), à savoir :

- Le WP1 "Analyses environnementale et financière d'une rénovation exemplaire d'habitation multifamiliale" présente les résultats économiques et environnementaux suite à la rénovation à haute performance énergétique d'un bâtiment d'habitation multifamilial (env. 60 appartements). Il s'agit d'une étude complémentaire au projet OFEN Reno-HP terminé en 2011.
- Le WP2 "Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations" présente une méthodologie permettant de calculer les épaisseurs optimales d'isolation (EOI) et les couples *isolant/système de chauffage* lors d'une rénovation.
- Le WP3 "Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique" présente les résultats des analyses de différents scénarii de rénovation de villas et bâtiments collectifs (rénovation de l'enveloppe et/ou des installations techniques), afin de déterminer quelle solution est la plus intéressante du point de vue financier et environnemental.

- Le WP4 présente quant à lui les contributions du LESBAT aux travaux menés dans le cadre de l'annexe AIE 56 et notamment la partie coordonnée par le LESBAT sur la méthodologie d'écobilans pour la rénovation énergétique.

Afin de faciliter la lecture du présent rapport, celui-ci se compose des 6 parties suivantes :

- **PARTIE A : Synthèse du projet**
Cette synthèse reprend les points essentiels de chacun des quatre WP. La synthèse comporte une structure et un nombre de pages identique par WP.
- **PARTIE B : Rapport WP1**
"Analyses environnementale et financière d'une rénovation exemplaire d'habitation multifamiliale"
- **PARTIE C : Rapport WP2**
"Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations"
- **PARTIE D : Rapports WP3.1 et WP3.2**
"Systèmes existants de chauffage électrique et analyse des solutions possibles pour leur substitution "
- **PARTIE E : Rapport WP3.3a**
"Application sur une étude de cas d'habitat individuel"
- **PARTIE F : Rapport WP3.3b**
"Application sur une étude de cas d'habitat collectif "

Chaque partie est construite sous forme de rapport et possède sa propre table des matières.



Projet ECO-Reno - Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation

PARTIE A

Synthèse du projet

Table des matières

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| TABLE DES MATIÈRES..... | 2 |
| LISTE D'ABREVIATIONS..... | 3 |
| 1 ANALYSE ENVIRONNEMENTALE ET FINANCIÈRE D'UNE RÉNOVATION EXEMPLAIRE D'HABITATION MULTIFAMILIALE (WP1 – PARTIE B)..... | 4 |
| 1.1 Cadre de l'étude, problématique et objectifs | 4 |
| 1.2 Méthodologie | 4 |
| 1.2.1 Cas d'application | 4 |
| 1.2.2 Écobilan de la rénovation | 5 |
| 1.2.3 Calcul du temps de retour sur investissement | 5 |
| 1.3 Principaux résultats | 6 |
| 1.3.1 Écobilan avant et après rénovation | 6 |
| 1.3.2 Positionnement par rapport aux valeurs cibles SIA 2040 (société 2000 W) | 6 |
| 1.3.3 Retour sur investissement de la rénovation | 7 |
| 1.4 Conclusions et perspectives | 8 |
| L'essentiel du WP1 | 9 |
| 2 OPTIMUM ENVIRONNEMENTAL ET FINANCIER DES ISOLATIONS POUR LES RÉNOVATIONS (WP2 – PARTIE C) | 10 |
| 2.1 Cadre de l'étude, problématique et objectifs | 10 |
| 2.2 Méthodologie | 10 |
| 2.2.1 Épaisseurs optimales d'isolation (EOI) | 10 |
| 2.2.2 Cas d'application | 11 |
| 2.3 Principaux résultats | 11 |
| 2.3.1 Comparaison des EOI financières et environnementales | 11 |
| 2.3.2 Couples isolant/système de chauffage optimaux | 12 |
| 2.3.3 Influence des paramètres de calcul sur les EOI | 12 |
| 2.3.4 Comparaison de la méthode EOI par rapport aux calculs selon les normes et labels en vigueur | 13 |
| 2.4 Conclusions et perspectives | 15 |
| L'essentiel du WP2 | 15 |
| 3 COMPARAISON DE SCÉNARIOS DE RÉNOVATION DE L'ENVELOPPE ET DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE (WP3 – PARTIES D, E & F) | 16 |
| 3.1 Cadre de l'étude, problématique et objectifs | 16 |
| 3.2 Méthodologie | 16 |
| 3.2.1 Détermination du scénario optimal | 16 |
| 3.2.2 Application sur des études de cas | 18 |
| 3.3 Principaux résultats | 19 |
| 3.3.1 Habitat collectif | 19 |
| 3.3.2 Habitat individuel | 21 |
| 3.4 Conclusions et perspectives | 22 |
| L'essentiel du WP3 | 23 |
| 4 CONTRIBUTION AUX TRAVAUX DE L'ANNEXE AIE 56 | 24 |
| 4.1 Etat de l'art suisse dans le domaine des écobilans | 24 |
| 4.2 Méthodologie d'écobilan pour la rénovation | 24 |
| 4.2.1 Développement de la méthodologie d'écobilan pour la rénovation | 24 |
| 4.2.2 Contribution à l'analyse des résultats d'écobilans des études de cas | 25 |
| 4.3 Contribution à la documentation de rénovations exemplaires | 25 |
| 4.3.1 Shining example | 25 |

| | | |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3.2 | Integrated Performance View (IPV) | 25 |
| 4.4 | Autres activités menées | 26 |
| 4.4.1 | Outil d'aide à la rénovation énergétique et environnemental | 26 |
| 4.4.2 | Présentation de la méthodologie de calcul de l'optimum environnemental et financier des isolations | 27 |
| 4.4.3 | Echanges avec les partenaires de l'annexe 57 | 27 |
| 4.4.4 | Participation au workshop de l'annexe 56 à la conférence IBPC'2015 | 27 |
| 4.5 | Conclusions et perspectives | 27 |
| 5 | RÉFÉRENCES..... | 28 |

Liste d'abréviations

| | | |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| ACV | Analyse de cycle de vie | [-] |
| A _E | Surface de référence énergétique | [m ²] |
| AE | Air-eau | [-] |
| AIE | Agence Internationale de l'Energie | [-] |
| AT | Autriche | [-] |
| CED | Demande cumulée d'énergie | [MJ/an] |
| CED _{NRE} | Energie primaire non renouvelable | [MJ/an] |
| COP | Coefficient de performance | [-] |
| CT | Cahier technique | [-] |
| CZ | République Tchèque | [-] |
| DV | Double vitrage | [-] |
| ECS | Eau chaude sanitaire | [-] |
| Él. | Système de chauffage électrique | [-] |
| EOI | Epaisseur optimale d'isolation | [cm] |
| EPS | Polystyrène expansé | [-] |
| G | Gaz | [-] |
| GWP | Potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential) | [kgCO ₂ - éq/an] |
| IPV | Integrated Performance View | [-] |
| IT | Italie | [-] |
| KBOB | Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics | [-] |
| LCIA | Life cycle impact assessment | [-] |
| LED | Diode électroluminescente | [-] |
| M | Mazout | [-] |
| N | Norvège | [-] |
| PAC | Pompe à chaleur | [-] |
| PPE | Propriété par étage | [-] |
| PUR | Polyuréthane | [-] |
| PV | Panneaux solaire photovoltaïque | [-] |
| R | Radier | [-] |
| S | Solaire | [-] |
| S _{Th} | Solaire thermique | [-] |
| T _R | Temps de remboursement | [an] |
| TV | Triple vitrage | [-] |
| UBP | Eco-points UBP (méthode Ecological Scarcity) (Umweltbelastungspunkte) | [UBP] |
| VI | Valeurs indicatives norme SIA 2040 | [-] |

1 Analyse environnementale et financière d'une rénovation exemplaire d'habitation multifamiliale (WP1 – Partie B)

1.1 Cadre de l'étude, problématique et objectifs

Lors d'une rénovation, plusieurs actions peuvent être entreprises comme par exemple la rénovation de l'enveloppe thermique ou l'amélioration de la performance des installations techniques. Le premier intérêt de ces mesures reste la réduction de la consommation d'énergie finale liée aux consommations énergétiques pendant le fonctionnement du bâtiment. Cependant, il est tout aussi important d'évaluer les coûts engendrés par la rénovation en tenant compte des coûts d'investissement et des coûts liés aux consommations énergétiques. De même, il est utile de vérifier si la rénovation énergétique apporte des bénéfices sur le plan environnemental en réduisant les émissions de gaz à effet de serre ou la consommation d'énergie primaire non renouvelable.

Dans ce contexte, le WP1 du projet ECO-Reno s'intéresse à la réalisation d'analyse de coûts et d'analyse de cycle de vie (ACV) d'un bâtiment d'habitation collectif (59 appartements), situé à Morges. Ce bâtiment a subi en 2010 une rénovation complète de son enveloppe thermique ainsi que de ses installations techniques. Sur mandat de l'OFEN, des analyses énergétiques, de confort thermique des occupants et de la qualité de l'air ont déjà été effectuées par le LESBAT [1]. Ce premier travail a permis de confirmer le gain très important en énergie de chauffage de la rénovation de cet immeuble prévu lors de la phase de planification. Cependant, aucune étude n'a encore pu quantifier les coûts et impacts environnementaux liés à cette rénovation.

Le premier objectif de cette étude est d'évaluer les performances globales de la rénovation d'un point de vue environnemental en tenant compte à la fois des impacts des matériaux ajoutés et des consommations énergétiques. Puis, un positionnement des résultats d'impacts du bâtiment par rapport aux valeurs cibles de la société à 2000 W [2] est effectué. Le deuxième objectif est d'évaluer les performances globales de la rénovation d'un point de vue financier en calculant le temps de retour sur investissement (appelé également temps de remboursement).

1.2 Méthodologie

La méthodologie appliquée pour les analyses financières et environnementales suit l'approche définie dans le cadre de l'Annexe 56 [3] de l'Agence Internationale de l'Energie à laquelle le LESBAT a participé en tant que coordinateur de la partie dédiée au développement de la méthodologie d'écobilan pour une rénovation énergétique de bâtiment (cf. synthèse WP4 au ch. 4).

1.2.1 Cas d'application

Le bâtiment analysé, situé à Morges (VD) a été construit à la fin des années 60. Ce bâtiment possède 59 appartements et un rez-de-chaussée occupé par une surface commerciale. Durant l'année 2010, une rénovation complète a été faite sur la partie habitation de ce bâtiment. La figure 1 montre une vue du bâtiment avant et après rénovation.



Figure 1: Visualisation du bâtiment avant et après rénovation

Cette rénovation a concerné l'enveloppe thermique ainsi que les installations techniques (chauffage, ECS et ventilation). On peut également mentionner la pose de compteurs individuels de chaleur pour l'ECS et l'installation de luminaires LED dans les zones de circulation. Toutes ces mesures ont permis de réduire la consommation d'énergie du bâtiment. Par contre, le remplacement de la ventilation simple flux par un système double flux a engendré une consommation électrique supplémentaire. Cette rénovation a permis de diminuer la consommation d'énergie finale du bâtiment d'un facteur cinq et de diviser par un facteur supérieur à 10 la consommation d'énergie finale pour le chauffage.

1.2.2 Écobilan de la rénovation

Les impacts environnementaux du bâtiment ont été quantifiés à l'aide d'une analyse de cycle de vie (ACV) détaillée, de sa construction à l'élimination des déchets engendrés par sa démolition. L'ACV permet de comparer l'écobilan du bâtiment avant et après rénovation. Les éléments pris en compte dans l'analyse sont répartis sous les postes "matériaux" et "énergie consommée".

Le poste "matériaux" regroupe tous les matériaux ajoutés permettant d'améliorer les performances énergétiques du bâtiment, comme l'amélioration de l'enveloppe thermique ainsi que les systèmes techniques ajoutés ou remplacés lors de la rénovation (installations de production et de distribution de chaleur; installations de ventilation). Le poste "énergie consommée" regroupe les consommations énergétiques pour le chauffage, l'ECS, la ventilation, l'éclairage et les auxiliaires.

Afin de se mettre dans les mêmes conditions que les professionnels de la construction, le bilan thermique a été effectué avec Lesosai 7.4 [4] qui est compatible aux normes SIA ad hoc. Ce logiciel a été utilisé pour effectuer les bilans thermiques du bâtiment avant et après rénovation. Ces bilans ont ensuite été validés avec les consommations réelles relevées sur le bâtiment. Le modèle du bâtiment rénové a ensuite été exportée vers Eco-Bat 4.0 [5] qui a permis de réaliser un écobilan conforme à la méthodologie définie par l'Annexe 56. Eco-Bat 4.0 utilise comme source de données la liste de recommandations de la KBOB [6] en matière d'écobilans. Celle-ci regroupe un ensemble de données d'impacts de matériaux de construction, d'installations techniques et de vecteurs énergétiques.

Définitions

Les indicateurs environnementaux utilisés dans cette étude sont :

- **CED_{NRE}** [MJ] : énergie primaire non-renouvelable.
- **CED_{TOT}** [MJ] : énergie primaire totale (renouvelable et non-renouvelable). Les résultats pour cet indicateur sont présentés uniquement dans le rapport complet disponible en annexe
- **GWP** [kg CO₂-eq] : émissions de gaz à effet de serre.
- **UBP** [Pts] : quantifie les charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de l'élimination des déchets.

1.2.3 Calcul du temps de retour sur investissement

Le calcul du temps de retour sur investissement a été défini sur la base de la méthode de l'annuité. Pour ce faire plusieurs hypothèses ont été posées :

- Coût de l'énergie considéré pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et les locaux communs (éclairage des couloirs, ascenseurs, buanderie).
- L'investissement se base uniquement sur les dépenses de la rénovation ayant une influence sur les performances énergétiques du bâtiment.
- Les subventions du "programme Bâtiments [7]" et de Minergie-P® du canton de Vaud sont comptabilisées
- Les déductions fiscales ne sont en générale pas divulguées par le propriétaire et dépendent de sa situation financière et par soucis de cohérence ne sont pas prises en considération.
- L'augmentation annuelle du coût de l'énergie basé sur SIA 480 [8] (i.e., gaz naturel : 1.0%, électricité : 0.0%)
- Taux d'intérêt de l'emprunt : 3%
- Durée de l'emprunt : fonction de la durée de vie de l'élément considéré selon le CT SIA 2032 [9]

- Années utilisées comme bases de calcul des prix : 2010 (avant rénovation) : 2012 (après rénovation)

1.3 Principaux résultats

1.3.1 Ecobilan avant et après rénovation

Les résultats de l'écobilan du bâtiment avant et après rénovation sont présentés à la figure 2 pour les trois indicateurs CED_{NRE}, GWP et UBP:

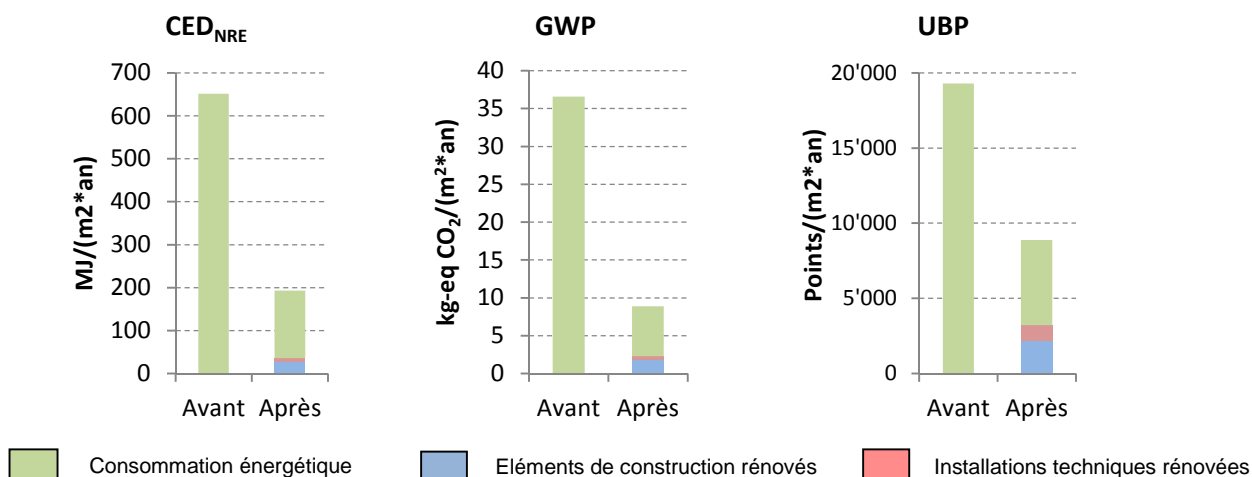


Figure 2: Ecobilan avant et après rénovation pour les indicateurs CED_{NRE}, GWP et UBP

Quel que soit l'indicateur, la rénovation permet de réduire l'impact environnemental du bâtiment d'un facteur 2 pour l'UBP à 4 pour le GWP. Ceci est principalement dû à la réduction massive des impacts du chauffage liée à la rénovation de l'enveloppe.

Malgré la forte diminution de la consommation d'énergie du bâtiment, ce poste reste toujours prépondérant par rapport aux autres. Après rénovation, la consommation globale énergétique du bâtiment représente entre 63 et 81% des impacts environnementaux selon l'indicateur observé. L'impact lié aux nouvelles installations de production/distribution de chaleur et de ventilation est compris entre 4% et 6% des impacts globaux à l'exception de l'indicateur UBP (12% des impacts totaux du bâtiment rénové). Les matériaux ajoutés, afin d'améliorer les performances de l'enveloppe thermique, sont quant à eux responsables de 15 à 25% des impacts totaux.

1.3.2 Positionnement par rapport aux valeurs cibles SIA 2040 (société 2000 W)

Il est possible de situer les performances environnementales de ce bâtiment après rénovation pour les indicateurs CED_{NRE} et le GWP par rapport aux valeurs indicatives du cahier technique SIA 2040 [2]. L'évaluation est découpée en trois parties, à savoir "Construction", "Exploitation" et "Mobilité". L'emplacement du bâtiment ne pouvant être modifié lors d'une rénovation énergétique, seules les deux premières phases sont évaluées ici. Les valeurs du cahier technique ne sont données comme valeur recommandée qu'à titre informatif, car seule la somme des trois valeurs (construction + exploitation + mobilité) constitue une limite à ne pas dépasser pour que le bâtiment soit conforme aux exigences de la société à 2000 [W].

La figure suivante montre le positionnement du bâtiment pour les deux indicateurs considérés dans la SIA 2040, pour les phases "Construction" et "Exploitation" :

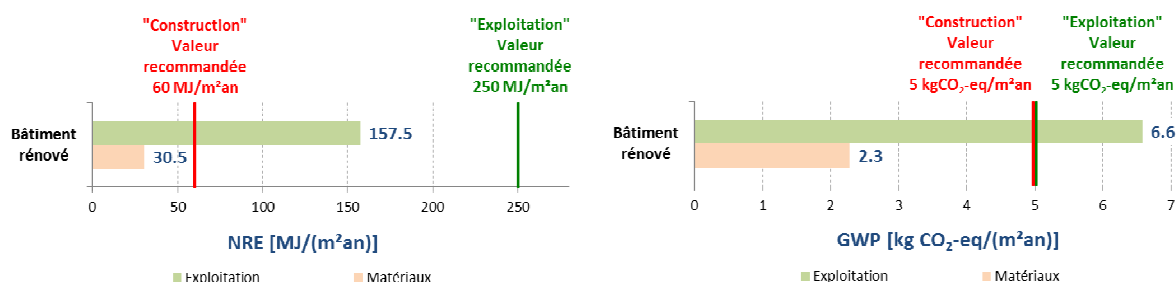


Figure 3: Valeurs indicatives ("Construction" + "Exploitation") SIA 2040 et valeurs du bâtiment après rénovation pour l'indicateur CED_{NRE} et GWP

La valeur du projet pour la phase "Construction" est inférieure à la valeur indicative tant pour le CED_{NRE} que pour le GWP. Dès lors, les choix de rénovation de l'enveloppe et des installations techniques du bâtiment semblent bons. Toutefois, il faut rappeler que les valeurs indicatives de la phase "Construction" ont été calculées sur un périmètre plus complet que celui de l'Annexe 56, en tenant compte des éléments qui ne modifient pas la performance thermique comme p. ex. les installations sanitaires et électriques. La valeur du projet pour la phase "Exploitation" est inférieure à la valeur indicative pour l'indicateur CED_{NRE}. Par contre, elle est légèrement supérieure à la valeur indicative de l'indicateur GWP. Cela est dû principalement à l'utilisation du gaz comme vecteur énergétique pour la production de chaleur (chauffage et ECS).

1.3.3 Retour sur investissement de la rénovation

La figure 4 montre une représentation graphique du principe de calcul du temps de remboursement (T_R) financier de la rénovation. Cette représentation est valide quelle que soit la valeur du taux d'intérêt et de l'augmentation des coûts de l'énergie.

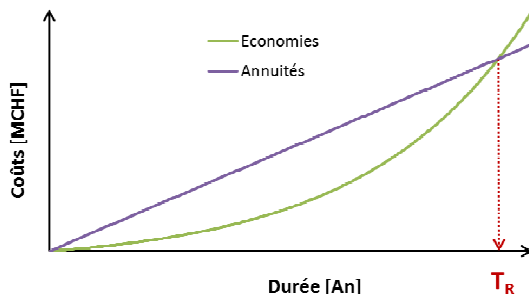


Figure 4: Représentation graphique de la détermination du temps de remboursement (T_R) de la rénovation

Le temps de remboursement correspond à la valeur de l'axe des abscisses située au croisement de la courbe des annuités (en violet) avec la courbe des économies d'énergie (en vert). Ce point correspond à la rentabilité financière de la rénovation. Ce calcul reste dépendant de l'augmentation du coût de l'énergie, paramètre difficile à prédire sur le long terme. Dans cette étude, une analyse de sensibilité a été réalisée pour déterminer le temps de remboursement selon trois scénarii d'évolution du prix du vecteur énergétique utilisé dans le bâtiment analysé (gaz). Le tableau 1 présente les hypothèses et les résultats de cette étude avec un taux d'emprunt égal à 3%.

| Taux d'augmentation du prix du gaz [%/an] | T_R [an] | Remarque |
|-------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1.00 | 279 | Taux selon SIA 480 [8] |
| 2.50 | 115 | Taux observé durant la période 2006 – 2014 [10] |
| 4.85 | 60 | Taux permettant d'atteindre un remboursement sur la durée de l'étude |

Tableau 1: Temps de remboursement (T_R) selon différents taux d'augmentation du prix du gaz

Les résultats montrent que le calcul selon la norme SIA 480 (taux d'augmentation de 1.00%) ne permet pas d'atteindre une rentabilité financière avant 279 ans soit près de 4,5 fois la durée d'analyse de cette étude (60 [ans]). En considérant un taux d'augmentation du gaz basé sur le taux observé sur la période 2006-2014 (1.85%), le temps de remboursement chute à 115 [ans] ce qui reste près de 2 fois la durée entre deux rénovations (60 ans), pris comme référence dans la méthodologie de l'Annexe 56. Seul un taux égal à 4.85% permet d'amortir les coûts de la rénovation sur 60 [ans]. Cependant, cette valeur, très élevée, n'a jamais été observée sur une telle durée. Ce scénario reste donc théorique.

La figure 5 présente une comparaison graphique des coûts annualisés avant et après rénovation pour les différents postes (matériaux, installations techniques et énergie) selon deux scénarii d'évolution des coûts de l'énergie : 1.00% et 4.85%. Il permet de vérifier graphiquement si l'investissement sera remboursé sur la période de l'étude i.e., 60 [ans].

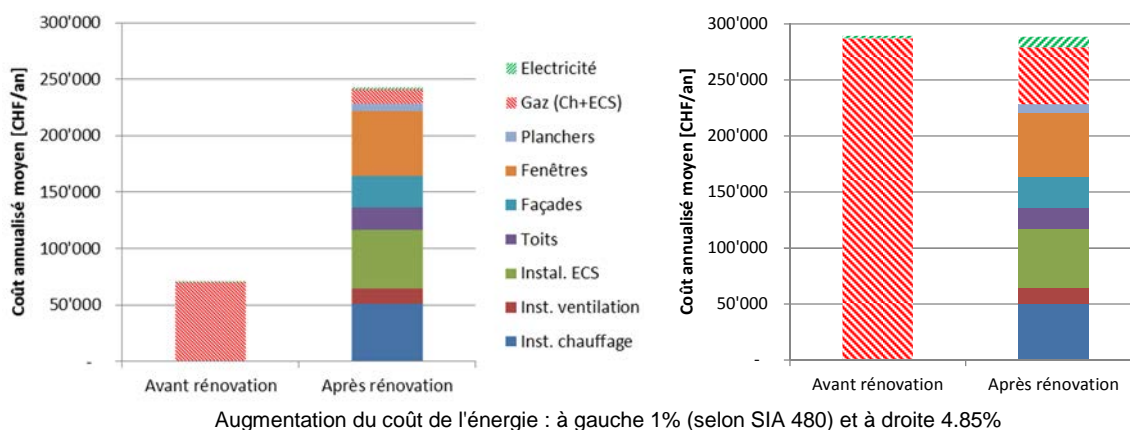


Figure 5: Parts financières annuelles liées aux différents éléments de la rénovation et à la consommation énergétique, à gauche avec augmentation du coût de l'énergie de 1% et à droite 4.85 %

Ces résultats montrent à nouveau, que d'un point de vue financier, les coûts engendrés par la rénovation énergétique du bâtiment de Morges ne peuvent pas être absorbés par l'économie d'énergie résultant de la rénovation dès l'instant que l'augmentation du coût de l'énergie reste au-dessous de 4.85%. Selon le scénario de la norme SIA 480, le coût total par année pour le bâtiment reste plus de trois fois supérieure au coût avant rénovation, et ceci, malgré la conséquente diminution de la consommation d'énergie de chauffage. La majorité des coûts reste liée à la rénovation des éléments de l'enveloppe et des installations techniques. Les installations pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire représentent, par exemple, 42% du coût total annualisé suivi par le coût lié aux remplacements des fenêtres (22%) et des façades (12%).

Ainsi, en considérant le taux d'augmentation du prix du gaz de la norme SIA 480, cette rénovation énergétique n'est pas intéressante mais a le mérite de montrer le potentiel d'économie d'énergie et d'impacts environnementaux possibles pour ce type de bâtiment et de rénovation.

1.4 Conclusions et perspectives

Le travail effectué dans le cadre de ce WP1 a permis de compléter par une approche environnementale et financière une étude initialement axée sur les performances énergétiques d'un bâtiment locatif rénové. Les impacts environnementaux du bâtiment ont été réduits de manière conséquente malgré l'apport de matériaux supplémentaires (enveloppe thermique et installations techniques). Une fois la rénovation réalisée et selon l'indicateur environnemental choisi, l'impact des matériaux représente entre 19 et 37% de l'impact total, d'où l'intérêt d'utiliser des matériaux à fonctionnalité équivalente mais ayant le plus faible impact possible. Le remplacement et l'ajout d'installations techniques, comme le remplacement de la chaudière et la distribution de chaleur permettent de diminuer les impacts environnementaux d'environ 15% par rapport au bâtiment sans rénovation. La comparaison des valeurs environnementales de ce bâtiment obtenues après rénovation avec les valeurs indicatives fournies pour la société à 2000 W montre que les solutions constructives du bâtiment sont bonnes. Par contre, la comparaison de ces valeurs pour la phase "Exploitation" indique que la valeur du bâtiment obtenue pour l'indicateur GWP est légèrement supérieure à la valeur indicative recommandée, ce qui s'explique par

l'utilisation du gaz comme vecteur énergétique pour le chauffage et l'ECS. D'une façon globale, et sans considérer la partie mobilité, le bâtiment remplit les exigences de la société à 2000 W. Le dépassement du GWP au niveau de l'exploitation est compensé par le faible impact de la partie construction.

L'analyse financière de cette rénovation énergétique présente des conclusions plus nuancées. Une première analyse du temps de remboursement financier de la rénovation, basée sur les taux d'augmentation du coût de l'énergie fournie par la SIA 480, montre que ce temps de remboursement (> 250 ans) ne peut satisfaire aucun investisseur. Ainsi, cette étude montre que le remboursement de l'investissement n'est pas envisageable sur une durée réaliste en dépit des économies d'énergie réalisées grâce à la rénovation de l'enveloppe et des installations techniques. Seul un scénario d'augmentation des coûts de l'énergie de 4.85% permet d'amortir les coûts de la rénovation sur la durée de l'étude (60 ans), ce qui, par le passé, n'est jamais arrivé.

Cette durée nécessaire au remboursement de la rénovation énergétique doit cependant être différenciée selon le modèle d'habitation (propriétaire, PPE ou locataire).

Pour le bâtiment étudié, c'est une augmentation de l'ordre de 20% par m² de surface habitable qui a été reportée sur les locations. Elle tient compte des coûts liés à la rénovation complète du bâtiment : rénovation énergétique (enveloppe, systèmes) et rénovation des appartements. Cette valeur permet à la fois de maintenir les appartements dans les prix du marché et à l'investisseur d'amortir les dépenses liées à la rénovation énergétique.

Dans le cas où le propriétaire habite son logement, le remboursement sera réalisé grâce aux économies d'énergie et restera tributaire de l'augmentation des coûts de l'énergie. A l'inverse, dans le modèle locatif, l'investisseur pourra envisager un retour sur investissement plus rapide en reportant une partie des surcoûts de la rénovation sur les locations. Le rapport complet du WP1 est disponible dans la partie B du présent document.

L'essentiel du WP1

→ Une rénovation énergétique permet de diminuer drastiquement la consommation d'énergie d'un bâtiment. Dans le cas du bâtiment de Morges (issu du projet OFEN Reno-HP, 2011), la diminution de la consommation de chauffage était d'un facteur 10.

→ L'écobilan a ensuite confirmé que les impacts environnementaux des matériaux et installations techniques nécessaires à la rénovation restent moins élevés que les impacts évités par la diminution de la consommation de chauffage. Ils représentent en moyenne entre un quart et un tiers du bilan après rénovation selon l'indicateur (CED_{NRE}, GWP ou UBP).

→ Au niveau financier, les économies d'énergie ne permettent pas de rentabiliser les investissements consentis sur une période raisonnable en utilisant le taux d'augmentation du prix du gaz de la norme SIA 480. Seule une augmentation annuelle du prix du gaz de 4.85%, valeur très incertaine et près de 5 fois plus élevée que le taux selon la norme SIA 480, permettrait d'amortir le coût sur 60 [ans].

→ Pour ce bâtiment collectif, un report des coûts de la rénovation énergétique sur les locations permet d'amortir l'investissement sur un horizon de temps plus court. Ce report dépend de différents critères d'optimisation financière visés par l'investisseur, mais doit rester en accord avec le droit du bail. Dans le bâtiment étudié dans ce WP 1, la rénovation complète du bâtiment (enveloppe, installations techniques, circulation et appartements) a entraîné une augmentation de 20% des loyers.

2 Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations (WP2 – Partie C)

2.1 Cadre de l'étude, problématique et objectifs

Lors d'une rénovation (ou d'une construction neuve), la structure du bâtiment n'est, en général, pas changée et le maître d'œuvre a le choix entre plusieurs isolants thermiques et/ou plusieurs types d'installations de chauffage. Dans la pratique, le choix des épaisseurs d'isolation est souvent dicté par la valeur de performance thermique que le bâtiment devra atteindre, ceci dans le but de répondre, soit à une valeur limite fixée par les normes, soit afin d'atteindre l'objectif d'un label (par exemple : Minergie®).

L'ambiguïté dans le choix d'épaisseur d'isolant réside dans le fait que les coûts et les impacts environnementaux du matériau isolant augmentent avec l'épaisseur alors que ces coûts et ces impacts liés à la consommation d'énergie de chauffage diminuent avec cette même augmentation d'épaisseur. Indépendamment des normes et des labels, il existe pour chaque couple *isolant/système de chauffage* une épaisseur d'isolation où la valeur des coûts et des impacts environnementaux totaux (matériau et énergie) est minimale. Cependant, cet optimum varie en fonction du type de matériau d'isolation (laine de pierre, EPS, etc.) et du type d'installation de chauffage (gaz naturel, pellets, etc.). Il n'est donc pas simple de déterminer ces épaisseurs d'isolation optimales et peu de travaux ont abordé cette question. Qui plus est en tenant compte des contraintes techniques de pose ou des subventions offertes par les différents programmes d'aide pour la rénovation énergétique (cantonal et fédéral).

Le premier objectif de cette étude est de déterminer les épaisseurs optimales d'isolation (EOI) de différents couples *isolant/système de chauffage*, ceci pour différents éléments de construction (façades, toitures), en recherchant les minima financiers et environnementaux entre les coûts de l'isolant (fourniture et pose) et les gains de chauffage obtenus grâce à celui-ci. Le second objectif est de déterminer, à partir des valeurs des EOI, les couples *isolant/système de chauffage* qui présentent les coûts annualisés et les impacts environnementaux les plus faibles.

La méthodologie développée et l'intégralité des résultats, discussions et interprétations sont présentées dans le rapport final WP2 disponible dans la partie C de ce document. Cette note de synthèse s'attache uniquement à rassembler les points importants relevés durant cette étude.

2.2 Méthodologie

2.2.1 Epaisseurs optimales d'isolation (EOI)

Pour définir l'épaisseur optimale d'isolation du point de vue financier ou environnemental, plusieurs paramètres doivent être introduits dans le calcul, à savoir :

- Caractéristiques physiques de l'élément de construction et de l'isolant (conduction thermique, masse volumique, etc.)
- Coûts et impacts liés à la fourniture et à la pose de l'isolant
- Coûts et impacts liés à la consommation d'énergie de chauffage du bâtiment, ceci en fonction du type de producteur de chaleur et du vecteur énergétique utilisé

Une méthodologie simplifiée de calcul des EOI des éléments opaques de construction (toiture et façade) a été développée, dont les résultats sont rapportés à un mètre carré d'élément pour faciliter les inter-comparaisons. Afin de se rapprocher de la pratique, les déperditions thermiques ont été calculées selon la norme SIA 380/1. La méthode de calcul tient également compte des contraintes spécifiques à la mise en œuvre des isolants et au domaine de la rénovation pour se rapprocher au mieux de la pratique (p.ex. prise en compte des doublages d'épaisseurs d'isolants aux épaisseurs maximales commercialisées, prise en compte des subventions, considération de prix fournis par des professionnels de la vente et de la pose d'isolation).

2.2.2 Cas d'application

Cette méthodologie a été appliquée sur quatre éléments représentatifs: une façade compacte, une façade ventilée, une toiture plate et une toiture inclinée.

Six systèmes de chauffage différents ont été considérés : électrique direct, gaz naturel, mazout, pompe à chaleur (PAC) air-eau (AE) et pellets. Le chauffage électrique a été intégré à cette étude, car dans le domaine de la rénovation, il s'agit d'une solution loin d'être anecdotique.

La durée de vie des isolants sont tirés de la SIA 2032. Un climat du plateau suisse a été pris comme base de calcul (Berne). Les gains solaires sont pris en compte en supposant, que les fenêtres sont positionnées en partie extérieure des façades. Ce choix reflète une configuration possible de mise en œuvre des fenêtres qui est recommandées lorsque les épaisseurs d'isolation deviennent importantes, afin de profiter au mieux des apports solaires. Les coûts sont tirées de valeurs du marché de 2014 obtenus auprès des professionnels. Les valeurs d'impacts sont tirées de la KBOB 2014. Les subventions correspondent aux soutiens des cantons et de la Confédération en 2014.

Quatre indicateurs ont été retenus pour présenter les résultats : les coûts (en [CHF/m²/an]), les émissions de gaz à effet de serre (GWP en [kg eq-CO₂/m²/an]), l'énergie primaire totale (CED_{TOT} en [MJ/m²/an]) et l'énergie primaire, non-renouvelable (CED_{NRE} en [MJ/m²/an]). Les résultats de chaque indicateur sont ensuite annualisés et exprimés par m² d'élément de construction afin de faciliter la comparaison.

2.3 Principaux résultats

2.3.1 Comparaison des EOI financières et environnementales

Un premier résultat a permis de montrer que les épaisseurs optimales d'isolation (EOI) financières se situent majoritairement à des épaisseurs inférieures aux EOI environnementales. Cette constatation se vérifie pour l'ensemble des éléments de construction étudiés. A titre d'illustration, la représentation graphique ci-dessous présente la détermination graphique de l'EOI financière (à gauche) et environnementale CED_{NRE} (à droite) dans le cas d'une isolation compacte périphérique avec du polystyrène expansé (EPS) et un système de chauffage par PAC AE.

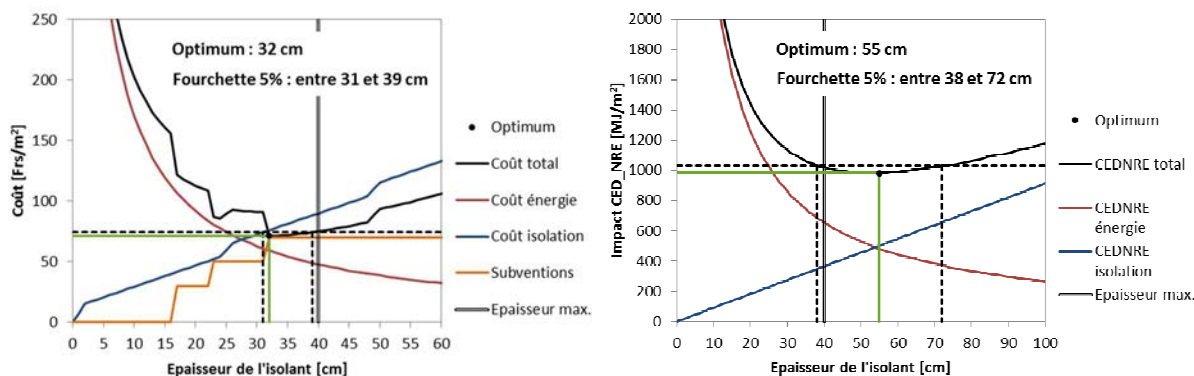


Figure 6: Représentation graphique de l'EOI financière (à gauche) et l'EOI environnementale CED_{NRE} (à droite) pour une toiture inclinée isolée avec de la laine de pierre (système de chauffage: PAC AE)

Les courbes bleues montrent l'augmentation du coût (resp. impact) liée à l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation. Les courbes rouges montrent la décroissance du coût (resp. impact) liée à la diminution des besoins de chauffage au fur et à mesure que l'épaisseur d'isolation augmente. Les courbes noires correspondent au coût total (coût de l'énergie + coût de l'isolation) et permettent de définir les EOI qui se situent au minima de ces résultantes (points noirs). L'épaisseur et le coût (resp. impact) correspondant se définissent en suivant les droites vertes. Une fourchette équivalente à un écart de coût (resp. impact) de 5% par rapport à l'optimum est également représentée (traits-tillés noirs). Cette fourchette reste arbitraire mais permet de montrer la sensibilité de l'EOI à un éventuel surcoût.

Pour l'indicateur financier, les subventions sont prises en compte en fonction de la valeur U obtenue pour l'élément (courbe orange). Dans cet exemple, trois sauts se distinguent et correspondent chacun à trois niveaux de subventions différents (SIA, Minergie et Minergie-P). Les résultats de ces graphiques montrent que la pente de la courbe bleue représentant l'impact de l'isolation est beaucoup plus faible pour l'indicateur environnemental (p.ex. CED_{NRE}) que financier, entraînant une épaisseur plus importante (55 [cm]) pour l'EOI environnementale que pour l'EOI financière (34 [cm]).

2.3.2 Couples isolant/système de chauffage optimaux

Cette étude a également permis de déterminer pour chaque élément de construction, les couples *isolant/système de chauffage* optimaux, qui dépendent des EOI de chaque isolant. Ce couple optimal correspond à un système de chauffage et un isolant qui permettent de minimiser les coûts ou un des impacts environnementaux.

Deux types de résultats sont présentés dans le rapport. Ils renvoient à deux solutions de rénovation différentes :

- 1) le système de chauffage n'est pas remplacé (et ce n'est pas une variable de l'étude). Dans ce cas, il n'y a qu'un degré de liberté et seul le type d'isolant est à déterminer ;
- 2) le système de chauffage et l'isolation peuvent être remplacés et dans ce cas on a deux degrés de liberté pour trouver le couple optimal *isolant/système de chauffage*.

Dans le premier cas, il est important, de sélectionner l'isolant qui permet d'avoir un coût ou un impact environnemental optimal à l'EOI. La solution optimale peut varier en fonction de l'indicateur analysé (coûts, CED_{NRE}, GWP etc.). Comme chaque cas peut être différent, le lecteur intéressé peut consulter les fiches de synthèse en annexe du rapport WP2. Pour chaque élément de construction, les fiches présentent les résultats des couples *isolant/système de chauffage* avec et sans subventions.

Dans le deuxième cas, si le système de chauffage doit être remplacé au même titre que l'isolation, il est important de comparer les couples *isolant/système de chauffage* pour ne retenir que les variantes minimisant aux EOI les coûts ou les impacts. Les résultats du chapitre 8 du rapport WP2 présentent ces résultats comparatifs pour chaque élément et indicateur en considérant que la distribution de chaleur est déjà en place (i.e., elle n'induit aucun coût ou impact supplémentaire).

2.3.3 Influence des paramètres de calcul sur les EOI

Les résultats obtenus dépendent des valeurs utilisées pour calculer les coûts ou les impacts environnementaux considérés pour les isolants et les systèmes de chauffage. Afin d'analyser la sensibilité des résultats cette étude a analysé l'influence de la variabilité des paramètres d'entrée comme le climat, les durées de vie, les doubléments d'épaisseurs, les coûts des matériaux ou de l'énergie sur les valeurs des EOI et des couples optimaux (cf. chapitre 9.1 du rapport WP2 (partie C)). Le tableau suivant présente une synthèse de l'évolution des EOI en fonction de six paramètres.

| Paramètre | Evolution du paramètre | Evolution de l'EOI financière | Evolution de l'EOI environnementale |
|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Climat | plus le climat est froid... | ...plus l'EOI ↗ | ...plus l'EOI ↗ |
| Durée de vie | ↗ | ↗ | ↗ |
| Conductibilité thermique de l'isolant | ↗ | ↗ | ↗ |
| Coût ou impacts de l'énergie | ↗ | ↗ | ↗ |
| Coût ou impacts de l'isolant | ↗ | ↘ | ↘ |
| Apports solaires | ↗ | ↗ | ↗ |

Tableau 2: Evolution de l'épaisseur optimale d'isolation selon différents paramètres

Ce tableau montre que, par exemple, plus les apports solaires augmentent, plus les EOI augmentent. De même, plus le coût (ou les impacts) du système de chauffage augmente, plus l'EOI augmente ainsi que la valeur du coût optimal (à l'EOI). Inversement, plus le coût ou l'impact de l'isolant augmente, plus l'EOI et le coût (ou l'impact) optimal diminue.

Les résultats des études de sensibilité, et du WP2 en général, sont valables pour des fenêtres positionnées à une dizaine de centimètre de l'extérieur, ce qui correspond à une position de fenêtres et des épaisseurs d'isolation courantes. Le choix de placer les fenêtres autant que possible du côté extérieur permet de tenir compte au mieux des gains solaires. Mais quelle que soit la position de la fenêtre, les couples *isolant/système de chauffage* optimaux ne sont eux pas modifiés. Seules les valeurs des EOI sont modifiées. Les résultats obtenus dans ce WP restent donc valables pour des bâtiments ayant des caractéristiques similaires aux bâtiments courant étudiés ici. Pour d'autres configurations, les résultats seraient différents.

Si maintenant, un paramètre évolue différemment pour chaque isolant ou système de chauffage, il peut provoquer une modification du couple optimal et des conclusions de l'étude. Une analyse de la robustesse des résultats a donc été menée pour vérifier si la variation de paramètres tels que les performances de la PAC (valeur du COP), les valeurs d'impacts (version de la KBOB utilisée) ou des coûts des systèmes de chauffage (prise en compte ou non de la distribution de chaleur selon le type de chauffage du bâtiment existant) pouvaient modifier les conclusions de l'étude. Le chapitre 9.2 présente l'intégralité des résultats. A titre d'illustration, cette étude a montré que, selon la valeur du COP, le couple optimal pouvait être modifié pour l'indicateur GWP (passant de *laine de pierre*/PAC AE à *laine de pierre/pellets*). Ce dernier point rappelle que l'ensemble des résultats de la méthode "EOI" comportent une marge d'incertitude liée à la variabilité des coûts et des impacts. Les couples *isolant/système de chauffage* éloignés de moins de 10% du couple optimal peuvent alors être considérés comme équivalents au couple optimal (cf. rapport WP2, ch. 3.8, tableau 18 en annexe 2).

2.3.4 Comparaison de la méthode EOI par rapport aux calculs selon les normes et labels en vigueur

La figure 7 présente une mise en relation, pour un des quatre éléments de construction (toiture inclinée) et un des cinq systèmes de chauffage (PAC AE), des EOI calculées dans cette étude avec les valeurs d'épaisseurs d'isolant permettant de répondre aux normes en vigueur (SIA 380/1) ou permettant d'atteindre les objectifs ponctuels fixés par le standard Minergie-P®.

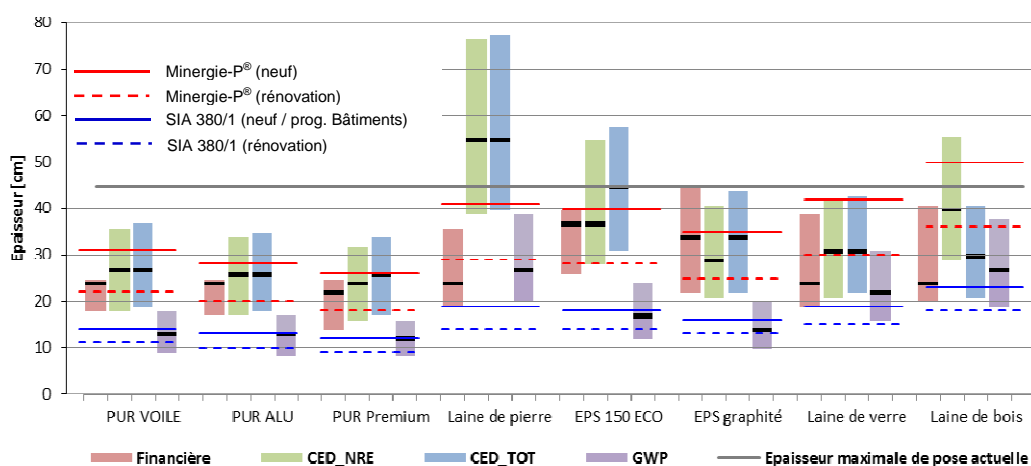


Figure 7: EOI financières (avec subventions) et environnementales CED_{TOT}, CED_{NRE}, GWP comparées aux épaisseurs selon les exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour chaque isolant de la toiture inclinée avec un système de chauffage par PAC AE

Sur ce mode de représentation, les épaisseurs calculées selon les normes sont représentées en bleu (trait continu pour une construction neuve et discontinu pour une rénovation) et celles calculées selon Minergie-P® en rouge (trait continu pour les exigences en construction neuve et discontinu pour les exigences en rénovation). Par ailleurs, le trait noir épais correspond à l'EOI et les zones colorées, au-dessus et en dessous, à la fourchette équivalente à un écart de 5% par rapport à l'optimum. Les fourchettes roses correspondent aux fourchettes financières, les vertes à l'indicateur environnemental

CED_{NRE}, les bleues aux CED_{TOT} et les violettes au GWP. Enfin, le trait continu gris correspond à l'épaisseur maximale de pose actuellement en vigueur, valeur fournie par le partenaire industriel.

Dans la figure 7, la PAC AE ayant un impact GWP faible, il est logique de trouver des EOI pour le GWP plus faibles que les EOI financières. En effet, les EOI sont directement corrélées aux impacts des systèmes de chauffage (cf. tableau 1). Par ailleurs, nous retrouvons pour des isolants ayant des densités très similaires (laines minérales), le lien entre l'impact de l'isolant et son EOI : plus il est faible, plus son EOI augmente. Ainsi, l'EOI CED_{NRE} de la laine de pierre est plus élevée que celle de la laine de verre car son impact est plus de trois fois plus faible (16.9 contre 49.7 [MJ/m².an]), ceci pour des masses volumiques quasi équivalentes (60/65 [kg/m³]).

En comparant les EOI (financières et environnementales) avec les épaisseurs calculées par les normes et les labels, les résultats montrent qu'une très grande majorité des EOI se situe au-delà des épaisseurs d'isolation respectant les exigences de la norme SIA 380/1 (neuf ou rénovation). Dans certains cas, les épaisseurs selon Minergie-P® neuf permettent de se rapprocher le plus des EOI environnementales.

Les EOI pour le GWP se trouvent très proches des épaisseurs selon les normes SIA 380/1 (neuf ou rénovation) pour la PAC AE tandis que les EOI financières se situent généralement à proximité des épaisseurs selon Minergie-P® neuf et rénovation. Il est important de rappeler que la **valeur de l'EOI ne peut être utilisée pour déterminer le couple optimal** ; seule une recherche du coût ou de l'impact à l'EOI de chaque isolant permet de déterminer le couple optimal (cf. chapitres 8 et 9.3 dans le rapport WP2). A titre d'illustration, la figure 8 présente une représentation graphique de ces coûts et impacts (CED_{NRE}) aux EOI pour une toiture inclinée et une PAC AE. Ainsi l'isolant optimal pour ce cas est celui ayant le coût ou l'impact minimal.

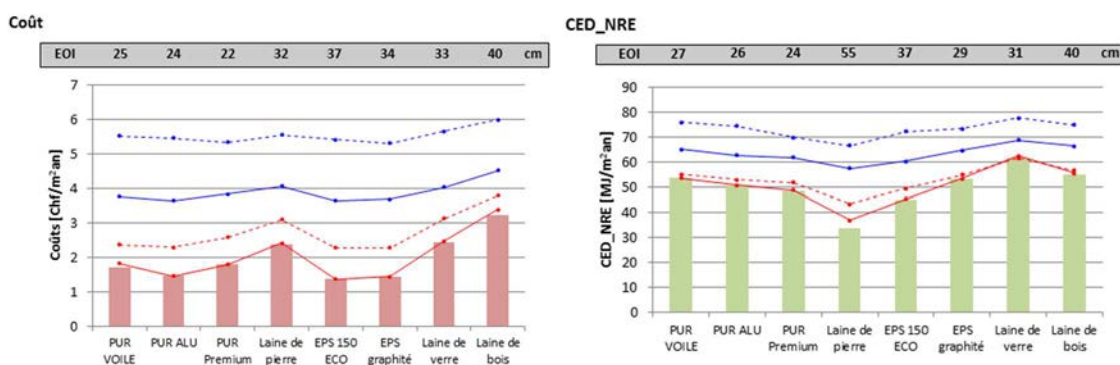


Figure 8: Coûts avec subventions (à gauche) et impact CED_{NRE} (à droite) aux EOI avec les exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour chaque isolant de la toiture inclinée et un système de chauffage par PAC AE

Dans cet exemple (toiture inclinée), le couple *laine de pierre*/PAC AE, malgré une EOI pour l'indicateur CED_{NRE} très élevée, reste celui qui entraîne la plus faible consommation d'énergie primaire non-renouvelable. Une analyse identique sur les coûts montre que le couple optimal est l'*EPS*/PAC AE (sans distinguer l'EPS entre les références 150 ECO ou graphité étant donné l'écart excessivement faible). Ce résultat démontre aussi que le couple optimal peut varier. Il est donc important dans ce type d'analyse de préciser l'indicateur retenu en priorité pour choisir le couple optimal.

Ces graphiques montrent également que le coût et l'impact pour des épaisseurs d'isolation répondant à la norme SIA 380/1 ou au label Minergie-P® (neuf ou rénovation) sont systématiquement supérieurs aux épaisseurs obtenues pour les couples optimaux quel que soit l'indicateur utilisé (financier ou environnemental). Ainsi, il est important de relever que le respect des normes minimales SIA en vigueur sur les valeurs U ponctuelles pour la rénovation (ou le programme Bâtiments) entraîne à la fois des surcoûts financiers de l'ordre de 2 à 4 [CHF/m².an] (lorsque les subventions sont prises en compte) et des impacts environnementaux majorés de 20 à 50 % par rapport à la méthode "EOI". La prise en compte des subventions renforcent l'écart entre un calcul selon les limites SIA et un calcul selon la méthode "EOI", les valeurs U selon SIA rénovation ne donnant pas droit aux subventions contrairement au respect du label Minergie-P®.

Ce cas d'application (toiture inclinée) montre également que les coûts et impacts obtenus en appliquant les recommandations du label Minergie-P® sont très proches des valeurs optimales obtenues avec la

méthode des EOI, ceci pour la plupart des isolants. Cependant, ce résultat n'est pas systématiquement transposable aux autres éléments de construction. L'étude des façades montre, par exemple, des tendances inverses (coûts optimaux proche de ceux des normes et éloignés des labels) en raison des coûts de pose des isolants plus élevés dans ce dernier cas. Ils sont représentatifs de la majorité des isolants et systèmes de chauffage sans être valides pour l'intégralité des situations. Le lecteur intéressé par les résultats complets, tenant compte des cas particuliers, est invité à consulter les fiches de synthèse en annexe du rapport WP2.

2.4 Conclusions et perspectives

Ce travail a permis de définir une méthodologie permettant de calculer des épaisseurs optimales d'isolation pour différents systèmes de chauffage utilisés dans la rénovation de bâtiments. Des couples "*isolant/système de chauffage*" aux EOI correspondants ont pu être déterminés par éléments de construction. Les résultats ont montré que ces couples diffèrent selon l'indicateur évalué et des analyses de sensibilité ont montré que de nombreux paramètres influencent les EOI, à commencer par le climat, les coûts des vecteurs énergétiques, et les valeurs d'impact des bases de données (KBOB).

Ainsi, l'intégration des subventions a permis de tenir compte du contexte spécifique des rénovations de bâtiments. Ces subventions réduisent le coût total et compensent parfois le coût de l'isolant. Elles contribuent à rapprocher l'EOI financière de l'EOI environnementale dans certains cas.

Une comparaison des résultats obtenus dans le présent rapport avec des calculs d'épaisseurs d'isolants selon les normes et les labels actuels a montré la pertinence de cette approche pour déterminer des solutions à moindre coût et à moindre impact. Même s'il n'est pas possible de généraliser les résultats, la plupart des résultats de cette étude montrent tout de même que les limites SIA conduisent à des surcoûts sur 30 [ans], tandis le label Minergie-P® semble, en revanche, très proche de la plupart des solutions optimales obtenues avec la méthode des EOI (en terme de coûts et d'impacts). Cependant, la méthode "EOI" reste plus réactive à une variation des coûts ou des impacts que le label Minergie-P®. Ainsi, des résultats différents sont obtenus pour la façade compacte. Les EOI sont proches des épaisseurs selon les normes et éloignées des épaisseurs selon Minergie-P®, le coût de pose des isolants étant plus élevé pour cet élément. Ce dernier point rappelle le besoin de tenir à jour des paramètres de calcul tant financiers qu'environnementaux. Par conséquent, si ce type de calcul doit s'insérer dans les pratiques opérationnelles (p. ex. bureaux d'ingénieurs), il pourrait être utile de réfléchir au développement d'un outil permettant de paramétrer les calculs en fonction du contexte local (orientation et type de bâtiment, surfaces de vitrages et position des fenêtres), de l'évolution des coûts (main d'œuvre, matériaux) et des impacts environnementaux. Cette approche pourrait également s'insérer dans les logiciels de simulation thermique existants afin d'éviter de créer un nouvel outil. Dans les deux cas, un enrichissement et une mise à jour régulière des bases de données de coûts et d'impacts sur les matériaux et les systèmes de chauffage constituera un point clé afin de fournir des résultats les plus fiables et les plus représentatifs du contexte particulier de la construction neuve ou de la rénovation. Le rapport complet du WP2 "Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations", est disponible dans la partie C du présent document.

L'essentiel du WP2

- Le couple *isolant/système de chauffage* ayant l'EOI le plus faible ne représente pas forcément le couple optimal. Si une comparaison est effectuée, il faut rechercher le couple ayant les coûts ou impacts minimaux aux EOI ;
- Pour un climat correspondant au plateau Suisse et avec les coûts et subventions actuels, dans une majorité des cas, les résultats ont montré que les normes conduisent à des surcoûts sur 30 [ans] tandis que le label Minergie-P® semble plutôt proche de la plupart des solutions optimales obtenues avec la méthode "EOI" (tant financière qu'environnementale). Cependant, il existe des cas particuliers par élément, isolant et système de chauffage.
- Les résultats de ce projet peuvent aussi être utilisés pour l'aide à la décision dans le cadre de nouvelles constructions en prenant soin de ne pas intégrer les subventions propres à la rénovation.
- Un calcul par la méthode "EOI" nécessite d'adapter et de mettre à jour les calculs au contexte local (climat, coûts des matériaux et de l'énergie) et de tenir compte des contraintes de mises en œuvre (doublements d'épaisseur) ou propres à la rénovation (subventions fédérales et cantonales)

3 Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique (WP3 – Parties D, E & F)

3.1 Cadre de l'étude, problématique et objectifs

Dans les années 70, le chauffage électrique était considéré comme un chauffage économique, les fournisseurs d'électricité en prônaient l'utilisation et l'installation était subventionnée par certains cantons. A cette époque, l'utilisation de ce type de système de chauffage nécessitait la pose d'une épaisseur d'isolation supérieure à celle des autres bâtiments neufs. Actuellement, ce système est utilisé par environ 10% des bâtiments en Suisse¹. Suite à l'accident nucléaire de Fukushima (Japon) en 2011, de nombreux pays (dont la Suisse) ont décidé d'abandonner progressivement l'utilisation de l'énergie électrique issue du nucléaire. Ainsi, le système énergétique suisse doit faire une mue importante d'ici 2050, ceci afin d'assurer la sécurité de l'approvisionnement énergétique. Pour y arriver, la "Stratégie énergétique 2050", développée par le Conseil Fédéral, propose notamment de pallier à l'abandon de cette ressource par des économies accrues en améliorant l'efficacité énergétique des bâtiments et par le développement de la force hydraulique et des énergies renouvelables. Dans le cadre des économies d'énergie, l'une des mesures concerne le remplacement des chauffages électriques. Cette décision a été parfois discutée dans certains cantons (p.ex. Vaud et Fribourg) dans le cadre des révisions des lois cantonales sur l'énergie. Le contexte législatif augmente ainsi la pression exercée sur les propriétaires de bâtiments utilisant l'électricité directe comme vecteur énergétique pour la production de chaleur pour le chauffage et/ou pour la préparation de l'eau chaude sanitaire (ECS).

La substitution du chauffage électrique par un système utilisant un autre vecteur énergétique nécessite des investissements conséquents, en particulier pour la mise en place d'une nouvelle distribution hydraulique dans le bâtiment. Dès lors, plusieurs solutions peuvent être envisagées et il est important de mettre en relation les aspects environnementaux aux aspects financiers de chaque option pour définir quelle solution est la meilleure. Quatre options principales peuvent être recensées :

- a) Remplacement du chauffage électrique par d'autres systèmes sans toucher à l'enveloppe
- b) Amélioration de l'enveloppe thermique du bâtiment
- c) Amélioration de l'enveloppe du bâtiment et remplacement du système de chauffage.
- d) Couplage du système de chauffage électrique existant à une installation photovoltaïque pour compenser la consommation annuelle d'électricité en provenance du réseau et ainsi réduire les impacts environnementaux.

Le WP3 tente de répondre à ces différents enjeux. Il est structuré en trois parties. La première partie concerne l'identification des systèmes existants de chauffage électrique direct ainsi que les solutions de substitution présentées sous la forme de fiches. Les deux autres parties ont pour objectif de comparer des scénarios de rénovation de l'enveloppe et du chauffage électrique pour les indicateurs de coûts et d'impacts environnementaux sur des bâtiments réels au travers de deux études de cas. La première concerne un habitat individuel (cf. rapport WP3.3.a dans la partie E du rapport) et la seconde un habitat collectif (cf. rapport WP3.3.b dans la partie F). Cette note de synthèse présente uniquement les points importants du WP 3.3 (comparaison de scénarios de rénovations sur deux études de cas), le lecteur intéressé par la première partie est invité à consulter les rapports WP 3.1 et 3.2 concaténés dans la partie D du présent document.

3.2 Méthodologie

3.2.1 Détermination du scénario optimal

La méthodologie utilisée pour les deux études de cas est similaire. Tout d'abord, une évaluation de chaque bâtiment existant constitue le scénario de référence. Puis, une analyse du potentiel de réduction du besoin de chaleur est effectuée selon les options de rénovation définies plus haut.

¹ Source: Recensement fédéral de la population 2000 et statistiques des bâtiments et des logements, OFS, disponible en ligne : www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/09/02/blank/key/gebaeude/heizung.html

Chaque axe de rénovation peut comporter plusieurs variantes (p. ex. sur le choix des systèmes de chauffage alternatifs au chauffage électrique). Les solutions de remplacement des systèmes de production de chaleur ont été définies en collaboration avec le propriétaire des bâtiments et sur la base de considérations de faisabilités techniques offertes par le bâtiment (localisation, orientation, etc.). Puis, pour chaque bâtiment, un optimum de rénovation est déterminé sur la base de considérations énergétiques, environnementales et économiques. La figure 9 présente la représentation graphique permettant de comparer les scénarios de rénovation entre eux selon les indicateurs de coûts et d'impact environnemental (CED_{NRE} , CED_{TOT} , ou GWP).

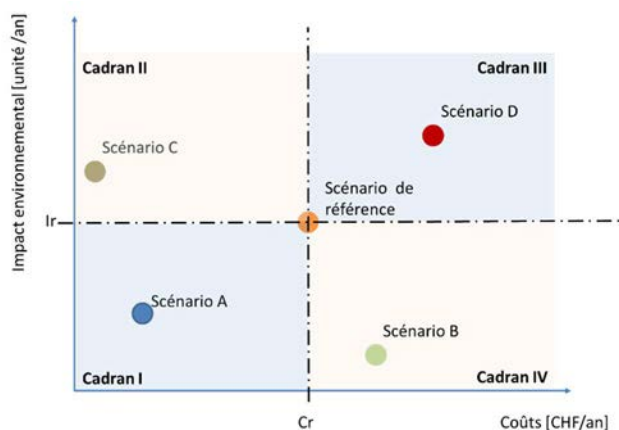


Figure 9: Principe de détermination du scénario optimal mettant en relation un des indicateurs d'impacts environnementaux aux coûts

Les cadrans représentent des situations bien précises par rapport au scénario de référence (bâtiment non-rénové), qui est situé au centre de la figure (point orange) :

- cadran I : situation où les impacts environnementaux et économiques sont plus faibles que ceux de la référence ;
- cadran II : situation dans laquelle l'impact environnemental est plus élevé que pour celui du scénario de référence, mais avec des coûts moins importants ;
- cadran III : situation où les impacts environnementaux et les coûts sont plus élevés que ceux du scénario de référence ;
- cadran IV : situation où l'impact environnemental est moindre que celui de la référence mais où les coûts sont plus élevés.

La méthodologie choisie pour l'évaluation des impacts environnementaux correspond à celle développée dans le cadre de l'annexe AIE tâche 56 (cf. WP 4). Elle est similaire aux règles de calcul du label Minergie-ECO® et du CT SIA 2032 [9] mais ne tient compte que des matériaux et installations techniques liés aux mesures de rénovation énergétique du bâtiment.

Les indicateurs de consommation d'énergie primaire non-renouvelable (CED_{NRE}) et de potentiel de réchauffement climatique (GWP) sont utilisés. L'analyse des coûts se base sur la norme SIA 480 [8]. Les subventions fédérales et cantonales susceptibles d'être revendiquées pour les différentes rénovations sont prises en compte. La durée de vie du bâtiment considérée est de 60 ans (annexe AIE tâche 56) et les remplacements des éléments de construction et des installations techniques sont prises en compte selon les valeurs du CT SIA 2032.

Dans les deux études de cas, les rendements des installations techniques sont tirés du cahier technique CT SIA 2040 [2] à l'exception du coefficient de performance (COP) de la PAC de l'habitat individuel qui a été déterminé séparément.

Pour les résultats de coûts, une marge d'incertitude de $\pm 20\%$ est considérée pour tenir compte des variabilités liées aux choix des coûts d'investissements.

3.2.2 Application sur des études de cas

Deux bâtiments existants sont étudiés. Le premier est une villa individuelle alors que le second est un bâtiment d'habitation collectif. Ce choix permet d'intégrer deux modèles d'habitation différents (propriété, location) et d'améliorer la représentativité de l'étude.

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Etude cas n°1: Habitat collectif</p> <ul style="list-style-type: none"> • Savigny (Vaud) • Année de construction: 1981 • A_E : 1'358 [m²] • Chauffage : radiateurs électriques directs (convecteurs classiques) avec thermostat • Objectif de rénovation (enveloppe) : SIA 380/1 : 2009  <p>Caractéristiques du bâtiment</p> <ul style="list-style-type: none"> • Locatif • Degré de vétusté de l'enveloppe thermique: élevé <p>Axes de rénovation étudiés</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment (axe b) • Rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment et substitution du système de chauffage et de production d'ECS (axe c) • Rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment (axe d) et couplage du chauffage électrique avec des panneaux PV | <p>Etude cas n°2: Habitat individuel</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les Sciernes d'Albeuve (Fribourg) • Année de construction : 1980 • A_E : 177.5 [m²] • Chauffage : radiateurs électriques directs (convecteurs classiques) avec thermostat • Objectif de rénovation (enveloppe) : SIA 380/1 : 2009  <p>Caractéristiques du bâtiment</p> <ul style="list-style-type: none"> • Habité par le propriétaire • Degré de vétusté de l'enveloppe thermique : peu élevé <p>Axes de rénovation étudiés</p> <ul style="list-style-type: none"> • Substitution du système de chauffage et de production d'ECS (axe a) • Rénovation de l'enveloppe thermique (axe b) • Rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment et substitution du système de chauffage et de production d'ECS (axe c) • Rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment (axe d) et couplage du chauffage électrique avec des panneaux PV |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Dans ce document de synthèse, seuls les scénarios correspondant à la rénovation simultanée de l'enveloppe du bâtiment et du remplacement du système de chauffage par électricité directe (axe "c") sont présentés. L'analyse détaillée des axes "a" et "b" est consultable dans les rapports de chaque étude de cas [11] et [12] (cf. parties E et F).

3.2.2.1 Données de base pour les scénarios complets de rénovation

Dans le cas de l'habitat collectif (degré élevé de vétusté de l'enveloppe thermique), la rénovation de l'enveloppe est impérative. Dans un premier temps, plusieurs scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique (axe "b") ont été être étudiés. L'axe "b" comporte un scénario de rénovation par élément de construction (toiture, plancher, fenêtre) et trois scénarios pour les façades (comparaison de façades compacte, ventilée avec plusieurs types d'isolants). Sur la base de considérations liées aux coûts, aux impacts environnementaux et aux contraintes techniques (mise en œuvre, entretien, réparation), la façade ventilée isolée avec de la laine de verre a été retenue. Ce scénario de rénovation de l'enveloppe de l'habitat collectif permet ainsi de répondre à la limite SIA 380/1 pour la rénovation. Ces choix de rénovation de l'enveloppe serviront de données de base pour la comparaison de scénarios de rénovation selon l'axe "c" (cf. partie 3.3 Principaux résultats).

Dans le cas de l'habitat individuel (degré peu élevé de vétusté de l'enveloppe thermique), une substitution du système de chauffage (axe "a") sans rénovation de l'enveloppe (axe "b") a initialement été étudiée. Sept scénarios de substitution ont été comparés. Il ressort de cette étude préliminaire que la substitution du chauffage électrique par une PAC AE est la meilleure variante pour minimiser les coûts et les impacts environnementaux par rapport aux autres possibilités (mazout, pellets etc.). Ce système permet d'éviter la création d'un local technique supplémentaire, la modification du local technique ou la mise en œuvre d'une citerne enterrée. Au niveau de la rénovation de l'enveloppe thermique (axe "b"), la façade compacte (au rez-de-chaussée) est rénovée en ajoutant une couche d'isolation en EPS et un crépi sur la façade existante, la façade ventilée en bois (au 1^{er} étage) est complétée d'une couche d'isolant en EPS sur les lattes de bois existantes tandis qu'une nouvelle isolation en PUR est ajoutée à la toiture. Ces choix de rénovation de l'enveloppe de l'habitat individuel visent l'exigence SIA 380/1 pour la rénovation. Suite à cette étape intermédiaire, l'axe "c" intègre de nouvelles variantes de rénovation de l'enveloppe avec le système de chauffage électrique par PAC AE : remplacement des vitrages existants par du double ou du triple vitrage performant, et rénovation du radier.

Chaque étude de cas comporte un scénario selon l'axe "d" avec rénovation de l'enveloppe, maintien du chauffage électrique et couplage avec des panneaux solaires. Les taux de couverture solaire sont pour l'habitat collectif de 73.5% (panneaux PV pour le chauffage) et 60% (solaire thermique pour l'ECS) et de 28% (panneaux PV) et 60% (solaire thermique pour l'ECS) pour l'habitat individuel.

3.3 Principaux résultats

3.3.1 Habitat collectif

La figure 10 présente les résultats des scénarios de rénovation selon les indicateurs de coûts, du GWP et du CED_{NRE} exprimés par [m²_{SRE}·an]. Ils correspondent aux axes de rénovation définis dans la méthodologie: rénovation de l'enveloppe (axe "b"), rénovation de l'enveloppe et du chauffage électrique (axe "c"), et rénovation de l'enveloppe et couplage du chauffage électrique existant avec des panneaux PV (axe "d"). En accord avec le propriétaire, qui désirait effectuer la rénovation de l'enveloppe, aucun scénario avec l'enveloppe actuelle et un changement de système de chauffage n'a été considéré.

Les résultats de la figure 10 pour l'indicateur financier montrent que l'ensemble des scénarios présentent des coûts annualisés totaux supérieurs au bâtiment dans son état actuel en dépit de coûts liés à l'énergie de chauffage plus faibles. La solution de rénovation de l'enveloppe avec conservation du chauffage électrique (variante ÉI.) entraîne le surcoût le plus faible (de l'ordre de +7%) par rapport à la situation de référence. En couplant le chauffage électrique existant à des panneaux solaires (variante ÉI.+S) le surcoût atteint 19%. Si l'enveloppe et le système de chauffage sont rénovés, la variante PAC AE entraîne un surcoût de seulement 7% contre 19% pour une solution avec PAC à gaz, les autres scénarios de l'axe "c" substituant l'électricité par les vecteurs énergétique gaz, mazout et pellets présentent les coûts annualisés les plus élevés (entre 25% et 39% de plus que la référence). Ces différents résultats s'expliquent par des coûts d'investissement élevés notamment pour l'enveloppe thermique (en rouge sur la figure 10). En tenant compte d'une marge d'incertitude de $\pm 20\%$ liée à la variabilité des données de coûts d'investissement et d'entretien, il n'est toutefois pas possible d'affirmer avec certitude que le bâtiment dans son état actuel coûtera moins cher sur la durée d'analyse considérée (60 [ans]). Ainsi les résultats des meilleurs scénarios (ÉI., ÉI.+S., et PAC AE) peuvent être similaires à celui du bâtiment dans son état actuel (scénario de référence).

L'analyse des impacts environnementaux basée sur les indicateurs GWP et CED_{NRE} présente des tendances différentes. Tous les scénarios permettent de réduire les impacts. Cependant, le vecteur énergétique utilisé pour la substitution du chauffage électrique influe sensiblement sur les résultats. La rénovation de l'enveloppe tout en conservant le chauffage électrique permet de réduire d'un facteur 2 les impacts GWP et CED_{NRE}. La solution GWP optimale consiste à rénover l'enveloppe tout en substituant le chauffage électrique par une PAC AE ou un chauffage à pellets (réduction des impacts d'un facteur 4 pour le GWP pour ces deux scénarios) tandis que la solution CED_{NRE} optimale consiste à opter pour un chauffage à pellets uniquement (réduction des impacts d'un facteur 11). Les solutions

fossiles (gaz et mazout) permettent de réduire fortement les impacts CED_{NRE} mais restent les moins favorables sur les émissions de gaz à effet de serre (réduction de seulement 25% par rapport au bâtiment actuel). Enfin, la solution de maintien du chauffage électrique couplé à des panneaux solaires est proche de la solution optimale pour le GWP et proche des solutions avec chauffage par PAC pour l'indicateur CED_{NRE} .

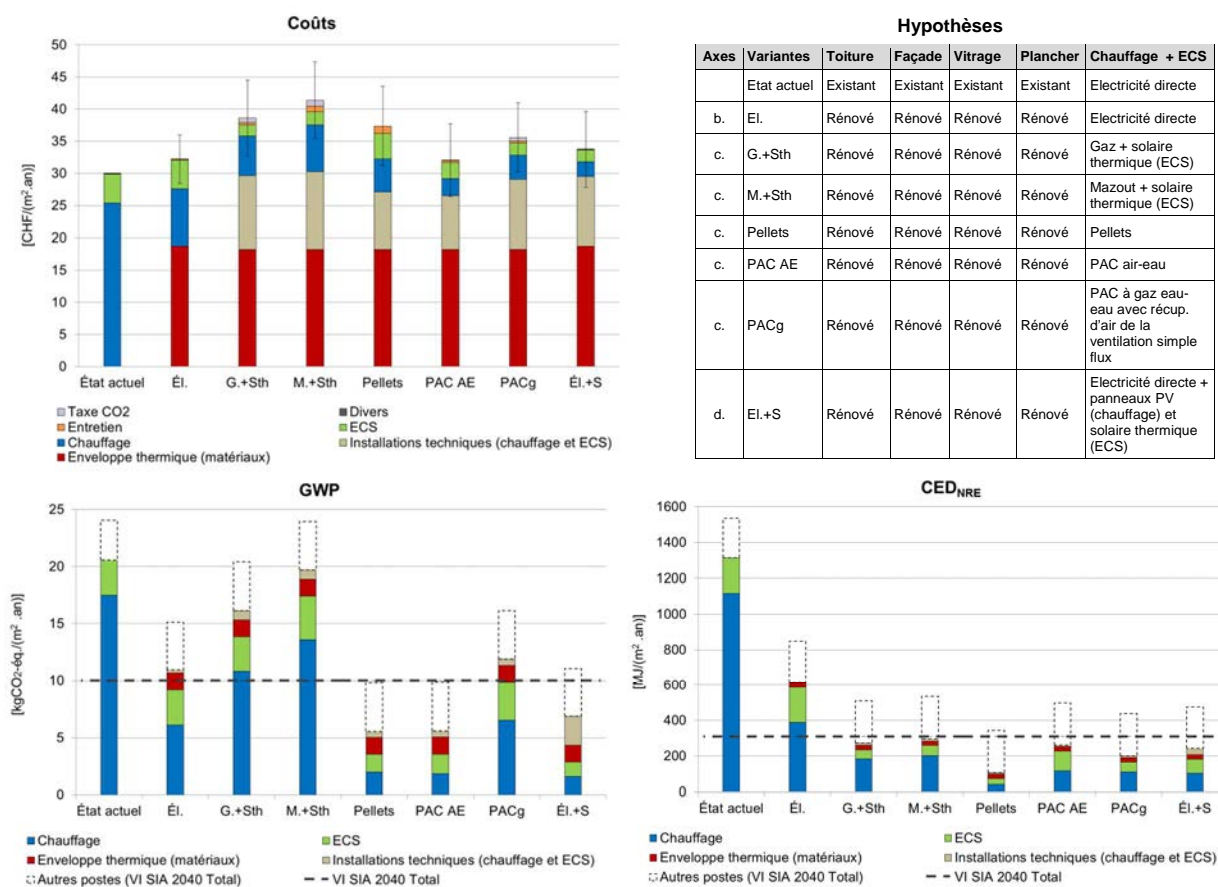


Figure 10: Coûts et impacts GWP et CED_{NRE} des scénarios de rénovation pour le bâtiment collectif

Par rapport aux objectifs de la société à 2'000 Watts - représentés sur la figure 10 par un trait pointillé noir correspondant à la valeur indicative (VI) totale ("Construction" + "Exploitation") pour le GWP et CED_{NRE} selon le CT SIA 2040 [2] -, les résultats montrent que seuls trois scénarios de rénovation se situent au-dessous de cette limite, ceci pour les deux indicateurs. Il s'agit des scénarios couplant rénovation de l'enveloppe thermique et substitution du chauffage électrique direct par une PAC air-eau ou une chaudière à pellets et du scénario qui conserve le chauffage électrique direct associé à des installations solaires (photovoltaïque et thermique). A l'inverse, la rénovation de l'enveloppe couplée à la substitution de l'électricité par un vecteur énergétique fossile (gaz naturel ou mazout) n'est pas suffisante pour l'indicateur GWP. Il est également intéressant de relever que la rénovation de l'enveloppe en conservant le chauffage électrique ne permet pas d'atteindre la valeur indicative totale quel que soit l'indicateur observé. Toutefois, en tenant compte des autres postes couverts par les VI du cahier technique SIA 2040 (consommation d'électricité pour l'éclairage, les équipements d'exploitations, la ventilation, les auxiliaires et les installations sanitaires et électriques) déterminés à partir des valeurs unitaires par mètre carré fourni dans le CT SIA 2040, l'ensemble des scénarios de rénovation sont péjorés. Aucun ne permet de répondre à la valeur indicative pour le CED_{NRE} et seules les variantes avec chauffage par PAC AE et pellets y répondent pour le GWP. Finalement, aucune solution optimale unique ne se distingue clairement lorsque les trois indicateurs (coûts, GWP et CED_{NRE}) sont considérés.

3.3.2 Habitat individuel

La figure 11 présente les résultats des scénarios de rénovation de l'habitat individuel pour les indicateurs coûts, GWP et CED_{NRE} exprimés en unité d'indicateur par [m²_{SRE}·an]. Ils correspondent aux trois axes de rénovation définis dans la méthodologie: rénovation du système de chauffage (axe "a"), rénovation de l'enveloppe et du chauffage électrique (axe "c"), et rénovation de l'enveloppe et couplage du chauffage électrique existant avec des panneaux PV (axe "d"). Pour l'axe "a", seul le scénario optimal tiré du rapport WP 3.3.a (cf. partie E) est reporté sur la figure 11. Ce système de chauffage optimal (PAC AE) est ensuite associé à chacun des scénarios de rénovation globale de l'axe "c".

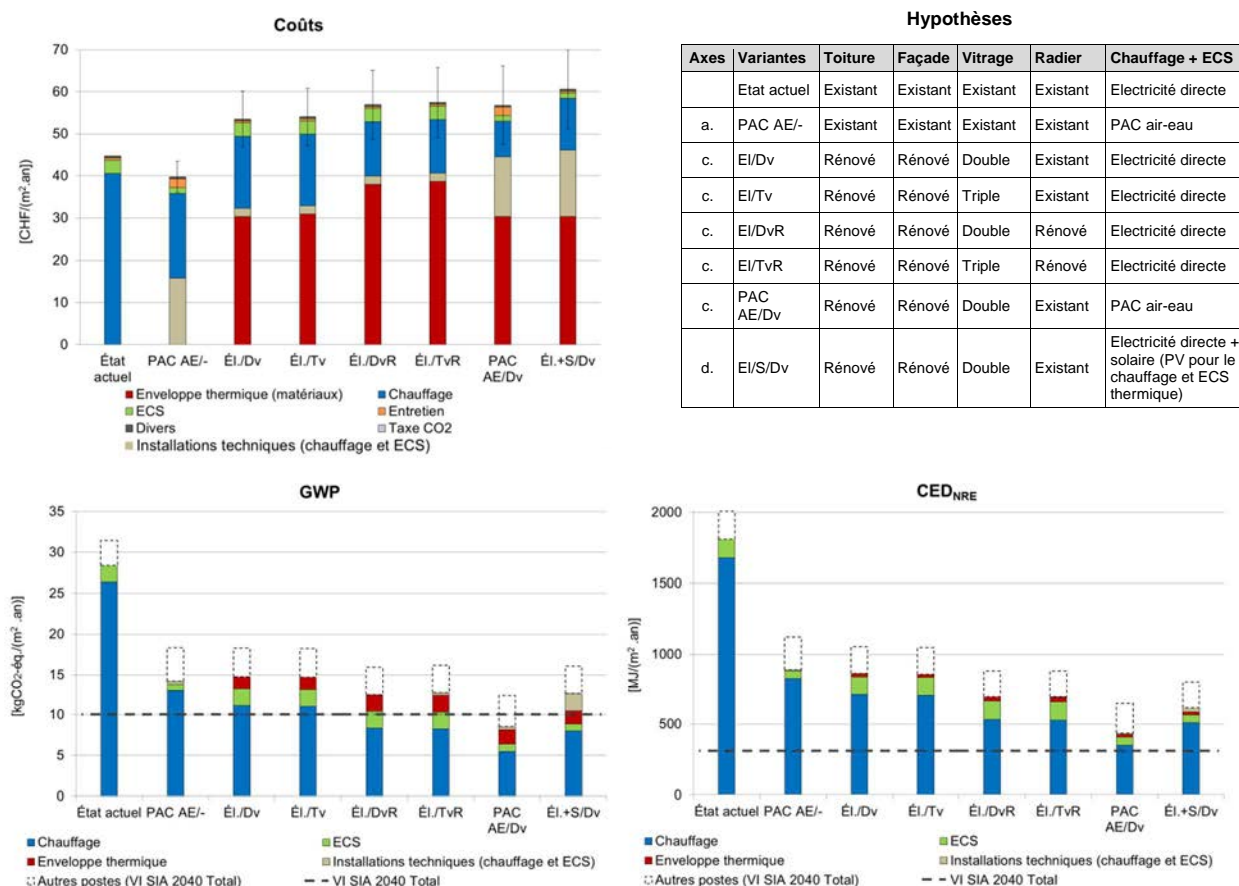


Figure 11: Coûts et impacts CED_{NRE} et GWP des scénarios de rénovation pour le bâtiment individuel

Concernant les aspects financiers, les résultats de la figure 11 montrent que la substitution du système de chauffage électrique directe par une PAC AE, sans rénovation de l'enveloppe thermique, présente un coût annualisé plus faible que tous les autres scénarios. Le coût de ce scénario optimal reste plus ou moins équivalent à celui de la rénovation de l'enveloppe thermique complète (cf. partie en rouge pour les variantes EI/DvR et EI/TvR sur la figure 11) en raison des faibles coûts d'investissement pour la PAC. En tenant compte d'une marge d'incertitude liée à la variabilité des données de coûts d'investissement et d'entretien, il est possible, pour cette étude de cas, d'affirmer que le scénario de substitution du chauffage par PAC AE (axe "a") reste le scénario optimal pour minimiser les coûts sur la durée de vie du bâtiment mais présente des coûts proches du scénario de référence (bâtiment existant). Il est ensuite difficile d'établir un classement pour les autres scénarios, leurs coûts totaux étant similaires et situés dans la plage d'incertitude. Tous les scénarios de l'axe "c" conduisent à des surcoûts financiers de l'ordre de 25% par rapport au bâtiment dans son état actuel et même de 35% pour la variante avec panneaux solaires (EI.+S/Dv). D'une manière générale, pour les scénarios des axes "c" et "d", les économies d'énergie ne parviennent pas à compenser les coûts d'investissement initiaux liés à la rénovation de l'enveloppe. Par exemple, la rénovation du radier réduit les coûts liés au chauffage mais conduit à un surcoût d'investissement, notamment lié aux contraintes techniques (intervention à

faire depuis l'intérieur pour isoler (bâtiment non-excavé)) qui ne sera pas remboursable. Les résultats montrent également que la pose de triple vitrage (coefficient de transmission thermique du vitrage U_g égal à $0.6 [W/(m^2.K)]$) amène à des résultats légèrement supérieurs par rapport à la variante avec pose de double vitrage (coefficient U_g égal à $1.0 [W/(m^2.K)]$) même en tenant compte des subventions pouvant être touchées pour le triple vitrage.

Au niveau des résultats d'impacts environnementaux, le scénario consistant à remplacer le chauffage électrique par une PAC AE, sans rénovation de l'enveloppe, permet de réduire d'un facteur 2 les impacts GWP et CED_{NRE} . Cette solution reste équivalente au scénario de rénovation de l'enveloppe avec maintien du chauffage électrique avec, pour avantage, d'être la meilleure solution au niveau des coûts. La solution optimale du point de vue environnemental reste la substitution du chauffage électrique par une PAC AE couplée à une rénovation complète de l'enveloppe (réduction des impacts GWP d'un facteur 3 et CED_{NRE} d'un facteur 4).

Par rapport aux objectifs de la société à 2'000 Watts, les résultats montrent que, pour le GWP, seul le scénario optimal (PAC AE/Dv) passe sous la valeur indicative totale ("Construction" + "Exploitation") de $10 [kgCO_{2-eq}/m^2]$. Tous les autres scénarios se situent au-dessus (entre 12 et $15 [kgCO_{2-eq}/m^2]$). Cependant, ce scénario GWP optimal entraîne des surcoûts financiers de l'ordre de 40% par rapport au scénario de référence. Enfin, pour l'indicateur CED_{NRE} , l'ensemble des scénarios de rénovation (axes "a", "c", "d") présente un impact supérieur à la valeur indicative totale (cf. rapport WP 3.3.b, partie F). Toutefois, en tenant compte des autres postes couverts par les VI SIA 2040 (consommation d'électricité pour l'éclairage, les équipements d'exploitations, la ventilation, les auxiliaires et les installations sanitaires et électriques) déterminés à partir des valeurs unitaires par mètre carré fourni dans le CT SIA 2040, l'ensemble des scénarios de rénovation sont péjorés. Aucun ne permet de répondre à la valeur indicative quel que soit l'indicateur. Même si le CT SIA 2040 précise qu'il n'est pas nécessaire que les valeurs indicatives soient respectées, seule la valeur cible (intégrant la mobilité) devant être respectée, cette comparaison montre qu'il n'est pas aisé de suivre les objectifs fixés pour la société à 2'000 Watts lors d'un assainissement énergétique tel que présenté dans cette étude de cas.

3.4 Conclusions et perspectives

La comparaison de scénarios de rénovation sur des habitats individuel et collectif a montré que les solutions équivalentes ou meilleures à la situation existante varient selon l'indicateur retenu (financier ou environnemental). Néanmoins, certaines tendances peuvent être soulignées. Ainsi, en repartant des problématiques de départ, les résultats de ce WP 3 ont montré que :

- pour l'habitat collectif (degré de vétusté élevé), la solution avec PAC AE et rénovation complète de l'enveloppe permet de minimiser les impacts environnementaux tout en conservant un coût financier proche de la situation actuelle. Si, par contre, un local de stockage peut être trouvé, l'utilisation d'un chauffage à pellets est également intéressante du point de vue environnemental, mais avec un coût annualisé de l'ordre de 10% supérieur à la variante avec PAC AE. Toutefois, cette différence de coûts reste dans la marge d'erreur du calcul financier en raison des incertitudes sur les coûts d'investissement.
- pour l'habitat individuel (degré de vétusté faible), la conservation du système de chauffage électrique et l'amélioration de l'enveloppe génèrent des coûts et des impacts (GWP) très similaires en comparaison au scénario substitution du chauffage par une PAC AE sans rénovation de l'enveloppe. La solution optimale du point de vue environnemental, quel que soit l'indicateur, consiste en une rénovation de l'enveloppe et l'utilisation d'une PAC AE. Du point de vue financier, cette solution a un coût annualisé proche des variantes de rénovation complète de l'enveloppe et du maintien du chauffage électrique.

Cette étude a permis de montrer qu'en couplant des installations techniques performantes à de bonnes rénovations de l'enveloppe, il est possible de réduire fortement les impacts environnementaux même s'il reste difficile de passer sous les valeurs indicatives de la société à 2000 W (CT SIA 2040). Les résultats ont montré que la rénovation à faible impact environnemental des bâtiments d'habitation tout en maîtrisant les coûts n'est pas aisé et peut aboutir à des conclusions parfois contradictoires. Les coûts élevés engendrés par la rénovation de l'enveloppe et par une nouvelle distribution hydraulique peuvent notamment être des freins importants à la rénovation énergétique, ceci malgré les subventions allouées

pour ces modifications (représentant près de 10% des coûts totaux). Le choix formulé par certains cantons d'abandonner progressivement le chauffage électrique est alors questionnable tant les risques de surcoûts pour les propriétaires sont importants. A la lumière des résultats obtenus, l'amélioration des performances énergétiques et environnementales des bâtiments utilisant un chauffage électrique direct a un sens si elle peut se faire soit par la rénovation complète de l'enveloppe avec un possible maintien du chauffage existant, soit par un remplacement du chauffage électrique (sans rénovation de l'enveloppe) par une PAC AE si un local de stockage ne peut être trouvé. Une combinaison de ces deux mesures (rénovation de l'enveloppe en premier, suivi d'un remplacement du chauffage électrique) sera d'autant plus intéressante que le bâtiment comporte un degré de vétusté élevé, pour autant que cela soit financièrement supportable.

Pour terminer, il ne faut pas oublier les contraintes techniques liées à la rénovation de ce genre de bâtiment. La rénovation du chauffage électrique peut générer des nuisances importantes pour les occupants pendant les travaux, qui peuvent être difficiles à gérer dans le cas d'un bâtiment collectif. Il est alors important, lors d'une rénovation d'énergétique d'un bâtiment utilisant un chauffage électrique, de ne pas décider sur les seuls critères financiers et environnementaux, mais de tenir compte également des contraintes d'investissement supportable par le propriétaire ou des contraintes de mise en œuvre afin de pouvoir s'orienter vers une solution réfléchie, adaptée à la situation et durable. Le lecteur intéressé par la lecture des rapports complets de ce WP3 est invité à consulter les parties D, E et F du présent document.

L'essentiel du WP3

→ Du point de vue financier, le remplacement d'un chauffage électrique direct n'est pas intéressant si un local technique et/ou de stockage doit être construit ou réquisitionné pour le nouveau système de chauffage.

Le remplacement du chauffage électrique par une PAC AE, sans rénovation de l'enveloppe, solution souvent recommandée, permet une faible amélioration de la rentabilité financière par rapport au bâtiment existant (coûts annualisés). Par contre, cette solution est plus intéressante que la rénovation de l'enveloppe. Toutefois, il faut relever que la rénovation de l'enveloppe est une action nécessaire pour maintenir le bâtiment en état, alors que le remplacement du système de chauffage ne l'est pas.

→ D'un point de vue environnemental, une rénovation de l'enveloppe reste indispensable pour diminuer les impacts environnementaux. La rénovation partielle de l'enveloppe thermique tout en conservant le chauffage électrique donne des résultats équivalents à remplacer le chauffage électrique par une PAC AE sans rénovation de l'enveloppe. Si l'enveloppe est totalement remplacée, les impacts environnementaux sont même plus faibles que le seul remplacement par une PAC AE.

→ La mise en perspective des scénarios de rénovations avec les exigences de la SIA 2040 (objectifs intermédiaire à 2050 de la société à 2000 Watts) montrent qu'il n'est pas aisé d'atteindre les valeurs indicatives SIA 2040 pour une rénovation.

→ En dehors des contraintes techniques, financières et environnementales, il est important de tenir compte des impacts sociaux induits par la rénovation (p. ex. gestion des occupants pendant les travaux notamment en habitation collective).

4 Contribution aux travaux de l'annexe AIE 56

Cette synthèse ne se présente pas sous la même forme que les trois précédentes étant donné que ce WP porte sur le suivi et la contribution aux travaux de l'annexe AIE 56 "*Cost Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation*". Cette synthèse récapitule les principales contributions du LESBAT par thématiques : présentation de l'état de l'art suisse dans le domaine des écobilans, coordination de la méthodologie d'écobilan pour les rénovations, contributions à la rédaction des livrables et contribution à la documentation d'exemples marquants de rénovation (p.ex. Shining Example).

4.1 Etat de l'art suisse dans le domaine des écobilans

La contribution à l'annexe AIE tâche 56 a permis de présenter l'état de l'art en Suisse dans le domaine des écobilans de bâtiments. Les bases de données (KBOB [6], ecoinvent [13]) et les méthodes de calcul (label Minergie®-ECO) ont également été présentées.

4.2 Méthodologie d'écobilan pour la rénovation

4.2.1 Développement de la méthodologie d'écobilan pour la rénovation

Le LESBAT, en tant que responsable de la sous-tâche STA3 "*Life Cycle Assessment (LCA)*" dans l'annexe 56, a défini avec les partenaires impliqués, une méthodologie pour effectuer les écobilans (ou life cycle assessment (LCA) en anglais) des rénovations énergétiques de bâtiments existants. Elle tient compte des nouveaux matériaux et installations techniques ajoutés et remplacés suite à la rénovation du bâtiment ainsi que de la consommation énergétique après rénovation. A titre d'illustration, la figure 12 précise les postes à considérer pour évaluer les impacts environnementaux d'un bâtiment rénové selon la méthodologie développée.

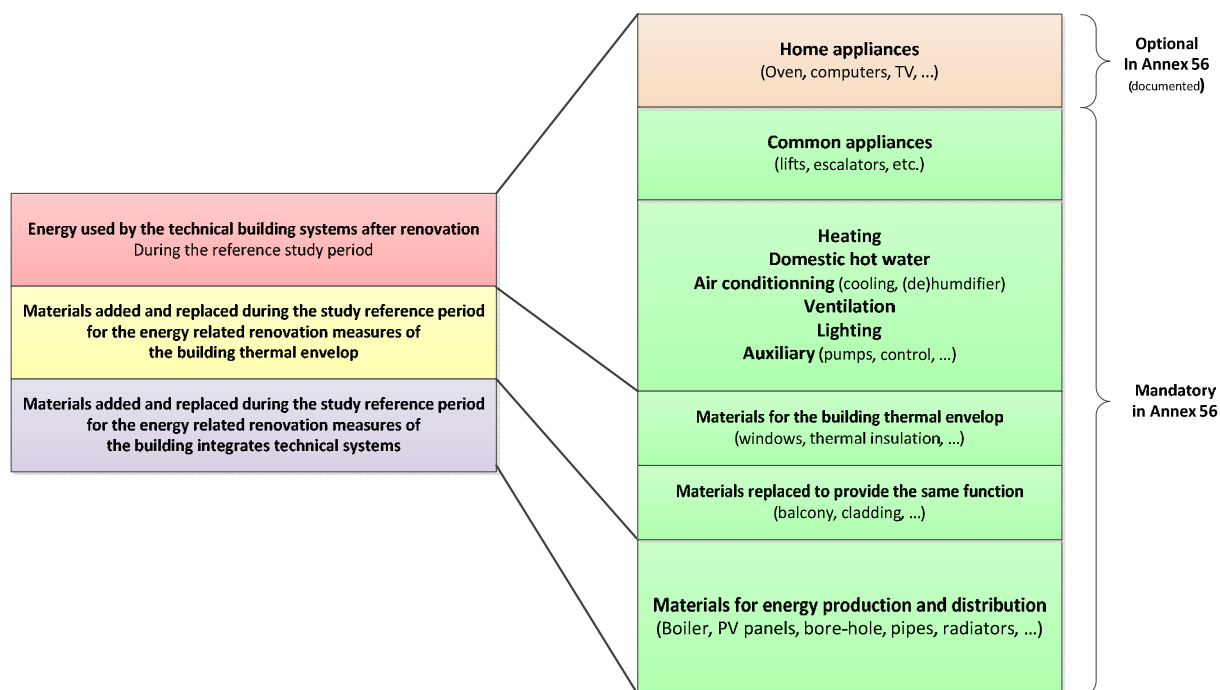


Figure 12: Exemple de schéma présentant les postes à évaluer lors d'un écobilan de bâtiment rénové selon la méthodologie définie dans l'annexe 56

Pour plus d'information, le lecteur est invité à consulter les rapports finaux publiés dans le cadre de ce projet AIE annexe 56 [3] et [14].

4.2.2 Contribution à l'analyse des résultats d'écobilans des études de cas

Suite à l'application de la méthodologie d'écobilan de l'annexe 56 sur différentes études de cas, une analyse détaillée des résultats a été réalisée pour évaluer l'influence de l'énergie grise et des émissions de dioxyde de carbone liées aux matériaux et aux installations techniques ajoutés lors des rénovations. En effet, une des questions posées dans les travaux de l'annexe 56 concerne la pertinence d'intégrer un calcul d'énergie grise (ou écobilan de matériaux et d'installations techniques) dans les rénovations énergétiques de bâtiment. Les résultats et les analyses ont été reportés dans le rapport STA3 de l'annexe 56 [14]. De même, des recommandations ont été formulées pour les décideurs publics et les gestionnaires de bâtiments pour qu'ils tiennent compte désormais de l'énergie grise et des émissions de dioxyde de carbone lors de projets de rénovation.

4.3 Contribution à la documentation de rénovations exemplaires

4.3.1 Shining example

Dans le cadre de l'Annexe 56, il a été décidé de présenter des rénovations énergétiques très performantes (shining example). Le bâtiment de Morges, étudié dans le cadre du projet Reno-HP (Rénovation d'un bâtiment d'habitation de 59 appartements à très hautes performances) financé par l'OFEN et analysé dans le WP1 du projet ECO-Reno, a été sélectionné parmi ces exemples. Afin de présenter ces études de cas de manière uniforme, un modèle de documentation a été développé par les partenaires danois et autrichiens. Le LESBAT a contribué à la définition de la présentation des informations concernant les impacts environnementaux. Sur la base du modèle défini dans le cadre de l'annexe 56, une fiche de présentation de six pages du projet de Morges a ensuite été mise au point. Elle est consultable sous le lien : www.iea-annex56.org/Groups/GroupItemID6/18.CH.pdf.

La figure 13 présente uniquement la première page de ce "shining example".



Figure 13: Page de garde du "shining example" du bâtiment de Morges, disponible sous www.iea-annex56.org/Groups/GroupItemID6/18.CH.pdf

4.3.2 Integrated Performance View (IPV)

En complément du modèle utilisé pour présenter les "shining examples", le LESBAT a également proposé une fiche synthétique pour rapidement se faire une idée des performances d'un bâtiment avant et après rénovation. L'objectif étant de pouvoir regrouper les caractéristiques et les performances énergétiques, financières et environnementales d'un bâtiment sur un document synthétique, plus réduit que celui utilisé dans le "shining example". Suite à l'accueil favorable de cette idée, le LESBAT a proposé un modèle de fiche signalétique. Ce modèle correspondant à une représentation intégrée des performances ou "Integrated Performance View" (IPV) a été reporté en annexe du rapport de la sous-tâche STA3 LCA [14]. L'IPV est composé d'une page A4 (recto-verso) et comporte les parties suivantes :

1) Le recto présente les caractéristiques générales du bâtiment, avant et après rénovation : localisation, année de construction et de rénovation, catégorie d'ouvrage principale, type de structure porteuse, surface de référence énergétique avant et après rénovation, facteur de forme, nombre de degrés-jour, description des éléments de construction et leur valeur U, installations techniques, etc.

2) Le verso présente les performances énergétiques, environnementales et financières.

- *l'énergie du bâtiment* : La consommation d'énergie pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, la ventilation, etc.
- *les coûts* : les coûts annuels liés à la consommation d'énergie et les coûts d'investissement liés à la rénovation. Cet investissement comprend les installations techniques et les éléments de construction lors de la phase de rénovation et d'entretien. Les coûts sont exprimés en euros par mètre carré de surface de l'élément. L'IPV présente également les coûts annuels (ramenés à la durée de vie considérée du bâtiment). Cette double présentation permet d'avoir une vision des coûts soit à la rénovation (coûts d'investissement), soit sur la durée (coûts annuels).
- *l'analyse de cycle de vie* : Cette partie présente l'écobilan du bâtiment avant et après rénovation en tenant compte de l'énergie consommée durant la phase d'utilisation, des matériaux de construction et des installations techniques. Les résultats sont présentés au moyen de trois indicateurs : L'énergie primaire renouvelable (CED_{TOT}), l'énergie primaire non renouvelable (CED_{NRE}) et les émissions de gaz à effet de serre (GWP).

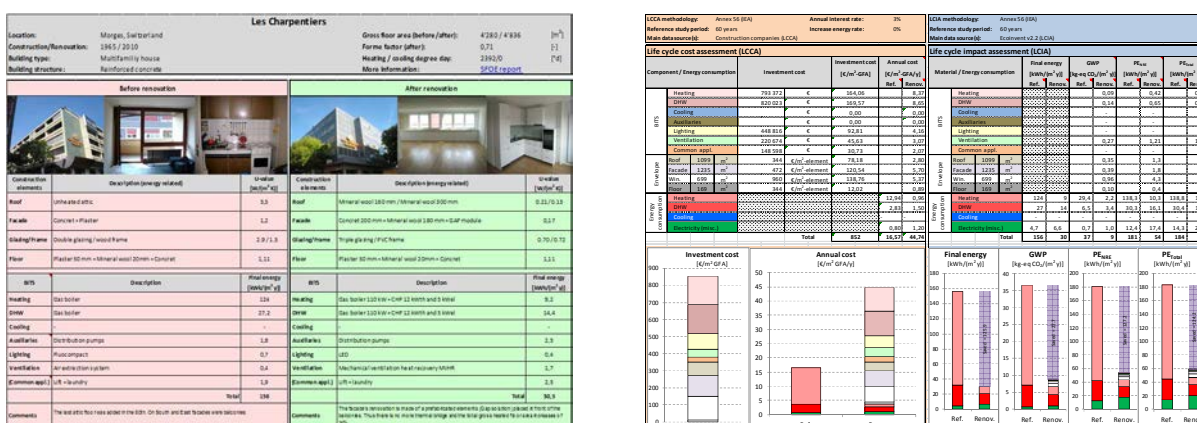


Figure 14: Exemple de représentation intégrée des performances d'un bâtiment (IPV), recto de l'IPV (à gauche) et verso de l'IPV (à droite)

Ce modèle de report des résultats avant et après rénovation peut désormais être renseigné pour de nouvelles études de cas.

4.4 Autres activités menées

4.4.1 Outil d'aide à la rénovation énergétique et environnemental

Le LESBAT développe le logiciel Eco-bat² depuis de nombreuses années. Cet outil permet de faire l'écobilan d'un bâtiment en tenant compte de l'énergie consommée, des matériaux des éléments de construction et des installations techniques. Cet outil a été adapté pour être utilisé dans le cadre de l'annexe 56, comme outil de base pour faire les analyses des études de cas prévues par les différents partenaires mais surtout pour simplifier l'implémentation de la méthodologie LCIA développée dans le cadre de l'annexe 56 et ainsi de faciliter le travail des partenaires.

² www.eco-bat.ch

Suite à une présentation de cet outil en début de projet, certains pays (N, AT, CZ, DK et IT) ont décidé d'utiliser ce programme pour effectuer leurs écobilans dans le cadre de l'annexe 56. Les autres pays, préférant utiliser ou développer d'autres outils. Ces partenaires ont ainsi pu utiliser Eco-Bat sur leurs cas d'études détaillés mais également dans le cadre d'activités liées de manière indirecte à l'annexe 56 :

- Autriche (AEE INTEC) : utilisation d'Eco-Bat pour effectuer des écobilans d'éléments de construction dont les résultats ont été présentés lors d'un workshop pour les industriels
- République Tchèque (Brno University) : utilisation d'Eco-Bat pour effectuer l'écobilan de la rénovation énergétique d'une école située en République Tchèque.
- Danemark (Alborg University) : utilisation d'Eco-Bat pour réaliser des écobilans de bâtiments dans le cadre d'une thèse de doctorat

Pour s'assurer de la cohérence des résultats entre cet outil et les autres outils ou feuilles de calcul utilisés par les autres partenaires, un protocole de comparaison des résultats d'écobilans a été développé sur un même cas d'étude (villa) en mettant à disposition des partenaires les mêmes hypothèses. Ce travail préliminaire a permis d'améliorer puis de garantir la cohérence des résultats des cas d'étude qui ont été reportés dans la tâche STC "*Case studies*".

Le LESBAT a ainsi pu implémenter la méthodologie de calcul des écobilans des bâtiments rénovés de l'annexe 56 dans le logiciel Eco-bat qui a été utilisé comme outil de référence dans les travaux de l'annexe 56 et peut désormais être utilisé ou adapté dans le cadre de nouveaux projets d'écobilans de rénovations de bâtiments menés en Suisse ou à l'international.

4.4.2 Présentation de la méthodologie de calcul de l'optimum environnemental et financier des isolations

Le LESBAT a présenté aux partenaires de l'annexe AIE 56, la méthodologie des épaisseurs optimales d'isolation pour les rénovations (développée dans le WP2 du projet ECO-Reno [15]). Cette contribution permet de partager au sein de la communauté scientifique³ et notamment auprès des partenaires de l'annexe 56 les résultats de ce travail.

4.4.3 Echanges avec les partenaires de l'annexe 57

Un suivi de l'annexe 57 a été réalisé au cours de ce projet afin de mettre au maximum en cohérence les travaux menés dans ces deux annexes et notamment sur les aspects de calculs d'énergie grise. Les participants de l'annexe 57 ont reçu le document rédigé dans l'annexe 56 concernant la méthodologie pour effectuer l'écobilan d'une rénovation énergétique. De même, les résultats des études de cas sur le volet LCA ont pu être communiqués à l'annexe 57.

4.4.4 Participation au workshop de l'annexe 56 à la conférence IBPC'2015

La coordinatrice de l'annexe 56 a invité le LESBAT à un workshop sur les principaux résultats de l'annexe 56 dans le cadre de la conférence IBPC 2015 qui s'est déroulé à Turin (Italie). Ce fut l'occasion de présenter les résultats obtenus (méthodologie et études de cas d'écobilans de bâtiments rénovés). Une communication écrite a été rédigée dans ce cadre et devrait être publiée prochainement dans les actes de cette conférence via la revue *Energy Procedia*.

4.5 Conclusions et perspectives

Le projet ECO-Reno a permis de suivre et de représenter la Suisse dans le cadre de l'annexe AIE 56. Différentes contributions sous la forme de rapports, modèles de documentations, études de cas ont été produites ou coordonnées par le LESBAT et sont disponibles sur le site internet du projet AIE 56⁴.

³ un article est actuellement en cours de rédaction pour soumission prochaine

⁴ www.iea-annex56.org

5 Références

- [1] S. Citherlet, J. Bony, and O. George, "Projet Reno-HP, Installation technique décentralisée pour la rénovation à haute performance," 2011.
- [2] "SIA 2040 - La voie SIA vers l'efficacité énergétique." 2011.
- [3] W. Ott, R. Bolliger, V. Ritter, S. Citherlet., D. Favre, S. Lasvaux, B. Périsset, M. de Almeida, and F. Marco, "Methodology for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56)," 2015.
- [4] "LESOSAI 7, certifications et bilans écologiques et énergétiques de bâtiments." .
- [5] D. Favre and S. Citherlet, "Eco-Bat : A design tool for assessing environmental impacts of buildings and equipment," *Build. Simul. - An Int. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 83–94, 2008.
- [6] "Données des écobilans dans la construction, KBOB," 2012.
- [7] "<http://www.dasgebaeudeprogramm.ch/index.php/fr/le-programme-batiments/objectifs-du-programme-batiments>," 2015. .
- [8] "SIA 480 - Calcul de rentabilité pour les investissement dans le bâtiment." 2004.
- [9] "SIA 2032 - L'énergie grise des bâtiments." 2010.
- [10] V.-O. Beuret, "Evolution des marchés des énergies fossiles 3 / 2014," vol. 2014. 2014.
- [11] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - PARTIE F - WP3.3b : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique - Étude de cas : Habitat collectif," 2015.
- [12] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - PARTIE E - WP3.3a : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique - Étude de cas : Habitat individuel," 2015.
- [13] "Base de données Ecoinvent, version 2.2." [Online]. Available: www.ecoinvent.ch.
- [14] S. Lasvaux, B. Périsset, D. Favre, S. Mahroua, and S. Citherlet, "Life Cycle Assessment for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56)," 2015.
- [15] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-RENO - PARTIE C - WP2 : Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations," 2015.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Projet ECO-Reno - Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation

PARTIE B

**WP1 : Analyses environnementale et financière d'une
rénovation exemplaire d'habitation multifamiliale**

Résumé

Le travail présenté dans ce rapport correspond à la première partie du projet ECO-Reno "Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation" et évalue les impacts environnementaux et les coûts liés à la rénovation énergétique d'un bâtiment d'habitation de 59 appartements.

L'analyse de cycle de vie a montré des résultats très positifs quel que soit l'indicateur considéré (CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP). La part des matériaux utilisés dans la rénovation reste faible en comparaison des économies d'énergie réalisées.

Les aspects financiers ont mis en avant la grande influence du taux d'augmentation du prix de l'énergie sur le nombre d'années nécessaire pour le remboursement. Pour cette étude, le remboursement des investissements grâce aux économies d'énergie paraît difficile sur des périodes à l'échelle de la construction actuelle. Dans ce bâtiment locatif, une répercussion des coûts de rénovation sur les loyers a été effectuée et permet d'envisager une exploitation financière de ce bâtiment sereinement.

Abstract

This report presents the first part of the ECO-Reno project dedicated to the low environmental impacts of residential buildings. It assesses the environmental impacts and costs of the energy related renovation of a 59 storeys' building.

The Life Cycle Assessment (LCA) showed the benefits of the renovation whatever the environmental indicators (CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP and UBP). The share of the materials used in the renovation remains low when compared to the economic savings.

The financial aspects showed the critical influence of the rate of the energy costs increase over the number of years need for the payback time. For this study, the payback time of investments thanks to the energy savings seems to be difficult within the time periods of the current construction. In this rental residential building, the amortization of renovation costs on the rents was studied and enables to foresee a sound financial use of this building.

Table des matières

| | |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| RÉSUMÉ | 3 |
| ABSTRACT | 3 |
| TABLE DES MATIÈRES | 4 |
| LISTE D'ABRÉVIATIONS | 5 |
| LISTE DES FIGURES | 6 |
| LISTE DES TABLEAUX | 7 |
| 1 INTRODUCTION..... | 8 |
| 2 GÉNÉRALITÉS | 9 |
| 2.1 Bâtiment | 9 |
| 2.2 Rénovation du bâtiment | 9 |
| 2.2.1 Eléments de construction rénovés | 10 |
| 2.3 Consommation énergétique du bâtiment | 13 |
| 2.4 Méthodologies adoptées | 13 |
| 2.4.1 Durées de vie considérées | 14 |
| 3 ÉCOBILAN DE LA RÉNOVATION | 15 |
| 3.1 Méthodologie | 15 |
| 3.1.1 Analyse de cycle de vie du bâtiment rénové | 16 |
| 3.1.2 Outils et base de données | 16 |
| 3.1.3 Données d'impacts | 17 |
| 3.2 Résultat de l'écobilan | 18 |
| 3.2.1 Impacts des matériaux ajoutés lors de la rénovation | 18 |
| 3.2.2 Impacts de la consommation énergétique | 19 |
| 3.2.3 Ecobilan global | 19 |
| 3.3 Impacts des différentes mesures de rénovation | 20 |
| 3.3.1 Rénovation de l'enveloppe | 20 |
| 3.3.2 Remplacement du chauffage | 22 |
| 3.4 Evaluation du bâtiment par rapport à la société à 2000 W | 22 |
| 3.4.1 Modélisation | 23 |
| 3.4.2 Résultats | 24 |
| 4 RETOUR SUR INVESTISSEMENT DE LA RÉNOVATION | 25 |
| 4.1 Méthodologie | 25 |
| 4.1.1 Hypothèses et données d'entrée | 26 |
| 4.2 Investissements | 26 |
| 4.2.1 Investissements liés à la rénovation | 26 |
| 4.3 Temps de remboursement financier – Résultats et analyses | 27 |
| 4.4 Part financière des différents éléments | 30 |
| 5 CONCLUSION..... | 32 |
| 6 REMERCIEMENTS..... | 33 |
| 7 RÉFÉRENCES | 33 |

Liste d'abréviations

| | | |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| A | annuité globale | [CHF/an] |
| a | Facteur d'annuité | [-] |
| ACV | Analyse de cycle de vie | [-] |
| A _E | Surface de référence énergétique | [m ²] |
| a _j | facteur d'annuité sur la base de la durée de vie de l'élément j considéré | [-] |
| CO ₂ | Taux de CO ₂ | [ppm] |
| COV | Composés Organiques Volatiles | [ppm] |
| ECS | Eau chaude sanitaire | [-] |
| i | Taux d'intérêt | [-] |
| i _n | Taux d'intérêt nominal | [-] |
| infl | Taux d'inflation | [-] |
| Inv _j | Investissement de l'élément j considéré | [CHF] |
| i _r | Taux d'intérêt réel | [-] |
| t | Durée de l'emprunt | [an] |

Liste des figures

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Vue du bâtiment avant et après rénovation | 9 |
| Figure 2: Ecobilan avant et après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP | 19 |
| Figure 3: Rénovation de l'enveloppe – Impacts environnementaux avant et après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP | 20 |
| Figure 4: Impacts environnementaux des éléments de construction après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP | 21 |
| Figure 5: Répartition des matériaux de la rénovation de l'enveloppe thermique pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP | 21 |
| Figure 6: Remplacement du chauffage - Impacts environnementaux avant et après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP | 22 |
| Figure 7: Evaluation des performances du bâtiment par rapport aux valeurs indicatives de la SIA 2040, CED_{NRE} en haut et GWP en bas | 24 |
| Figure 8 : Détermination du temps de remboursement de la rénovation du bâtiment de Morges avec les valeurs de base | 28 |
| Figure 9 : Evolution du prix du gaz pour différents taux annuel d'augmentation (valeur initiale : 8 cts/kWh)..... | 28 |
| Figure 10 : Evolution du temps de remboursement énergétique en fonction du taux annuel d'augmentation du prix du gaz (taux d'augmentation de l'électricité fixé à 0%)..... | 29 |
| Figure 11 : Evolution du temps de remboursement énergétique en fonction du taux d'emprunt nominal | 29 |
| Figure 12 : Parts financières annuelles liées aux différents éléments de la rénovation et à la consommation énergétique, en haut avec augmentation du coût de l'énergie de 1%, à gauche de 2.5 % et à droite 4.85 % | 30 |

Liste des tableaux

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Façades contre extérieur 1 - 526 [m²]..... | 10 |
| Tableau 2: Façades contre extérieur 2 – 581 [m²] | 10 |
| Tableau 3: Façade contre extérieur 3 – 64 [m²]..... | 11 |
| Tableau 4: Façades 5 ^{ème} étage – 64 [m²]..... | 11 |
| Tableau 5: Plancher contre extérieur – 169 [m²]..... | 11 |
| Tableau 6: Plancher contre non chauffé – 135 [m²] | 12 |
| Tableau 7: Toiture – 118 [m²] | 12 |
| Tableau 8: Terrasse – 297 [m²]..... | 12 |
| Tableau 9: Consommations énergétiques du bâtiment avant et après rénovation, par unité de A _E | 13 |
| Tableau 10: Durées de vie considérées pour les installations techniques rénovées et pour les éléments de l'enveloppe du bâtiment [3]..... | 14 |
| Tableau 11: Ecobilan de la rénovation..... | 15 |
| Tableau 12: Analyse de cycle de vie du bâtiment..... | 16 |
| Tableau 13: Installations techniques rénovées – paramètres utilisés pour la modélisation des systèmes techniques du bâtiment..... | 17 |
| Tableau 14: Impacts des matériaux ajoutés lors de la rénovation, valeurs d'impacts par [m²] de A _E et par année de vie du bâtiment..... | 18 |
| Tableau 15: Impacts de la consommation énergétique du bâtiment avant et après rénovation, valeurs d'impacts par [m²] de A _E et par année de vie du bâtiment | 19 |
| Tableau 16 : Investissement de la rénovation lié à la performance énergétique du bâtiment (prix TTC) | 27 |

1 Introduction

Dans le cadre d'une rénovation, plusieurs aspects doivent être pris en considération comme, les coûts d'investissement, les coûts liés à la consommation d'énergie, les performances thermiques et les aspects liés au confort thermique des habitants. L'étude proposée apporte un éclairage supplémentaire en cherchant à définir les performances globales de la rénovation d'un point de vue environnemental et financier.

Pour ce faire, un bâtiment rénové selon Minergie®-P a été étudié.

Ce bâtiment d'habitation collectif (59 appartements), situé à Morges, a subi, en 2010, une rénovation complète de son enveloppe thermique ainsi que de ses installations techniques. Durant les deux premières années d'utilisation, différents points ont été mesurés et analysés par le LESBAT :

- La consommation d'énergie de chauffage et d'eau chaude sanitaire.
- La consommation d'énergie électrique du système de ventilation.
- La qualité de l'air (CO₂ et COV).
- Le confort thermique.
- Le niveau acoustique dans les appartements.

Cette étude a permis de confirmer le gain très important en énergie de chauffage de la rénovation de cet immeuble. Le descriptif de la rénovation et l'ensemble des résultats sont disponibles dans [1].

Les résultats encourageants de cette étude d'un point de vue énergétique doivent être analysés et mis en relation avec une analyse environnementale (impact des matériaux ajoutés) et une analyse financière (retour sur investissement), ceci dans le but d'être complet et objectif.

La première partie du présent rapport s'articule autour des généralités liées à la rénovation de ce bâtiment (ch.2), la seconde partie se concentre sur l'écobilan de la rénovation (ch.3) alors que le chapitre 4 présente l'analyse financière de la rénovation et définit le calcul du retour sur investissement.

2 Généralités

Ce chapitre donne quelques clés de lecture afin de cerner le bâtiment et les rénovations qu'il a subies. Ces informations sont tirées du document [1] où plus de détails sont disponibles. De plus, ce chapitre regroupe les paramètres communs aux analyses environnementales et financières.

2.1 Bâtiment

Le bâtiment analysé est situé à Morges (VD) et a été construit à la fin des années 60. Ce bâtiment possède 59 appartements et un rez-de-chaussée occupé par une surface commerciale. Durant l'année 2010, une rénovation complète a été faite sur ce bâtiment. Cette rénovation a concerné l'enveloppe thermique ainsi que les installations techniques (chauffage, ECS et ventilation). La figure 1 montre une vue du bâtiment avant et après rénovation.



Figure 1: Vue du bâtiment avant et après rénovation

2.2 Rénovation du bâtiment

Le bâtiment est constitué de différentes catégories d'ouvrages selon l'annexe A de la norme SIA 380/1 [2]. Le rez-de-chaussée est occupé par des commerces alors que les étages sont affectés à de l'habitat collectif. La partie commerciale n'appartient pas au même propriétaire que les étages et n'a bénéficié d'aucune rénovation. Elle n'est pas considérée dans cette étude.

Le bâtiment a subi une rénovation lourde tant du point de vue de l'enveloppe thermique que des éléments intérieurs. De plus, la pose d'éléments de façade à l'extérieur des balcons a permis une augmentation de la surface de plancher des appartements. La surface de référence énergétique (A_E) du bâtiment est passée de 4'280 à 4'836 [m²].

Les éléments principaux de la rénovation du bâtiment sont listés ci-dessous (liés aux aspects énergétiques) :

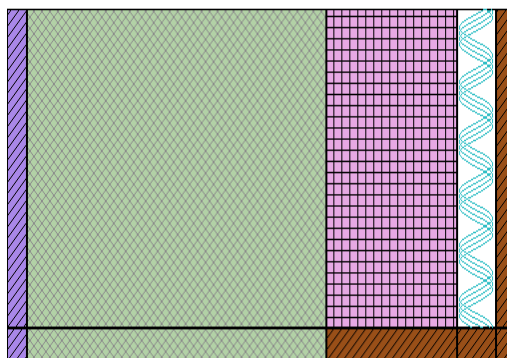
- Rénovation de l'enveloppe avec la pose d'éléments préfabriqués à très faible valeur U (< 0.1 [W/m²/K]).
- Circuit unique d'eau chaude sur lequel est piqué chaque appartement pour son chauffage et la production de l'eau chaude sanitaire (ECS) à la volée via un échangeur à plaques.
- Système compact dans chaque appartement, qui intègre une ventilation décentralisée avec récupération de chaleur et un système de distribution de chaleur pour le chauffage ou l'ECS.
- Remplacement de l'ancienne chaudière à gaz par une chaudière à gaz à condensation d'une puissance de 110 [kW].
- Pose de plusieurs colonnes montantes alimentant chaque appartement.
- Pose d'un seul radiateur par appartement situé dans la salle de bains. Celui-ci assure le maintien en température de l'appartement.

2.2.1 Eléments de construction rénovés

Ce chapitre présente les différents éléments de construction faisant partie de la rénovation énergétique du bâtiment (enveloppe thermique). Les couches présentes avant la rénovation sont mentionnées en rouges. Ces dernières ne sont pas prises en compte dans l'écobilan.

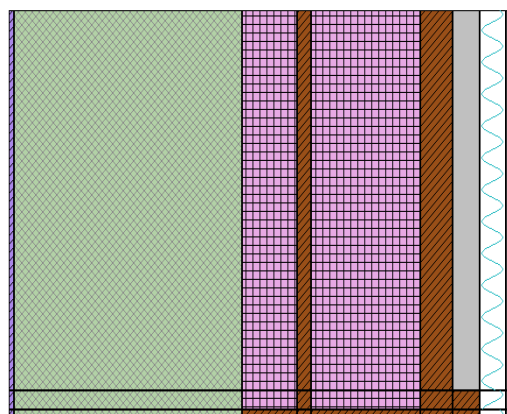
2.2.1.1 Façades

Seule la structure en béton des façades est conservée. L'isolation extérieure ainsi que les différents revêtements intérieurs et extérieurs font partie de la rénovation. Quatre structures différentes de façades contre l'extérieur sont recensées dans le bâtiment.



| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------|
| Enduit minéral | 1.5 | 1400 |
| Béton C30/37 | 23 | 2400 |
| Laine de verre / Chevron - Bois massif de construction (conifère) | 10 | 38 / 500 |
| Lame d'air / Lambris - Bois massif (conifère) | 3 | - / 520 |
| Panneau bois aggloméré lié par ciment | 1 | 1200 |

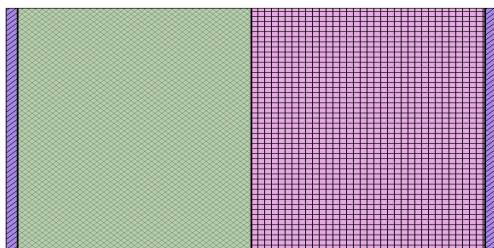
Tableau 1: Façades contre extérieur 1 - 526 [m²]



| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|------------------------|----------------|-------------------------|
| Enduit minéral | 1.5 | 1400 |
| Béton C30/37 | 25 | 2400 |
| Laine de pierre / bois | 6 | 130 / 700 |
| Bois massif dur | 1.5 | 700 |
| Laine de pierre / bois | 12 | 130 / 700 |
| Bois massif dur | 3.5 | 700 |
| Papier kraft / bois | 3 | 420 / 700 |
| Lame d'air | 2.9 | |
| Verre | 0.6 | 2500 |

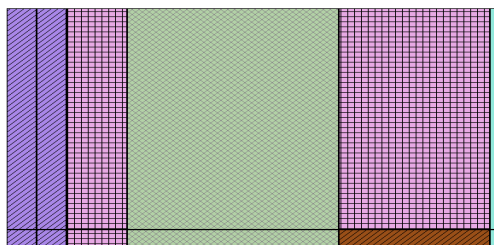
Tableau 2: Façades contre extérieur 2 – 581 [m²]

Cet élément de façade préfabriquée opaque a la particularité d'absorber les gains solaires et de les transmettre à l'intérieur du bâtiment (décalage temporel). En effet, la surface extérieure de la façade est composée d'un vitrage, d'une lame d'air et d'une couche en carton alvéolé, le tout apposé sur l'isolation classique, côté extérieur.



| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|---------------------|----------------|-------------------------|
| Enduit minéral | 1.5 | 1400 |
| Béton C30/37 | 30 | 2400 |
| Laine de verre | 30 | 50 |
| Mortier de ciment | 1.5 | 1800 |

Tableau 3: Façade contre extérieur 3 – 64 [m²]

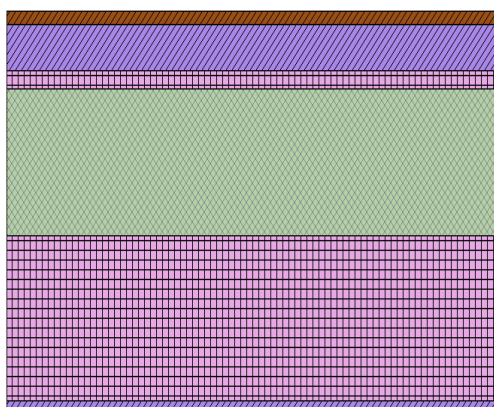


| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|----------------------------|----------------|-------------------------|
| Carrelage céramique | 2 | 2300 |
| Plaque de plâtre cartonnée | 2 | 1000 |
| Laine de verre | 4 | 130 |
| Béton | 14 | 2400 |
| Laine de verre / Bois dur | 10 | 50 / 700 |
| Aluminium | 0.5 | 2800 |

Tableau 4: Façades 5^{ème} étage – 64 [m²]

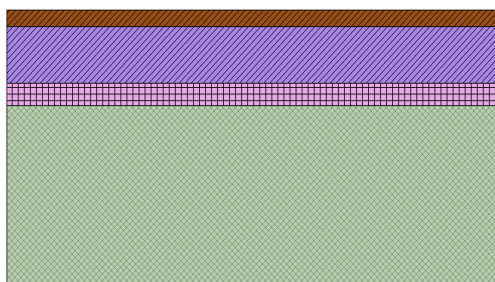
2.2.1.2 Planchers

Il est important de signaler que la surface des planchers entrant dans l'analyse est relativement faible. En effet, les planchers du 1^{er} étage entre la zone commerciale et la zone d'habitation ainsi qu'une partie des planchers contre la zone non-chauffée ne font pas partie de la rénovation énergétique du bâtiment.



| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|---------------------------------|----------------|-------------------------|
| Parquet 3 plis vitrifié | 1.5 | 900 |
| Chape de ciment | 5 | 1850 |
| Laine de verre | 2 | 50 |
| Béton C30/37 | 16 | 2400 |
| EPS | 18 | 15 |
| Plaque de plâtre armé de fibres | 1.25 | 1150 |

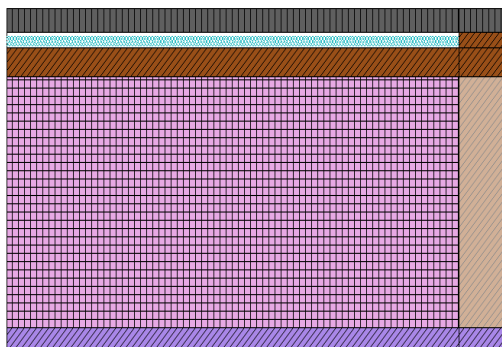
Tableau 5: Plancher contre extérieur – 169 [m²]



| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|-------------------------|----------------|-------------------------|
| Parquet 3 plis vitrifié | 1.5 | 900 |
| Chape de ciment | 5 | 1850 |
| Laine de verre | 2 | 50 |
| Béton C30/37 | 16 | 2400 |

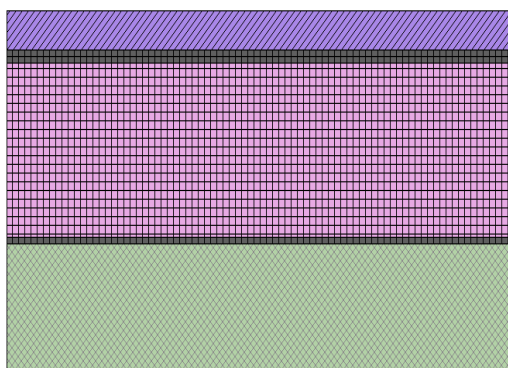
Tableau 6: Plancher contre non chauffé – 135 [m²]

2.2.1.3 Toitures / plafonds



| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|------------------------------------------------|----------------|-------------------------|
| Tuiles de terre cuite | 2 | 2000 |
| Lame d'air / Bois massif (conifère) | 1.3 | - / 520 |
| Panneau de particules tendre | 2.4 | 300 |
| Laine de verre / Bois massif (conifère) | 21 | 18 / 450 |
| Enduit d'isolation thermique | 1.9 | 450 |

Tableau 7: Toiture – 118 [m²]



| Matériau | Epaisseur [cm] | Masse volumique [kg/m³] |
|--------------------------|----------------|-------------------------|
| Chape de ciment | 5 | 1850 |
| Lé d'étanchéité bitumeux | 0.53 | 1132 |
| Lé d'étanchéité bitumeux | 0.35 | 1171 |
| EPS | 22 | 25 |
| Lé d'étanchéité bitumeux | 0.38 | 1236 |
| Béton | 16 | 2400 |

Tableau 8: Terrasse – 297 [m²]

2.2.1.4 Fenêtres

Toutes les fenêtres du bâtiment ont été remplacées. Les nouvelles fenêtres sont composées de cadres en PVC munis de triples vitrages. Le cadre représente 30% de la surface des fenêtres et 20% de la surface des velux en toiture.

2.3 Consommation énergétique du bâtiment

L'écobilan et les aspects financiers d'une rénovation énergétique selon l'Annexe 56 nécessite de connaître les consommations annuelles d'énergie avant et après la rénovation pour tous les postes de consommation du bâtiment (chauffage, ECS, ventilation, éclairage, auxiliaires (pompes de circulations, etc.) et équipements électriques (machine à laver et à sécher, etc.)).

Le tableau 9 présente les consommations d'énergie du bâtiment de Morges avant et après rénovation. L'ensemble des valeurs de consommation énergétique correspondent aux valeurs réelles mesurées avant et après rénovation. Il est à noter que la consommation réelle d'électricité du bâtiment a été répartie entre différents postes de consommation (auxiliaires, éclairage, ventilation, équipements électrique, etc.) sur la base d'hypothèses ou de mesures.

| Consommateur | Vecteur énergétique | Avant rénovation | | | Après rénovation | | |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------|
| | | Energie utile [kWh/(m ² ·an)] | Rendement [%] | Energie finale [kWh/(m ² ·an)] | Energie utile [kWh/(m ² ·an)] | Rendement [%] | Energie finale [kWh/(m ² ·an)] |
| Chauffage/ECS | Gaz naturel | 121.11 | 80 | 151.39 | 22.01 | 95 | 23.62 |
| Auxiliaires | Electricité | 1.78 | 100 | 1.78 | 2.28 | 100 | 2.3 |
| Eclairage | Electricité | 0.67 | 100 | 0.67 | 0.4 | 100 | 0.4 |
| Ventilation | Electricité | 0.36 | 100 | 0.36 | 1.7 | 100 | 1.7 |
| Equip. électrique | Electricité | 1.89 | 100 | 1.89 | 2.28 | 100 | 2.28 |

Tableau 9: Consommations énergétiques du bâtiment avant et après rénovation, par unité de A_E

Dans son ensemble, la consommation d'énergie finale du bâtiment (tous les postes de consommation considérés) a diminué d'un facteur cinq suite à la rénovation. La rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment additionnée à la mise en place d'une chaudière à condensation pour le gaz a permis de diviser par un facteur supérieur à 10 la consommation d'énergie finale pour le chauffage. La mise en place de compteurs individuels de chaleur offre également un potentiel d'économie d'énergie pour l'eau chaude sanitaire (ECS) dans la mesure où le locataire est responsabilisé de sa propre consommation; l'installation de luminaire LED dans les zones de circulation offre également un potentiel d'économie d'énergie électrique pour l'éclairage. Par contre, le remplacement de la ventilation simple flux par un système double flux engendre une consommation électrique plus importante après rénovation. De ce fait, la consommation d'énergie finale électrique totale du bâtiment a augmenté par rapport à la situation avant rénovation.

2.4 Méthodologies adoptées

Sans autre indication, les méthodologie de calculs adoptées sont conformes à celles définies dans le cadre de l'Annexe 56 [3].

2.4.1 Durées de vie considérées

Il est nécessaire de fixer une durée d'étude afin de pouvoir tenir compte des futurs remplacements de matériaux ou de systèmes techniques. Concernant ce paramètre, l'Annexe 56 propose d'utiliser le nombre d'années jusqu'à la prochaine rénovation ou le nombre d'années jusqu'à la démolition du bâtiment. Une période de 60 ans est suggérée. Cette valeur, conforme au cahier technique SIA 2032, a été utilisée pour cette étude.

Contrairement à Minergie®-ECO, qui considère des nombres de remplacements fractionnaires (dans le cas où la durée de vie d'un composant n'est pas terminée lorsque le bâtiment arrive en fin de vie), l'Annexe 56 prévoit uniquement des nombres de remplacements entiers. Un composant est donc remplacé que si au moins la moitié de sa durée de vie subsiste jusqu'à la démolition du bâtiment (ou à la prochaine rénovation).

Le tableau 10 définit les durées de vie considérées pour les différents systèmes techniques et pour les éléments de construction de l'enveloppe.

| Éléments de construction et installations techniques | Durée de vie [an] |
|------------------------------------------------------|-------------------|
| Production de chaleur | 20 |
| Distribution de chaleur | 30 |
| Ventilation | 30 |
| Façades | 30 |
| Plancher | 30 |
| Fenêtres | 20 |
| Toiture | 40 |

Tableau 10: Durées de vie considérées pour les installations techniques rénovées et pour les éléments de l'enveloppe du bâtiment [3]

3 Écobilan de la rénovation

La rénovation énergétique d'un bâtiment vise à réduire sa consommation d'énergie, ce qui a pour conséquence de diminuer les impacts liés à son exploitation. Toutefois, une rénovation engendre également des impacts supplémentaires dus aux matériaux ajoutés et aux installations techniques remplacées. Ce chapitre décrit la méthodologie utilisée pour effectuer l'écobilan de la rénovation énergétique du bâtiment de Morges [1] et présente les résultats obtenus.

3.1 Méthodologie

Les impacts environnementaux d'un bâtiment peuvent être quantifiés à l'aide d'une analyse de cycle de vie (ACV) détaillée, de sa construction à l'élimination des déchets engendrés par sa démolition. La méthodologie appliquée a été développée dans le cadre de l'Annexe 56 [3] de l'Agence Internationale de l'Energie. Elle consiste à comparer l'écobilan du bâtiment après rénovation à un cas de référence correspondant au bâtiment non-rénové. Le tableau 11 répertorie les éléments pris en compte dans le cas d'étude en différenciant les matériaux de l'énergie consommée.

| | ACV Cas de référence | ACV Bâtiment rénové |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Matériaux | | Matériaux ajoutés à l'enveloppe thermique durant la rénovation |
| | | Systèmes techniques ajoutés ou remplacés lors de la rénovation: <ul style="list-style-type: none"> • Installations de production de chaleur • Installations de distribution de chaleur • Installations de ventilation |
| Energie | <ul style="list-style-type: none"> • Chauffage • Production d'ECS • Ventilation • Eclairage • Auxiliaires | <ul style="list-style-type: none"> • Chauffage • Production d'ECS • Ventilation • Eclairage • Auxiliaires |

Tableau 11: Ecobilan de la rénovation

L'écobilan du bâtiment après rénovation tient compte uniquement des nouveaux matériaux de construction ajoutés ou remplacés sur l'enveloppe thermique. Les éléments intérieurs ou extérieurs ne participant pas "énergétiquement" au fonctionnement du bâtiment ne sont pas considérés, conformément à la méthodologie des écobilans de l'Annexe 56. De la même manière, seules les nouvelles installations techniques sont prises en compte.

3.1.1 Analyse de cycle de vie du bâtiment rénové

L'analyse de cycle de vie du bâtiment rénové est compatible dans ses grandes lignes avec le cahier technique SIA 2032 [4] et le standard Minergie®-ECO [5], ainsi qu'avec la norme européenne EN 15978 [6]. Le tableau 12 répertorie chronologiquement les étapes de vie du bâtiment qui sont prises en compte et celles qui sont ignorées dans le cadre de cet écobilan, conformément à la méthodologie définie dans l'Annexe 56.

| | Phase | Détails | Pris en compte ? | Justification |
|-------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Rénovation | Fabrication des matériaux | Extraction des matières premières, acheminement jusqu'à une usine et transformation en produit fini | Oui | - |
| | Transport des matériaux | Transport de l'usine au site de construction | Oui | - |
| | Montage | Intégration du matériau au bâtiment | Non | Ces impacts sont difficilement chiffrables et peuvent être négligés (Annexe 56). |
| Utilisation | Maintenance | Entretien et réparation de matériaux | Non | Ces impacts sont difficilement chiffrables et peuvent être négligés (Annexe 56). |
| | Remplacement | Remplacement des matériaux - ajoutés lors de la rénovation initiale- qui arrivent en fin de vie (comprend la fabrication et le transport des matériaux). | Oui | - |
| | Consommation liée au confort des occupants | Chauffage, eau chaude sanitaire, climatisation, ventilation, éclairage, auxiliaires | Oui | - |
| | Autres consommations d'énergie | Appareils ménagers | Non | Non pris en compte dans l'Annexe 56. |
| Elimination | Démolition du bâtiment | | Non | Ces impacts sont difficilement chiffrables et peuvent être négligés (Annexe 56). |
| | Transport des déchets | Transport du bâtiment jusqu'à des sites d'élimination | Oui | - |
| | Elimination des déchets | Recyclage, incinération ou mise en décharge | Oui | - |

Tableau 12: Analyse de cycle de vie du bâtiment

3.1.2 Outils et base de données

Le logiciel Lesosai 7.4 [7] a été utilisé pour effectuer les bilans thermiques du bâtiment avant et après rénovation. Les informations disponibles pour le projet Reno-HP [8] (photos, rapport final de l'étude, composition des éléments de construction, demande de label Passivhaus) ainsi que diverses informations fournies dans le cadre d'un projet de Master de la HEIG-VD [9] ont été utilisées afin de modéliser ces deux variantes du bâtiment. Les bilans thermiques avant et après rénovation ont été

validés en comparant les résultats obtenus aux consommations réelles relevées sur le bâtiment. Les deux bilans étant proches des valeurs de comparaison, il est possible d'émettre que les deux modèles développés sont cohérents et utilisables pour effectuer l'écobilan global du bâtiment.

Le modèle du bâtiment rénové a été exporté vers Eco-Bat 4.0 [10]. Ce logiciel permet de réaliser un écobilan conforme à la méthodologie définie par l'Annexe 56. La composition des éléments de construction est directement reprise du modèle Lesosai. Les durées de vie des différents composants du bâtiment peuvent être modifiées afin d'être conformes aux exigences de l'Annexe 56. Les consommations d'énergies, avant et après rénovation, utilisées dans les calculs correspondent aux consommations réelles du bâtiment. Eco-Bat utilise comme source de données principale la liste de recommandations de la KBOB [11] en matière d'écobilans. Celle-ci regroupe un ensemble de données d'impacts de matériaux de construction, d'installations techniques et de vecteurs énergétiques. Ces informations proviennent principalement de la base de données Ecoinvent 2.2 [12] ainsi que de différentes études [13] [14]. Concernant les matériaux de construction, des valeurs (exprimées par kg ou par m² de matière) sont fournies pour la fabrication et l'élimination. La liste de la KBOB propose également des valeurs d'impacts pour la fabrication et l'élimination des différentes catégories de systèmes techniques. Celles-ci sont généralement applicables à un type d'affectation particulier (selon SIA 380/1 [2]) et sont habituellement exprimées par [m²] de A_E. Les impacts de remplacement des matériaux et des systèmes techniques peuvent aisément être quantifiés car un remplacement équivaut à une fabrication et une élimination. Les données d'impacts des vecteurs énergétiques sont quant à elles exprimées par [MJ] ou [kWh] par unité d'énergie finale.

3.1.3 Données d'impacts

3.1.3.1 Installations techniques

La liste de recommandation de la KBOB propose des valeurs d'impacts pour différentes installations de production de chaleur, en fonction de la puissance requise. Ces données ont été compilées sur la base de systèmes de type chauffage à mazout, à gaz ou à bois. Elles englobent la chaudière, la cuve de stockage ainsi que la citerne. De manière identique, les impacts de la distribution de chaleur par radiateurs dépendent de la puissance requise au niveau de l'installation dans son ensemble. Ces impacts tiennent compte des émetteurs de chaleur ainsi que du réseau hydraulique. Le tableau 13 répertorie les paramètres utilisés pour modéliser les systèmes techniques du bâtiment.

| Type de système | Données KBOB - Unité | Facteur appliqué à la donnée KBOB | Unité |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Production de chaleur | Production de chaleur, besoin en chaleur spécifique. [Impact/W/m ² (A _E)] | 12.7 | [W/m ² (A _E)] |
| Distribution de chaleur | Radiateurs [Impact/W/m ² (A _E)] | 12.7 | [W/m ² (A _E)] |
| Ventilation | Ventilation mécanique contrôlée [Impact/m ² (A _E)] | 4836 | [m ² (A _E)] |

Tableau 13: Installations techniques rénovées – paramètres utilisés pour la modélisation des systèmes techniques du bâtiment

3.1.3.2 Consommation d'énergie

Les données sources utilisées pour l'écobilan pour les impacts du gaz naturel proviennent de la liste du KBOB. Il s'agit de valeurs génériques, basées sur une donnée Ecoinvent valide pour l'Europe. L'électricité utilisée par le bâtiment correspond au mix électrique disponible à la prise en Suisse (mix consommateur CH de [11]). Cette donnée correspond à une moyenne annuelle tenant compte des impacts de la production locale d'électricité (majoritairement hydraulique et nucléaire) ainsi que des importations en provenance de l'étranger.

3.2 Résultat de l'écobilan

Ce chapitre présente les résultats de l'écobilan de la rénovation du bâtiment réalisé à l'aide du logiciel Eco-Bat [10]. Les quatre indicateurs suivants ont été retenus :

- CED_{NRE} [MJ] : énergie primaire non-renouvelable.
- CED_{TOT} [MJ] : énergie primaire totale (renouvelable et non-renouvelable).
- GWP [kg CO₂-eq] : émissions de gaz à effet de serre.
- UBP [Pts] : quantifie les charges environnementales résultant de l'utilisation des ressources énergétiques, de la terre et de l'eau douce, des émissions dans l'air, l'eau et le sol, ainsi que de l'élimination des déchets.

L'énergie primaire et les émissions de gaz à effet de serre sont des indicateurs universellement reconnus alors que les points UBP correspondent à une problématique propre à la Suisse. Les résultats seront toujours exprimés par [m²] de surface de référence énergétique et par année de vie du bâtiment.

3.2.1 Impacts des matériaux ajoutés lors de la rénovation

Le tableau 14 présente les impacts des matériaux ajoutés lors de la rénovation et des installations techniques ajoutées ou remplacées.

| Composant | Surface totale [m ²] | CED_{TOT} [MJ/m ² an] | CED_{NRE} [MJ/m ² an] | GWP [kg CO ₂ -eq/m ² an] | UBP [Pts/m ² an] |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|
| Toiture | 1'099 | 5.1 | 4.8 | 0.35 | 316 |
| Façades | 1'235 | 12.6 | 6.4 | 0.39 | 642 |
| Fenêtres | 699 | 16.1 | 15.4 | 0.96 | 1'140 |
| Planchers | 169 | 2.0 | 1 | 0.07 | 80 |
| Total des éléments de construction | | 35.8 | 27.6 | 1.78 | 2'178 |
| Production de chaleur | | 0.6 | 0.6 | 0.03 | 70 |
| Distribution de chaleur | | 3.4 | 3.3 | 0.20 | 296 |
| Ventilation | | 4.6 | 4.4 | 0.27 | 666 |
| Total des installations techniques | | 8.7 | 8.2 | 0.51 | 1'032 |
| Total | | 44.5 | 35.8 | 2.3 | 3'210 |

Tableau 14: Impacts des matériaux ajoutés lors de la rénovation, valeurs d'impacts par [m²] de A_E et par année de vie du bâtiment

3.2.2 Impacts de la consommation énergétique

Le tableau 15 présente les impacts liés à l'exploitation du bâtiment avant et après rénovation.

| Consommateur | CED _{TOT} [MJ/m ² an] | | CED _{NRE} [MJ/m ² an] | | GWP [kg CO ₂ -eq/m ² an] | | UBP [Pts/m ² an] | |
|-------------------|----------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------------|-------------|--------------------------------|--------------|
| | Avant | Après | Avant | Après | Avant | Après | Avant | Après |
| Chauffage | 499.6 | 37.1 | 498 | 36.9 | 29.43 | 2.18 | 14'082 | 1'045 |
| ECS | 109.5 | 58 | 109.1 | 57.8 | 6.45 | 3.41 | 3'086 | 1'635 |
| Auxiliaires | 19.6 | 24.7 | 16.9 | 21.3 | 0.26 | 0.33 | 802 | 1'014 |
| Eclairage | 7.4 | 4.6 | 6.4 | 4 | 0.1 | 0.06 | 302 | 189 |
| Ventilation | 4.0 | 18.3 | 3.4 | 15.8 | 0.05 | 0.25 | 162 | 752 |
| Equip. électrique | 20.8 | 25 | 17.9 | 21.6 | 0.28 | 0.34 | 852 | 1'027 |
| Total | 660.7 | 167.8 | 651.7 | 157.5 | 36.58 | 6.58 | 19'286 | 5'662 |

Tableau 15: Impacts de la consommation énergétique du bâtiment avant et après rénovation, valeurs d'impacts par [m²] de A_e et par année de vie du bâtiment

Avant rénovation, le chauffage représentait environ 75% de l'énergie primaire consommée (CED_{TOT} et CED_{NRE}) et plus de 80% des émissions de gaz à effet de serre (GWP) générées par le bâtiment. L'amélioration des performances de l'enveloppe ainsi que l'utilisation d'une chaudière plus efficiente ont engendré une baisse significative des besoins de chauffage se répercutant directement sur les différents impacts. Dans le bâtiment rénové, les impacts du chauffage sont dès lors plus faibles que ceux de l'ECS.

3.2.3 Ecobilan global

La figure 2 présente les résultats de l'écobilan du bâtiment avant et après rénovation pour les quatre indicateurs.

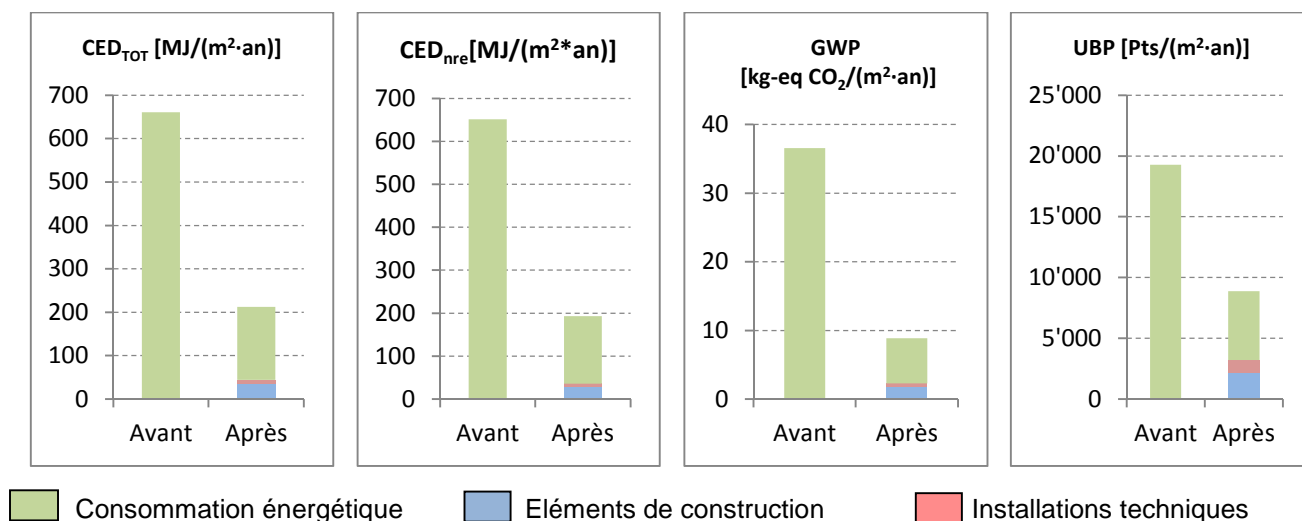


Figure 2: Ecobilan avant et après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT}, CED_{NRE}, GWP et UBP

Cette figure montre que, quel que soit l'indicateur observé, la rénovation a permis de réduire considérablement l'impact environnemental du bâtiment ; cette diminution varie entre un facteur 2 (UBP) et un facteur 4 (GWP). Ceci est principalement dû à la réduction massive des impacts du chauffage.

Cependant, malgré la forte diminution de la consommation d'énergie du bâtiment, ce poste représente toujours une part importante des impacts totaux (entre 63 et 81% des impacts environnementaux selon l'indicateur observé). Les impacts liés aux nouvelles installations techniques (production et de distribution de chaleur et ventilation) ne sont significatifs que pour l'indicateur UBP (12% des impacts

totaux du bâtiment rénové). Pour les autres indicateurs, ils ne représentent que 4 à 6% des impacts globaux. Finalement, les matériaux ajoutés, afin d'améliorer les performances de l'enveloppe thermiques, sont responsables d'une part située entre 15 et 25% des impacts totaux.

3.3 Impacts des différentes mesures de rénovation

L'évaluation séparée des différentes mesures de rénovation sur les indicateurs permet d'évaluer la pertinence de chaque mesure de rénovation. Dans les graphiques qui suivent, le cas "après rénovation" considère une seule mesure de rénovation.

3.3.1 Rénovation de l'enveloppe

Les résultats des simulations Lesosai en mode de calcul SIA 380/1 justificatif indiquent que la rénovation de l'enveloppe thermique de ce bâtiment permet à elle seule de réduire la consommation de chauffage d'un facteur 5. La figure 3 illustre la réduction des impacts de chauffage liée à la mise en place de cette enveloppe thermique plus performante ainsi que l'impact lié à la rénovation de l'enveloppe.

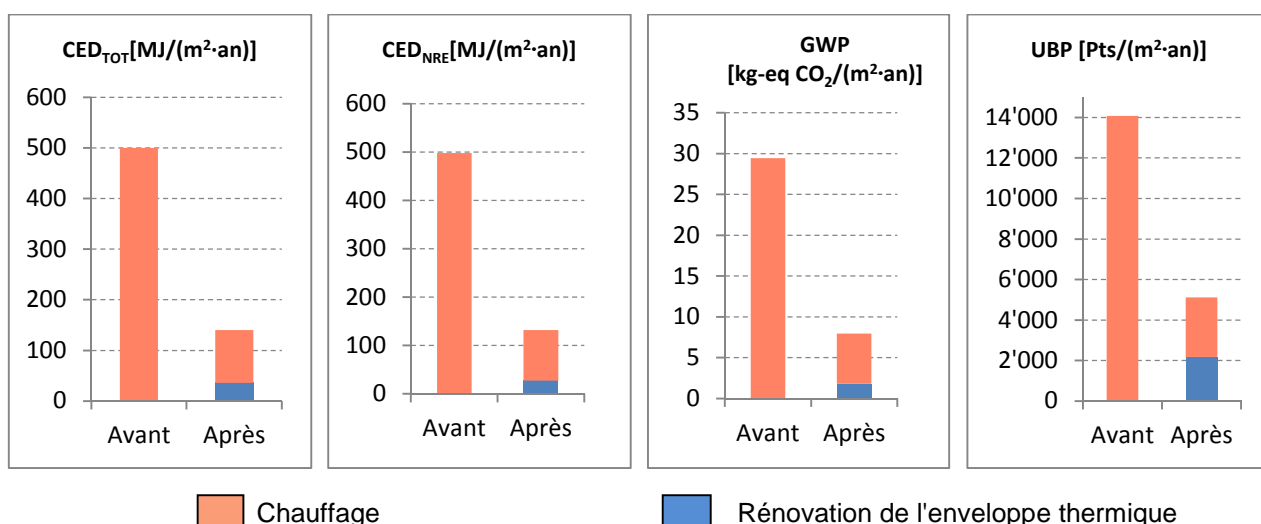


Figure 3: Rénovation de l'enveloppe – Impacts environnementaux avant et après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP

Les impacts des matériaux ajoutés sont faibles par rapport à l'économie réalisée au niveau du chauffage pour tous les indicateurs. Après rénovation, la part liée aux matériaux représente environ 30% pour les indicateurs d'énergie primaire et pour le GWP et 50% pour l'UBP.

L'amélioration des performances de l'enveloppe thermique est une excellente mesure de rénovation du point de vue environnemental.

La figure 4 donne en complément la répartition des impacts environnementaux pour chaque élément de construction de l'enveloppe (après rénovation).

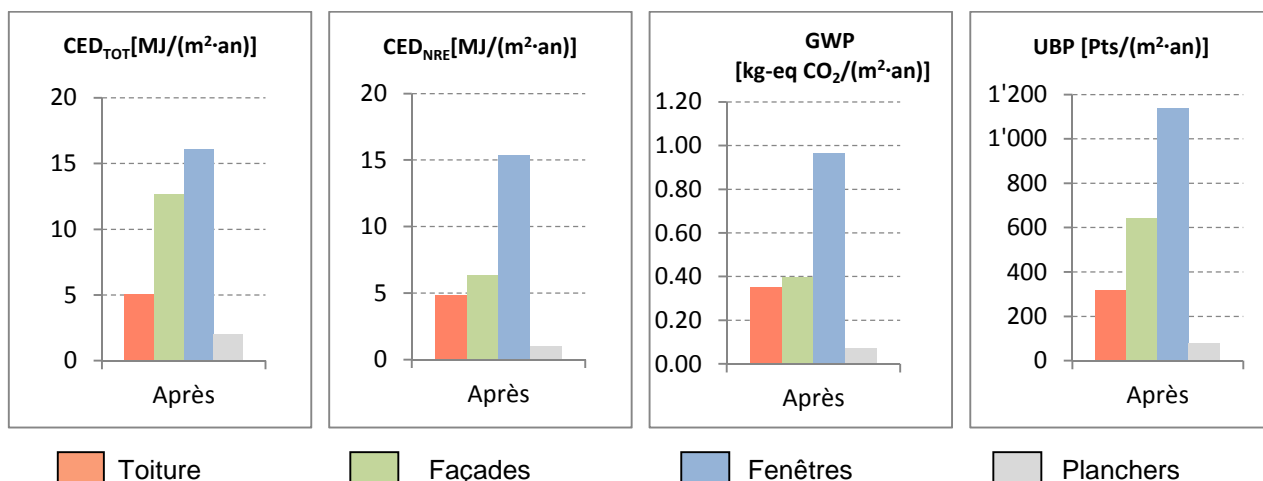


Figure 4: Impacts environnementaux des éléments de construction après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP

Les fenêtres (700 [m²]) représentent à elles seules près de la moitié des impacts des éléments rénovés (entre 43 et 55%, selon l'indicateur considéré). Cette part élevée est due en partie à la durée de vie de 20 ans pour les fenêtres. Il y aura ainsi plus de remplacement que pour la façade. La contribution des façades (1'235 [m²]) est également importante, principalement pour l'indicateur CED_{TOT} . Ceci est dû au fait que cet indicateur tient compte du potentiel énergétique des matériaux. Ainsi, le bois utilisé en façade est pénalisant pour cet indicateur.

L'impact relativement faible des planchers s'explique par la surface réduite que constituent les planchers contre l'extérieur. Les planchers du 1^{er} étage entre la zone commerciale et la zone d'habitation ainsi qu'une partie des planchers contre la zone non-chauffée ne font pas partie de la rénovation énergétique du bâtiment.

La figure 5 présente les contributions des différents matériaux de l'enveloppe thermique.

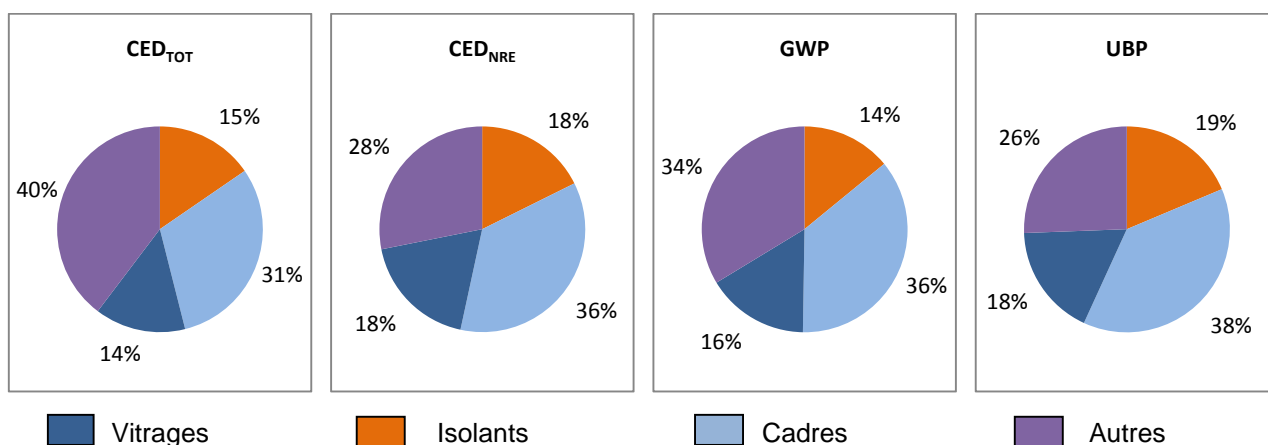


Figure 5: Répartition des matériaux de la rénovation de l'enveloppe thermique pour les quatre indicateurs CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP et UBP

Les cadres PVC des fenêtres sont responsables à eux seuls de 30 à 38% des impacts totaux de l'enveloppe selon l'indicateur considéré. Le triple vitrage génère entre 14 et 18% des impacts et la contribution des isolants (laine de pierre, laine de verre, EPS) se chiffre entre 14 et 19%.

Dans la catégorie "Autres" représentée dans la figure 5, les matériaux apportant des contributions significatives sont le verre (2 à 3%) et le carton alvéolé (5 à 10%) des éléments de façades préfabriquées, les lés d'étanchéité bitumineux (4 à 5%) ainsi que les différents bois utilisés (massif et panneaux de particules, 4 à 17%).

3.3.2 Remplacement du chauffage

Ce paragraphe traite uniquement du remplacement des systèmes de production et de distribution de chaleur sans considérer la rénovation de l'enveloppe du bâtiment. La figure 6 présente les différents impacts environnementaux avant et après modification du système de production et de distribution de chaleur.

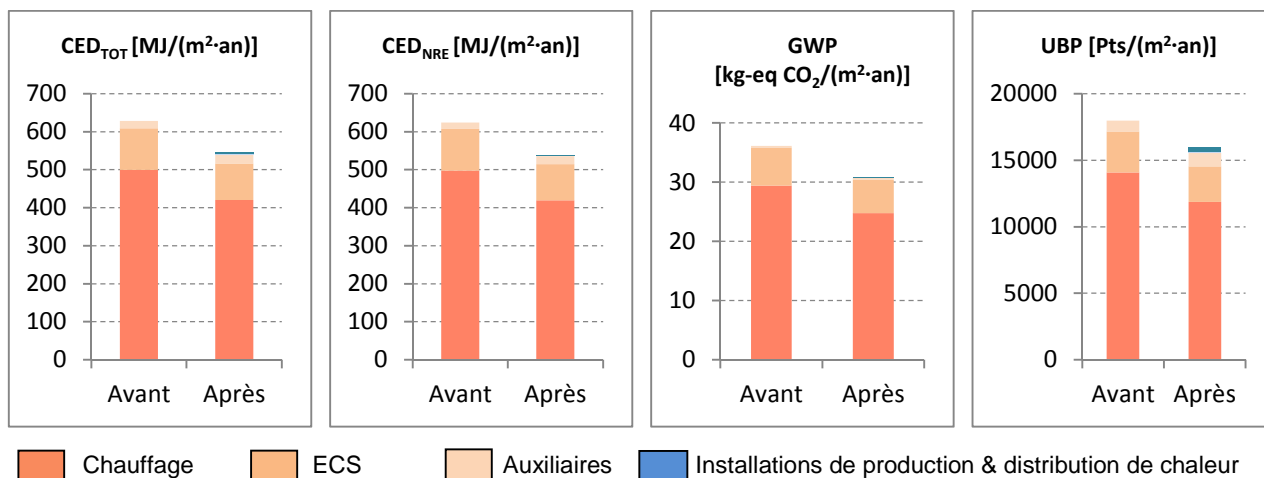


Figure 6: Remplacement du chauffage - Impacts environnementaux avant et après rénovation pour les quatre indicateurs CED_{TOT}, CED_{NRE}, GWP et UBP

La figure 6 montre que le faible impact dû aux nouvelles installations techniques ainsi qu'à l'augmentation de la consommation des auxiliaires est largement compensé par la baisse des impacts de la consommation d'énergie pour le chauffage et pour la production d'ECS. L'installation d'une chaudière à gaz moderne ayant un meilleur rendement est donc une mesure valable d'un point de vue environnemental diminuant d'environ 15% les impacts environnementaux.

Ce chapitre montre que les deux mesures de rénovation (enveloppe thermique et installation techniques) se justifient pleinement d'un point de vue environnemental.

3.4 Evaluation du bâtiment par rapport à la société à 2000 W

Il est possible de situer les performances environnementales de ce bâtiment par rapport aux valeurs indicatives du cahier technique SIA 2040 [15]. L'évaluation est découpée en trois parties distinctes :

- **Construction:** Cette phase comprend la construction du bâtiment, les remplacements et l'élimination du bâtiment en fin de vie. Elle est focalisée sur les matériaux des éléments de construction et des installations techniques. Les impacts environnementaux de cette phase sont calculés sur la base du cahier technique SIA 2032 [4].
- **Exploitation:** La phase "exploitation" est focalisée sur la consommation d'énergie du bâtiment. Les postes de consommation considérés sont la production de chaleur (chauffage et ECS), la ventilation/climatisation, l'éclairage et les équipements d'exploitation. Les impacts environnementaux de cette phase sont calculés sur la base du cahier technique SIA 2031 [16].
- **Mobilité:** Cette phase englobe la mobilité quotidienne liée à l'emplacement du bâtiment. Elle est évaluée sur la base du cahier technique SIA 2039 [17].

L'emplacement du bâtiment ne pouvant être modifié lors d'une rénovation énergétique, seules les phases "Construction" et "Exploitation" sont évaluées dans cette étude de cas.

Les valeurs indicatives ne sont données qu'à titre informatif. Seule la somme de ces trois valeurs (construction + exploitation + mobilité) constitue une limite à ne pas dépasser pour que le bâtiment soit conforme aux exigences de la société à 2000 [W].

La norme SIA 2040 se focalise sur l'évaluation de deux indicateurs : la consommation d'énergie primaire non-renouvelable (CED_{NRE}) et les émissions de gaz à effet de serre (GWP).

3.4.1 Modélisation

Le calcul réalisé précédemment pour évaluer les impacts de l'énergie consommée par le bâtiment est conforme au cahier technique SIA 2031. Seuls les facteurs d'impacts mentionnés dans l'annexe D de ce dernier diffèrent quelque peu (entre 1 et 4%) des facteurs utilisées. Nos données sources (KBOB, 7/2012) étant plus récentes que celles du CT SIA2040 (12/2008), il n'a pas été utile de les adapter.

La partie construction telle qu'elle a été évaluée dans le cadre de l'Annexe 56 n'est pas tout à fait conforme au cahier technique SIA 2032. Ce dernier, tel qu'il est actuellement appliqué dans le standard Minergie-ECO, prévoit la prise en compte de remplacements partiels de matériaux ou de systèmes techniques. Quelques différences existent également au niveau des durées de vie considérées pour certains composants du bâtiment. La plus significative concerne les fenêtres, qui ont une durée de vie de 20 ans dans le cadre de l'Annexe 56 et de 30 ans dans le cahier technique SIA 2032. Le logiciel Eco-Bat permet d'effectuer une analyse de cycle de vie selon différentes normes. Le modèle a donc été légèrement adapté afin de se conformer à ces nouveaux critères.

3.4.2 Résultats

La figure 7 présente les valeurs indicatives du cahier technique (CT) SIA 2040 ainsi que les valeurs calculées pour le bâtiment de Morges après rénovation correspondantes pour les phases considérées.

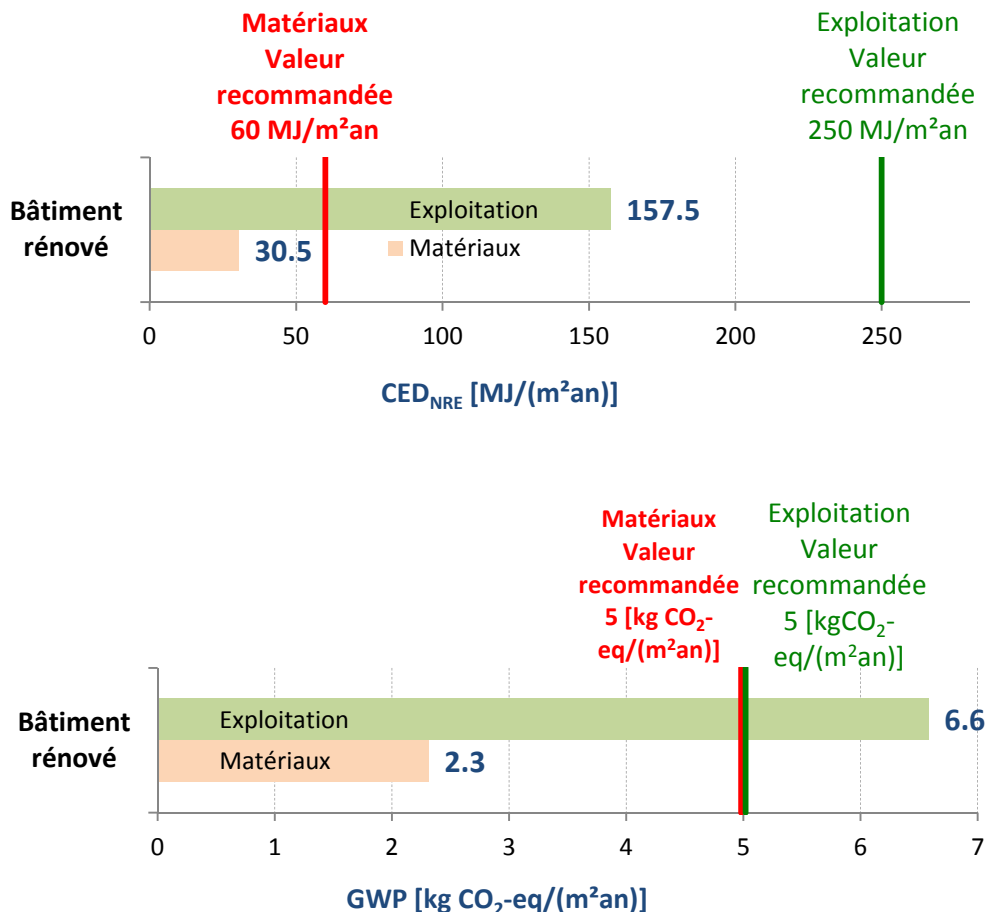


Figure 7: Evaluation des performances du bâtiment par rapport aux valeurs indicatives de la SIA 2040, CED_{NRE} en haut et GWP en bas

Les résultats de l'écobilan montrent que :

- La valeur du projet pour la phase "Construction" est inférieure à la valeur indicative tant pour le CED_{NRE} que pour le GWP. Dès lors, les choix constructifs du bâtiment semblent bons.
- La valeur du projet pour la phase "Exploitation" est inférieure à la valeur indicative pour l'indicateur CED_{NRE}. Par contre, elle est légèrement supérieure à la valeur indicative de l'indicateur GWP. Cela est dû principalement à l'utilisation du gaz comme vecteur énergétique pour la production de chaleur (chauffage et ECS).

Dans l'état actuel, c'est-à-dire sans considérer la partie mobilité, le bâtiment remplit les exigences de la société à 2000 W. Le dépassement du GWP au niveau de l'exploitation, lié au choix d'un vecteur énergétique fortement impactant au niveau des émissions de gaz à effet de serre, est compensé par le faible impact de la partie construction.

4 Retour sur investissement de la rénovation

La rénovation complète de l'immeuble d'habitations de Morges a nécessité un investissement important de la part du propriétaire. Les mesures liées aux aspects énergétiques sont évaluées à 4,4 millions de francs suisse (rénovation de l'enveloppe thermique et des installations techniques (chauffage, ECS et ventilation). En contrepartie, ces rénovations ont permis de réduire considérablement la consommation d'énergie et par suite la facture de chauffage. Ce chapitre présente le calcul permettant de définir le temps de remboursement énergétique de cette rénovation en prenant en compte le renchérissement du prix de l'énergie.

Dans cette rénovation et comme dans beaucoup d'autres (cf. [18]), il est important de mentionner que ce n'est pas le propriétaire (investisseur) qui bénéficie de la diminution de la facture de chauffage. Ce n'est qu'avec l'augmentation de la valeur du bâtiment et des loyers que l'investissement peut être rentabilisé.

4.1 Méthodologie

Les principaux paramètres pris en compte sont les suivants :

- Durée de vie du bâtiment après rénovation : 60 ans
- Remplacement des composants durant la durée de vie du bâtiment.
- Coût de l'énergie pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la ventilation et les locaux communs (éclairage des couloirs, ascenseurs, buanderie).
- La rénovation effective est comparée au cas sans rénovation.

La méthode de l'annuité [19] est utilisée pour cette analyse; l'équation (4.1) est considérée :

$$a = \frac{i \cdot (1 + i)^t}{(1 + i)^t - 1} \quad (4.1)$$

Avec :

| | | |
|-----------------|---------------------------|-------------|
| <i>a</i> | <i>facteur d'annuité</i> | <i>[-]</i> |
| <i>i</i> | <i>taux d'intérêt</i> | <i>[-]</i> |
| <i>t</i> | <i>durée de l'emprunt</i> | <i>[an]</i> |

L'annuité est calculée en faisant la somme des annuités des différents éléments de rénovation. L'équation (4.2) présente le principe de calcul de l'annuité globale :

$$A = \sum_{j=1}^{j=\text{nbr d'élément}} \text{Inv}_j \cdot a_j \quad (4.2)$$

Avec :

| | | |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <i>A</i> | <i>annuité globale</i> | <i>[CHF/an]</i> |
| <i>Inv_j</i> | <i>Investissement de l'élément j considéré</i> | <i>[CHF]</i> |
| <i>a_j</i> | <i>facteur d'annuité sur la base de la durée de vie de l'élément j considéré</i> | <i>[-]</i> |

En utilisant cette méthode de l'annuité, aucune valeur financière résiduelle n'est prise en compte à la fin de la durée d'analyse.

4.1.1 Hypothèses et données d'entrée

Pour le calcul de l'annuité liée à l'emprunt, certaines hypothèses ont été faites :

- L'ensemble des coûts d'investissement ont été fournis par le promoteur du projet (coûts réels).
- L'investissement se base uniquement sur les dépenses de la rénovation ayant une influence sur les performances énergétiques du bâtiment.
- Les subventions du "programme Bâtiments [20]" et de Minergie®-P du canton de Vaud sont comptabilisées dans l'étude (à savoir 100'000 + 250'000 = 350'000 [CHF]).
- Les déductions fiscales ne sont pas prises en compte.
- L'augmentation annuelle du coût de l'énergie basé sur SIA 480 [19]. Une étude de sensibilité sur ce paramètre est présentée (cf. chapitre 4.3).
- Taux d'intérêt de l'emprunt : 3% (taux effectif en vigueur en 2010 lors des travaux de rénovation).
- Durées de vie des installations techniques et de l'enveloppe selon méthodologie de l'Annexe 56 (cf. 2.4.1).
- Durée de l'emprunt : selon la durée de vie de l'élément considéré.
- L'entretien n'est pas pris en compte dans le calcul car il est admis qu'il y en aurait un que le bâtiment soit rénové ou pas.
- Les coûts externes ne sont pas pris en compte car ils n'interviennent pas dans le calcul du temps de remboursement financier.
- L'ensemble des prix sont donnés TTC.
- Années utilisées comme bases de calcul des prix de l'énergie : 2010 (avant rénovation) : 2012 (après rénovation)
- Contrairement à la méthodologie de l'annexe 56 pour les aspects environnementaux, un nombre fractionnaire de remplacements est admis dans les calculs financiers.

4.2 Investissements

Ce chapitre présente les paramètres utilisés pour le calcul des coûts à savoir, les investissements liés à la rénovation, la consommation énergétique du bâtiment ainsi que le coût des vecteurs énergétiques (gaz et électricité).

4.2.1 Investissements liés à la rénovation

La rénovation de l'enveloppe du bâtiment englobe la rénovation des façades, des planchers, des toitures et des fenêtres comme décrit dans le chapitre 2.2.1. La rénovation des installations techniques comprend la production et la distribution de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire (ECS) et l'installation de ventilation.

Les coûts imputables à l'investissement de chacun des composants sont résumés dans le tableau 16.

| Composants | Investissement | | |
|----------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Coût total [CHF] | Coût par unité de surface d'élément [CHF/m²] | Coût par unité de surface énergétique [CHF/m²A _E] (A _E =4'836 [m²]) |
| Chauffage (production et distribution) | 991'700 | - | 205 |
| ECS (production et distribution) | 1'025'000 | - | 212 |
| Ventilation | 275'800 | - | 57 |
| Toitures | 472'500 | 430 | 98 |
| Façades | 728'600 | 590 | 151 |
| Fenêtres | 838'800 | 1'200 | 173 |
| Planchers | 72'700 | 430 | 15 |
| Total | 4'405'100 | | 911 |

Tableau 16 : Investissement de la rénovation lié à la performance énergétique du bâtiment (prix TTC)

4.3 Temps de remboursement financier – Résultats et analyses

Le retour sur investissement est calculé sur la base des hypothèses (cf chapitre 4.1.1) et des coûts réels présentés au chapitre précédent.

Plusieurs paramètres peuvent varier comme :

- le taux d'intérêt
- le taux d'inflation
- le prix de l'énergie

Les taux d'intérêt et le taux d'inflation évoluent généralement l'un et l'autre dans le même sens. Lorsque l'inflation s'accroît, le taux d'intérêt augmente également et inversement. Le taux d'intérêt réel est calculé avec le taux d'intérêt nominal et le taux d'inflation selon la formule (4.3) :

$$i_r = \frac{1 + i_n}{1 + infl} - 1 \quad (4.3)$$

Avec :

| | | |
|-----------------------------|-------------------------------|------------|
| <i>i_r</i> | <i>Taux d'intérêt réel</i> | <i>[-]</i> |
| <i>i_n</i> | <i>Taux d'intérêt nominal</i> | <i>[-]</i> |
| <i>infl</i> | <i>Taux d'inflation</i> | <i>[-]</i> |

Entre 2010 et 2012, l'inflation moyenne était proche de zéro. Pour cette étude, le taux d'intérêt réel est choisi à 3% comme le taux nominal.

La figure 8 illustre la méthode pour la détermination du temps de remboursement qui correspond à l'intersection entre la courbe des annuités cumulées et la courbe de l'économie financière liée aux

économies d'énergie. Cette représentation est basée sur les taux présentés ci-dessus et sur des augmentations des coûts de l'énergie selon la norme SIA 480.

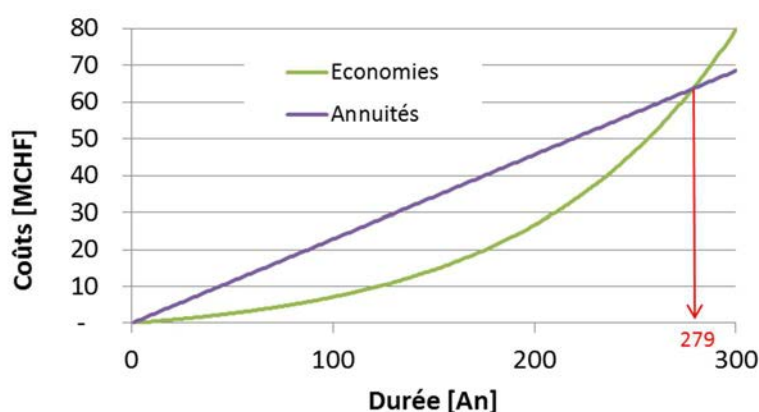


Figure 8 : Détermination du temps de remboursement de la rénovation du bâtiment de Morges avec les valeurs de base

Ce graphique montre que le temps de remboursement financier pour la rénovation énergétique du bâtiment de Morges est de 279 ans (flèche rouge) en prenant pour hypothèse l'augmentation de l'énergie selon la norme SIA 480. Cette valeur, largement supérieure aux 60 ans de l'étude, suggère qu'après cette période, les annuités restent identiques car d'autres rénovations sont effectuées selon les durées de vie des éléments. A l'échelle de la construction actuelle, cette durée de 279 ans est très élevée et est supérieure à la durée de vie du bâtiment. Du point de vue financier, la rénovation énergétique ne peut se justifier. Cependant, ce calcul reste dépendant de l'augmentation du coût de l'énergie et peut sensiblement changer selon les hypothèses admises. Le paragraphe suivant traite de la sensibilité de l'augmentation du prix de l'énergie sur le temps de remboursement.

Il est impossible de prédire le prix de l'énergie sur la durée de l'étude. En effet, son évolution est dépendante, entre autres, des découvertes énergétiques, des avancées technologiques et des événements économiques ou géopolitiques. L'augmentation du coût de l'énergie est analysée dans une plage de 0 à 7,5% d'augmentation par année¹.

La figure 9 illustre l'augmentation du prix de gaz sur une durée de vie de bâtiment de 60 ans avec différentes augmentations du prix de l'énergie. A titre de comparaison, entre 2006 et 2014, le gaz et l'électricité ont subi respectivement une augmentation annuelle d'environ 2,5% (courbe rouge) et 3% [21]. La courbe en pointillés représente l'augmentation du prix du gaz selon la norme SIA 480.

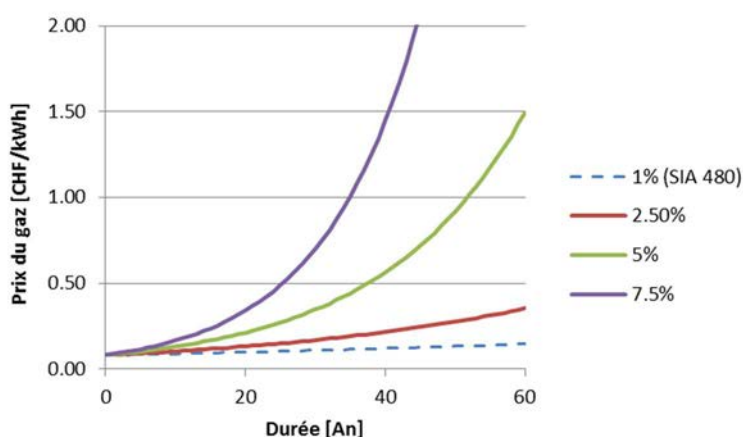


Figure 9 : Evolution du prix du gaz pour différents taux annuel d'augmentation (valeur initiale : 8 cts/kWh)

¹ Selon SIA 480 : augmentation du coût de l'énergie pour :
Gaz : 1%
Electricité : 0%

La figure 9 montre l'importance de l'augmentation du prix de l'énergie et préfigure de l'influence que ce paramètre a sur le temps de remboursement énergétique comme le montre la figure 10.

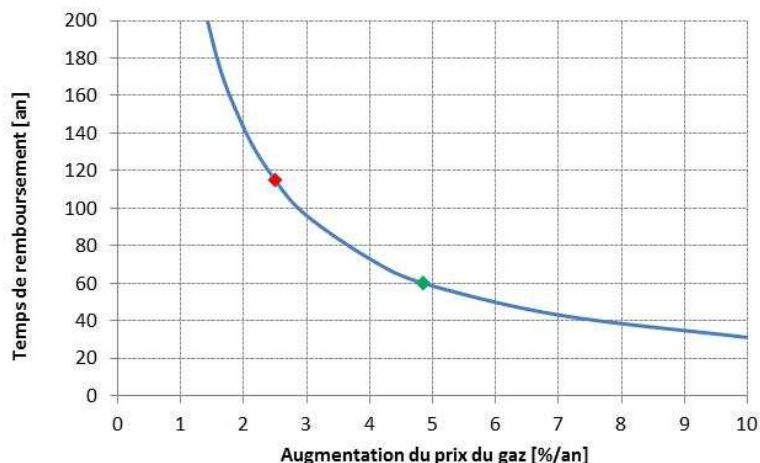


Figure 10 : Evolution du temps de remboursement énergétique en fonction du taux annuel d'augmentation du prix du gaz (taux d'augmentation de l'électricité fixé à 0%).

La figure 10 est définie avec un taux d'augmentation de l'énergie électrique de 0%. Il est raisonnable de penser qu'une augmentation du prix du gaz entraînerait également une augmentation du prix de l'électricité. Cependant, dans le cadre de cette analyse, la faible variation de la consommation d'électricité par rapport à celle du gaz (env. 1%) génère une très faible influence de ce paramètre dans l'analyse et dans les résultats.

Trois valeurs de temps de remboursement peuvent être retenues :

- 1) Selon la norme SIA 480, l'augmentation du coût de l'énergie pour le gaz et l'électricité sont respectivement de 1 et 0% par an. Avec ces données, il faudrait 279 [ans] pour rentabiliser l'investissement par les économies d'énergie.
- 2) Selon le rapport OFEN "Evolution des marchés des énergies fossiles" [21], le gaz a augmenté de 2,5% par an entre 2006 et 2014 (point rouge sur la courbe). Dans ce cas, il faudrait 115 ans pour obtenir le remboursement de la rénovation par les économies d'énergie.
- 3) Si l'objectif est d'effectuer le remboursement de l'investissement sur la durée de l'étude (60 ans), alors il faudrait que le taux d'augmentation du prix du gaz soit de 4,85% par an (point vert). Un tel taux n'a, à ce jour, jamais été observé sur une telle période.

Il est à noter que pour cette rénovation, lorsque que l'augmentation du prix de l'énergie est égale à 0%, le temps de remboursement financier tend vers l'infini.

En conclusion à ce chapitre, une analyse est présentée par rapport à l'influence du taux d'emprunt de l'argent. Ce paramètre peut varier selon les négociations avec l'organisme de financement. L'influence de la valeur de ce taux d'emprunt sur le temps de remboursement est présentée à la figure 11. Le taux de référence choisi pour cette étude est de 3%, point rouge sur la courbe.

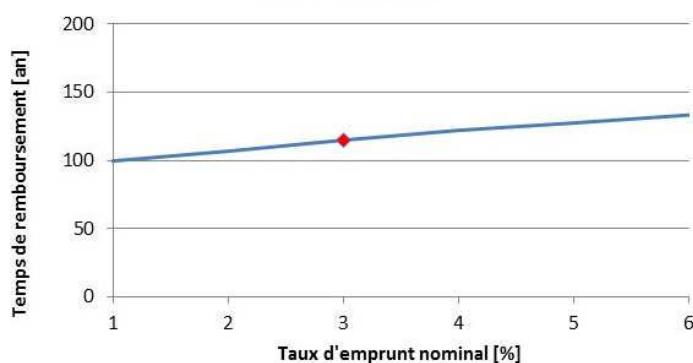


Figure 11 : Evolution du temps de remboursement énergétique en fonction du taux d'emprunt nominal

En faisant varier le taux nominal de 1 à 6%, le temps de remboursement financier varie de 100 à 134 ans. Cette influence est faible en comparaison de celle liée à l'augmentation de l'énergie (figure 10) et n'a que peu de répercussion sur l'analyse financière de ce bâtiment.

4.4 Part financière des différents éléments

Une comparaison des dépenses financières avant et après rénovation permet de voir instantanément si l'investissement sera remboursé sur la période de l'étude. La figure 12 présente la part financière liée à chaque élément de la rénovation et à la consommation d'énergie avant et après rénovation pour trois taux d'augmentation du coût de l'énergie différents (1, 2,5 et 4,85%). Le taux de 1% est donné selon la norme SIA 480, celui de 2.5 % correspond au taux observé entre 2006 à 2014, alors que le taux de 4.85% assure un temps de remboursement de l'investissement sur les 60 ans de l'étude. Le taux annuel d'emprunt considéré est de 3%.

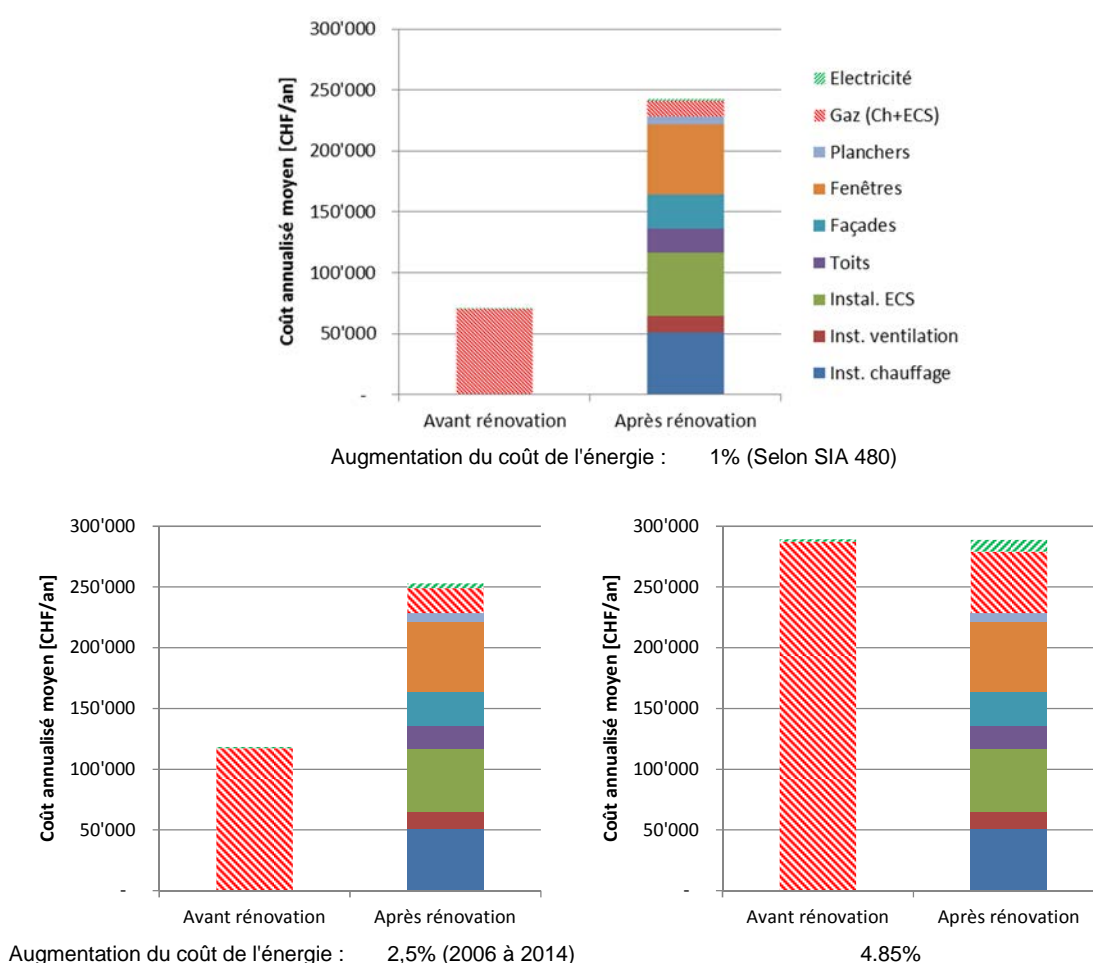


Figure 12 : Parts financières annuelles liées aux différents éléments de la rénovation et à la consommation énergétique, en haut avec augmentation du coût de l'énergie de 1%, à gauche de 2.5 % et à droite 4.85 %

Ces graphiques montrent, que d'un point de vue financier, les coûts engendrés par la rénovation énergétique du bâtiment de Morges ne peuvent pas être absorbés par l'économie d'énergie résultant de la rénovation dès l'instant que l'augmentation du coût de l'énergie reste au-dessous d'environ 5 % par an. Avec le scénario selon SIA 480, le coût annualisé pour la rénovation et la consommation énergétique est plus de trois fois supérieur au coût avant rénovation alors qu'il est deux fois plus grand avec une augmentation du coût de l'énergie de 2.5 %, ceci malgré la conséquente diminution

de la consommation d'énergie de chauffage. Par contre, cette radicale diminution de la consommation d'énergie rend le bâtiment beaucoup moins tributaire des fluctuations de prix de l'énergie.

Par rapport aux investissements, plusieurs points peuvent être relevés :

- Le plancher représente une faible part des coûts d'investissement (env. 2% du total annuel) car l'immeuble étudié est situé sur un centre commercial. Seules les parties du plancher donnant sur l'extérieur et une partie de celles sur zone non-chauffée ont été rénovées.
- La rénovation des installations techniques pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire représentent une part importante du montant annuel total (42%). En effet, en plus des coûts de remplacement de la nouvelle chaudière, des travaux conséquents ont été entrepris à l'intérieur des appartements pour recréer une nouvelle distribution adaptée au bâtiment rénové.
- La part dévolue aux remplacements des fenêtres est conséquente (22%). Comme pour le chapitre 3 "Écobilan de la rénovation", la durée de vie des fenêtres est considérée à 20 ans au lieu de 40 ans pour la façade. De ce fait, il y aura plus de rénovation des fenêtres entraînant des coûts additionnels. En y additionnant les coûts liés aux façades, c'est environ 34 % du coût total annuel qui est dédié à cet élément central de la rénovation.

Finalement et pour conclure ce chapitre financier, il est rappelé que dans cet immeuble fonctionnant sur le modèle de locations, c'est l'utilisateur (locataire) et non le propriétaire qui paye la facture liée aux consommations énergétiques. Ainsi, le propriétaire ne peut pas attendre un retour sur investissement basé sur les économies réalisées grâce aux mesures d'assainissement du bâtiment. Dans ce cas, la rentabilisation financière est calculée sur la base d'une augmentation des loyers correspond à environ +20% par m² de surface habitable. Malgré cette augmentation. Le niveau des loyers de cet immeuble se situe dans les prix du marché de la ville de Morges. En plus des aspects énergétiques, cette rénovation offre aux locataires des appartements neufs et plus confortables que par le passé (qualité de l'air et protection phonique contre l'extérieur).

5 Conclusion

Le travail effectué dans le cadre de ce projet a permis de compléter l'étude précédemment réalisée qui portait sur les performances énergétiques d'un bâtiment rénové à Morges [1]. Cette dernière avait démontré que la rénovation de l'enveloppe et des installations techniques permettait de diminuer d'une façon très importante la consommation de gaz du bâtiment, en particulier celle vouée au chauffage. Le présent rapport a pour but de valider le bien fondé des solutions techniques utilisées selon des critères environnementaux et financiers.

Les impacts environnementaux ont été réduits entre 65 et 75% malgré l'apport de matériaux supplémentaires (enveloppe et installations techniques). En effet, la part de ces matériaux reste très faible en comparaison des gains énergétiques. Une fois la rénovation réalisée et selon l'indicateur choisi, l'impact de ces matériaux représente entre 20 et 50% de la consommation totale d'énergie, d'où l'intérêt d'utiliser des matériaux ayant un impact le plus faible possible. Le remplacement et l'ajout d'installations techniques, comme le remplacement de la chaudière et la distribution de chaleur permettent de diminuer les impacts environnementaux d'environ 15% par rapport au bâtiment sans rénovation.

La comparaison des valeurs environnementales de ce bâtiment obtenues après rénovation avec les valeurs indicatives fournies par le cahier technique SIA 2040 [15] montre que la valeur du projet pour la phase "Construction" est inférieure pour le CED_{NRE} et pour le GWP; les solutions constructives du bâtiment sont bonnes. Par contre, la comparaison de ces valeurs pour la phase "Exploitation" indique que la valeur du bâtiment obtenue pour l'indicateur GWP est légèrement supérieure à la valeur indicative recommandée. L'utilisation du gaz comme vecteur énergétique permet d'expliquer ce résultat. L'indicateur CED_{NRE} étant inférieure à la valeur recommandée.

D'une façon globale, et sans considérer la partie mobilité, le bâtiment remplit les exigences de la société à 2000 W. Le dépassement du GWP au niveau de l'exploitation est compensé par le faible impact de la partie construction.

L'analyse financière de cette rénovation énergétique présente des conclusions plus contrastées. Une première analyse du temps de remboursement financier de la rénovation, basée sur les taux d'augmentation du coût de l'énergie fournie par la SIA, montre que ce temps de remboursement se situe au-delà de 250 ans. Cette durée ne pouvant satisfaire aucun investisseur. Une analyse de sensibilité sur le taux d'augmentation du coût de l'énergie montre que si ce taux passe à 2.5% (pour le gaz), le temps de remboursement descend à 115 ans alors qu'il devrait atteindre 4.85% pour être égal à la durée de l'étude (60 ans). Il est à noter que sur une période de 60 ans il n'a jamais été observé un tel taux d'augmentation de l'énergie. Ainsi, il est démontré que malgré la conséquente économie d'énergie réalisée grâce à la rénovation de l'enveloppe et des installations techniques, le remboursement de l'investissement n'est pas envisageable sur une durée réaliste. Il faudrait que le coût des vecteurs énergétique augmente d'une façon conséquente pour pouvoir amortir les investissements liés à la rénovation énergétique.

Ainsi, selon le modèle d'habitation (propriétaire (PPE) ou locataire), les aspects de remboursement financiers d'un tel investissement doivent être abordés différemment. Dans le cas où le propriétaire habite son logement, le remboursement devra être réalisé grâce aux économies d'énergie alors que dans le modèle locatif, l'investisseur pourra envisager un remboursement en demandant une augmentation de loyer. Dans le cas présent, c'est une augmentation de l'ordre de +20% par m² de surface habitable qui a été effectuée sur les locations, valeur permettant d'offrir des appartements dans les prix du marché et permettant à l'investisseur d'amortir les dépenses liées à la rénovation.

En conclusion, cette étude a montré que la rénovation énergétique d'un immeuble d'habitations tel que celui de Morges permet d'apporter un gain très important d'un point de vu énergétique et environnemental. Cependant, l'aspect financier doit être considéré de telle façon que, dans l'état actuel des prix de l'énergie, il est illusoire de compter sur le remboursement des investissements sur des durées raisonnables grâce aux économies d'énergie réalisées. Dans cet immeuble, le remboursement est néanmoins possible au travers d'une augmentation des loyers des locataires.

6 Remerciements

Nous tenons ici à remercier particulièrement l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) pour le financement de ce projet.

7 Références

- [1] S. Citherlet, J. Bony, and O. George, "Projet Reno-HP, Installation technique décentralisée pour la rénovation à haute performance," 2011.
- [2] "SIA 380/1 - L'énergie thermique dans le bâtiment," 2009.
- [3] W. Ott, R. Bolliger, V. Ritter, S. Citherlet., D. Favre, S. Lasvaux, B. Périsset, M. de Almeida, and F. Marco, "Methodology for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56)," 2015.
- [4] "SIA 2032 - L'énergie grise des bâtiments." 2010.
- [5] Minergie, *Manuel pour le calcul de l'énergie grise des bâtiments Minergie-A, minergie-ECO, Minergie-P-ECO et Minergie-A-ECO.* .
- [6] "EN 15978 - Evaluation de la performance environnementale des bâtiments - méthode de calcul." 2002.
- [7] "LESOSAI 7, certifications et bilans écologiques et énergétiques de bâtiments." .
- [8] S. Citherlet, J. Bony, and O. Georges, "Projet Reno-HP, Installation technique décentralisée pour la rénovation à haute performance de bâtiments." 2011.
- [9] M. Richard, "Analyse énergétique et environnementale de la rénovation à hautes performances du bâtiment d'habitation 'Les Charpentiers' à Morges."
- [10] D. Favre and S. Citherlet, "Eco-Bat: A design tool for assessing environmental impacts of buildings and equipment," *Build. Simul. - An Int. J.*, vol. 1, no. 1, pp. 83–94, 2008.
- [11] "Données des écobilans dans la construction, KBOB," 2012.
- [12] "Base de données ECOINVENT, v2.2." .
- [13] Stadt Zürich, "B. & H. AG, Ökologische Bewertung von Gebäudetechnikanlagen für SIA 2032." 2008.
- [14] BAFU, "B. f. Umweltchemie, Ökobilanzdaten von Bodenbelägen." 2012.
- [15] "SIA 2040 - La voie SIA vers l'efficacité énergétique." 2011.
- [16] "SIA 2031 - Certificat énergétique des bâtiments." 2008.
- [17] "SIA 2039 - Mobilité - Consommation énergétique des bâtiments en fonction de leur localisation." 2011.
- [18] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - PARTIE F - WP3.3b : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique - Étude de cas : Habitat collectif," 2015.
- [19] "SIA 480 - Calcul de rentabilité pour les investissement dans le bâtiment." 2004.

- [20] "<http://www.dasgebaeudeprogramm.ch/index.php/fr/le-programme-batiments/objectifs-du-programme-batiments>," 2015. .
- [21] V.-O. Beuret, "Evolution des marchés des énergies fossiles 3 / 2014," vol. 2014. 2014.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Projet ECO-Reno - Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation

PARTIE C

WP2 : Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations

Résumé

Le travail présenté dans ce rapport correspond à la deuxième partie du projet ECO-Reno "Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation" et se concentre sur la détermination des couples optimaux *isolant/système de chauffage* permettant de minimiser les impacts environnementaux et les coûts combinés entre l'isolation et la consommation d'énergie nécessaire au chauffage. La particularité de ce travail réside dans la prise en compte, au plus précis, des contraintes réelles liées à la pose d'isolation.

Après avoir défini et validé une méthodologie simplifiée permettant de calculer l'épaisseur optimale d'isolation (EOI), un cas d'application comprenant l'étude de quatre éléments de construction (deux types de façade et deux types de toiture) associés à cinq systèmes de chauffage différents (électricité, gaz, mazout, pompe à chaleur air-eau (PAC AE) et pellets) a été défini. L'analyse a été menée sur des indicateurs de coûts et d'impact environnemental. Les résultats montrent que les EOI financières sont généralement plus faibles que les EOI environnementales. Ce cas d'application a permis de déterminer différents couples *isolant/système de chauffage* aux EOI correspondantes par éléments de construction. Les résultats montrent que ces couples diffèrent selon l'indicateur évalué. Pour tous les éléments et isolants analysés, le chauffage par PAC AE et par électricité directe sont les systèmes les plus économiques financièrement tandis que le chauffage à pellets est le système le moins consommateur d'énergie non renouvelable (CED_{NRE}), la PAC AE et le chauffage à pellets restant les moins émetteurs de gaz à effet de serre (GWP) alors que seule la PAC AE reste le système le moins consommateur d'énergie primaire totale (CED_{TOT}).

Des analyses de sensibilité ont ensuite permis de montrer l'influence de différents paramètres sur les valeurs des EOI comme le climat, les subventions ou l'évolution des coûts de l'énergie.

Finalement, une comparaison des résultats de cette étude avec des calculs d'épaisseurs d'isolants selon les normes et les labels énergétiques actuels a montré la pertinence de l'approche par EOI pour déterminer des solutions à moindre coût et à moindre impact. Ce dernier point a également mis en évidence que le respect des normes actuellement en vigueur engendre systématiquement un surcoût financier et environnemental sur la durée de vie du bâtiment alors que la pose d'épaisseur permettant de satisfaire au label Minergie-P® permet d'être, en général, proche des optimums financiers et environnementaux.

Abstract

This report presents the results of the second work package of the ECO-Reno project entitled, "Low environmental impact renovation for residential buildings". It aims at determining the optimal correspondence set between *insulation materials and heating systems* in order to minimize the associated environmental impacts and costs. The particular feature about this study is that it takes into account the real constraints linked to insulation installation.

Following the definition and validation of a simplified methodology allowing to calculate the optimal insulation thickness (OIT), a case study gathering four construction elements (two types of facades and two types of roofs) associated to five different heating systems (electricity, natural gas, oil, air-water heat pump and pellets) was defined. The analysis was performed for both cost and environmental impact indicators.

Overall results show that financial OIT is lower than environmental OIT. The case study have allowed to determine, for each construction element, the correspondent OIT for different pairs of *insulation materials and heating systems*. The corresponding pairs depend on the evaluated indicator. For all elements and insulation materials, the heat pump and the electricity heating are the most economical heating systems whereas the pellet system results in lower non-renewable primary energy (CED_{NRE}) consumption. The heat pump and the pellet system also present the lower greenhouse gas emissions (GWP) and the heat pump shows the lower primary energy (CED_{TOT}) consumption. In addition, sensitivity analyses have showed the influence of key parameters on the OIT values e.g. climate, subsidy or the evolution of energy costs. Finally, a comparison between these results and insulation thickness calculations based on current energy labels and standards, showed the relevance of the OIT approach to determine optimal cost and environmental solutions. It was shown that current standards systematically lead to higher economic and environmental costs over the service life of the building whereas complying with the Minergie-P® insulation thickness recommendation generally results in values closer to the financial and environmental OIT.

Table des matières

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RÉSUMÉ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| TABLE DES MATIÈRES | 5 |
| LISTE D'ABRÉVIATIONS | 7 |
| LISTE DES FIGURES | 8 |
| LISTE DES TABLEAUX | 11 |
| 1 OBJECTIF DU TRAVAIL..... | 12 |
| 2 INTRODUCTION..... | 12 |
| 3 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE | 14 |
| 4 MÉTHODOLOGIE..... | 16 |
| 4.1 Contribution liée au matériau | 17 |
| 4.1.1 Analyse financière | 17 |
| 4.1.2 Analyse environnementale | 17 |
| 4.2 Contribution liée à l'énergie de chauffage | 18 |
| 4.2.1 Analyse financière | 18 |
| 4.2.2 Analyse environnementale | 18 |
| 5 PRISE EN COMPTE DES APPORTS DE CHALEUR UTILE DANS LE CALCUL DES ÉPAISSEURS OPTIMALES D'ISOLATION | 19 |
| 5.1 Rappels concernant le transfert de chaleur par déperditions thermiques au travers d'un élément opaque | 19 |
| 5.1.1 Détermination des déperditions thermiques au travers un élément de construction | 19 |
| 5.1.2 Eléments homogènes | 20 |
| 5.1.3 Eléments inhomogènes | 20 |
| 5.1.4 Ponts thermiques | 20 |
| 5.1.5 Détermination des pertes par transmission au travers d'un élément | 21 |
| 5.2 Facteur d'utilisation des gains solaires et des gains internes | 21 |
| 5.2.1 Apports d'énergie solaire par les parois et les toitures | 25 |
| 5.2.2 Considérations sur la différence de température entrant dans le calcul des déperditions | 25 |
| 5.2.3 Validation de la méthodologie simplifiée | 27 |
| 6 APPROCHES MATHÉMATIQUES POUR LE CALCUL DES ÉPAISSEURS OPTIMALES D'ISOLATION (EOI)..... | 28 |
| 6.1 Coût financier | 28 |
| 6.1.1 Equation générale | 28 |
| 6.1.1 Optimum financier de l'épaisseur d'isolation | 30 |
| 6.2 Impact environnemental | 32 |
| 6.2.1 Equation générale | 32 |
| 6.2.2 Optimum environnemental de l'épaisseur d'isolation | 34 |
| 7 CAS D'APPLICATION : HYPOTHÈSES | 35 |
| 7.1 Paramètres d'entrée | 35 |
| 7.1.1 Type de bâtiment | 35 |
| 7.1.2 Climat | 35 |
| 7.1.3 Vecteur énergétique | 35 |
| 7.1.4 Durée de vie de l'élément | 37 |
| 7.1.5 Eléments de fixation | 37 |

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 7.1.6 | Eléments de construction | 38 |
| 7.1.7 | Coefficient κ | 48 |
| 7.1.8 | Indicateurs considérés | 49 |
| 8 | CAS D'APPLICATION: RÉSULTATS ET ANALYSES..... | 50 |
| 8.1 | Données de base pour la lecture des graphiques de résultats | 50 |
| 8.1.1 | Mode de représentation des EOI par isolant et par vecteur énergétique | 50 |
| 8.1.2 | Modes de représentation des EOI des couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 52 |
| 8.1.3 | Modes de représentation des coûts ou impacts environnementaux optimaux | 54 |
| 8.2 | Résultats détaillés par élément de construction | 55 |
| 8.2.1 | Façade compacte | 55 |
| 8.2.2 | Façade ventilée | 58 |
| 8.2.3 | Toiture plate | 61 |
| 8.2.4 | Toiture inclinée | 63 |
| 8.3 | Synthèse des couples <i>isolant/système de chauffage</i> optimaux pour l'ensemble des éléments de construction | 66 |
| 9 | DISCUSSIONS ET INTERPRÉTATIONS | 68 |
| 9.1 | Sensibilité des paramètres du modèle sur les EOI | 68 |
| 9.1.1 | Climat | 68 |
| 9.1.2 | Durée de vie | 70 |
| 9.1.3 | Doubléments d'épaisseurs lors de la mise en œuvre | 70 |
| 9.1.4 | Subventions allouées aux travaux de rénovations | 71 |
| 9.1.5 | Autres analyses de sensibilité | 74 |
| 9.1.6 | Synthèse de l'influence des paramètres du modèle sur les EOI | 75 |
| 9.2 | Robustesse des couples optimaux | 76 |
| 9.2.1 | Evolution des coûts de l'énergie et des performances des systèmes de chauffage | 76 |
| 9.2.2 | Coûts de l'énergie en fonction du type de rénovation | 77 |
| 9.2.3 | Evolution des valeurs d'impacts environnementaux de la base KBOB | 78 |
| 9.2.4 | Précision des données de durée de vie par isolant | 79 |
| 9.3 | Comparaison de l'approche par EOI par rapport aux normes et labels en vigueur | 81 |
| 10 | CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES | 85 |
| 10.1 | Conclusions | 85 |
| 10.2 | Perspectives | 85 |
| 11 | REMERCIEMENTS..... | 86 |
| 12 | RÉFÉRENCES | 86 |
| 13 | ANNEXES..... | 89 |

Liste d'abréviations

| | | |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| AE | Air-eau | [-] |
| a_{pr} | Facteur d'annuité réel | [-] |
| CAD | Système de chauffage à distance | [-] |
| CED_{NRE} | Energie primaire non-renouvelable | [MJ] |
| CED_{TOT} | Energie primaire totale | [MJ] |
| DJ | Degré-jour | [K·j] |
| D_v | Durée de vie | [an] |
| e | Epaisseur | [m], [cm] |
| EOI | Epaisseur optimale d'isolation | [cm] |
| e_{opt} | Epaisseur optimale | [m], [cm] |
| F_{fixe} | Frais fixes liés à la pose de l'isolation | [Frs] |
| F_{isol} | Prix d'achat de l'isolation (fourniture et pose) | [Frs] |
| F_{nrj} | Prix de l'énergie nécessaire pour compenser les pertes thermiques | [Frs] |
| F_{mat} | Prix volumique du matériau isolant | [Frs/m ³] |
| F_{tot} | Prix total payé durant la durée de vie de l'isolant (matériau + énergie) | [Frs] |
| FI_{isol} | Facteur d'impact du matériau | [Imp/kg] |
| FI_{pose} | Facteur d'impact lié à la pose du matériau | [Imp] |
| F_{vec}^{finale} | Prix du vecteur énergétique consommé (énergie finale) | [Frs/kWh] |
| F_{vec}^{utile} | Prix du vecteur énergétique consommé (énergie utile) | [Frs/kWh] |
| GWP | Emission de gaz à effet de serre | [kgCO ₂ -eq] |
| I_{isol} | Impact de l'isolation (fourniture et pose) | [Imp] |
| I_{nrj} | Impact de l'énergie nécessaire pour compenser les pertes thermiques | [Imp] |
| I_{tot} | Impact total durant la durée de vie de l'isolant (matériau + énergie) | [Imp] |
| ir | Taux d'intérêt réel | [%] |
| κ | Coefficient intégrant le facteur d'utilisation des gains de chaleur | [-] |
| L | Longueur | [m] |
| m | Masse du matériau | [kg] |
| p | Période de calcul | [an] |
| PAC | Pompe à chaleur | [-] |
| \dot{Q} | Puissance thermique | [W] |
| Q_g | Somme des apports de chaleur (solaires et internes) | [kWh] |
| Q_h | Besoins de chaleur pour le chauffage | [kWh] |
| $Q_{h,li}$ | Besoins de chaleur pour le chauffage, valeur limite de la norme SIA 380/1 | [kWh] |
| Q_i | Apports de chaleur internes | [kWh] |
| Q_L | Somme des déperditions (par transmission et ventilation) | [kWh] |
| Q_s | Apports de chaleur solaires | [kWh] |
| Q_T | Déperditions par transmission | [kWh] |
| Q_V | Déperditions par renouvellement d'air | [kWh] |
| Q_{utile} | Energie utile pour compenser les pertes thermiques annuelles | [kWh] |
| R_{se} | Résistance superficielle externe | [m ² K/W] |
| R_{si} | Résistance superficielle interne | [m ² K/W] |
| $R_{tot-isol}$ | Résistance des matériaux autre que l'isolation | [m ² K/W] |
| S | Surface | [m ²] |
| SG | Sol-eau | [-] |
| T_{ext} | Température extérieure | [°C] |
| T_i | Température intérieur | [°C] |
| T_{nc} | Température de non-chauffage | [°C] |
| TTC | Toute taxe comprise | [-] |
| U | Coefficient de transfert thermique | [W/m ² K] |
| U' | Coefficient de transmission thermique linéique | [W/mK] |
| γ | Quotient apports/déperditions | [-] |
| λ | Coefficient de conduction du composant | [W/mK] |
| η_g | Taux d'utilisation des apports de chaleur | [-] |
| η_{prod} | Rendement de l'installation de production de chaleur | [-] |
| ρ | Masse volumique | [kg/m ³] |
| χ | Coefficient de transmission thermique ponctuel | [W/K] |

Liste des figures

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Visualisation de différents scénarios de rénovation..... | 13 |
| Figure 2: Représentation graphique de l'épaisseur optimale d'isolation (EIO)..... | 16 |
| Figure 3: Représentation graphique du coût de l'isolation..... | 17 |
| Figure 4: Visualisation des différents éléments entrants dans le bilan global d'un bâtiment selon SIA 380/1..... | 22 |
| Figure 5: Evolution du facteur d'utilisation en fonction du rapport entre les apports de chaleur et les pertes [30] pour le bâtiment analysé (à gauche : bâtiment peu vitré ; à droite : bâtiment fortement vitré)..... | 23 |
| Figure 6: Variation d'énergie liée aux déperditions (Q_T) du bâtiment par rapport aux variations d'énergie de chauffage (Q_h) pour le bâtiment analysé entre une épaisseur d'isolation de 2 et de 50 [cm]..... | 24 |
| Figure 7: Evolution des DJ annuels pour différents climats en fonction de la température de non-chauffage..... | 26 |
| Figure 8: Evolution de l'énergie de déperdition annuelle selon la méthode considérée (élément décrit dans l'annexe 2; climat de berne) | 26 |
| Figure 9: Augmentation de la valeur U d'un élément en fonction de la résistance de l'isolation liée aux fixations de l'isolation – 3 vis par m^2 [38]..... | 37 |
| Figure 10: Comparaison de la valeur U définie par U-sai et par une équation donnée par ISOVER dans la prise en compte des fixations de l'isolation – façade ventilée, laine de pierre..... | 38 |
| Figure 11: Composition de la façade compacte, tiré de [40]..... | 39 |
| Figure 12: Evolution du coefficient de transmission U pour la façade compacte en fonction de l'épaisseur d'isolant | 40 |
| Figure 13: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la façade compacte en fonction de l'épaisseur (prix HT, fourni par [35]) | 40 |
| Figure 14: Composition de la façade ventilée, à gauche vue en coupe, à droite vue de face, tiré de [41]..... | 41 |
| Figure 15: Evolution du coefficient de transmission U pour la façade ventilée en fonction de l'épaisseur d'isolant..... | 42 |
| Figure 16: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la façade ventilée en fonction de l'épaisseur (prix HT, fourni par [35]) | 43 |
| Figure 17: Composition de la toiture plate, tiré de [40] | 44 |
| Figure 18: Evolution du coefficient de transmission U pour la toiture plate en fonction de l'épaisseur d'isolant..... | 45 |
| Figure 19: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la toiture plate en fonction de l'épaisseur (prix HT, fourni par [35]) | 45 |
| Figure 20: Composition de la façade compacte, à gauche vue en coupe, à droite vue de face, tiré de [41]..... | 46 |
| Figure 21: Evolution du coefficient de transmission U pour la toiture en pente en fonction de l'épaisseur d'isolant | 47 |
| Figure 22: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la toiture en pente en fonction de l'épaisseur (prix HT, fourni par [35]) | 48 |
| Figure 23: Représentation graphique de l'EOI financière pour une façade compacte isolée avec de l'EPS (système de chauffage : PAC AE)..... | 51 |
| Figure 24: Représentation graphique de l'EOI financière pour une façade ventilée isolée avec de la laine de pierre (système de chauffage : PAC AE)..... | 51 |
| Figure 25 : Représentation graphique de l'EOI environnementale (CED_{NRE}) pour une façade compacte isolée avec de l'EPS (système de chauffage : PAC AE) | 52 |
| Figure 26 : EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une façade compacte pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 53 |
| Figure 27: EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une façade ventilée pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage..... | 53 |
| Figure 28: Coûts et impacts CED_{NRE} optimaux des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la façade compacte | 54 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 29: EOI financières et environnementales (GWP à gauche et CED _{TOT} à droite) pour une façade compacte pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 55 |
| Figure 30 : EOI financières et environnementales (CED _{NRE}) pour une façade compacte pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 55 |
| Figure 31 : Représentation graphique de l'EOI financière (à gauche) et l'EOI environnementale CED _{NRE} (à droite) pour une façade compacte isolée avec de l'EPS (système de chauffage : PAC AE) | 56 |
| Figure 32: Relations entre les EOI et les indicateurs de coûts et d'impact (CED _{NRE}) des systèmes de chauffage pour la façade compacte avec une isolation en EPS..... | 56 |
| Figure 33: Coûts et impacts GWP optimaux des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la façade compacte | 57 |
| Figure 34: Relations entre les EOI et les indicateurs de coûts et d'impacts (CED _{NRE}) des systèmes de chauffage pour la façade compacte avec une isolation en EPS..... | 58 |
| Figure 35: EOI financières et environnementales (CED _{NRE}) pour une façade ventilée pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 58 |
| Figure 36: EOI financières et environnementales (GWP) pour une façade ventilée pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 59 |
| Figure 37: Coûts totaux des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la façade ventilée | 59 |
| Figure 38: Impacts totaux (CED _{NRE}) des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la façade ventilée | 60 |
| Figure 39: Impacts totaux (GWP) des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la façade ventilée | 60 |
| Figure 40: EOI financières et environnementales (CED _{NRE}) pour une toiture plate pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 61 |
| Figure 41: EOI financières et environnementales (GWP) pour une toiture plate pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 61 |
| Figure 42: Coûts optimaux pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la toiture plate | 62 |
| Figure 43: Impacts CED _{NRE} optimaux pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la toiture plate | 62 |
| Figure 44: Impacts GWP optimaux pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la toiture plate | 62 |
| Figure 45: EOI financières et environnementales (CED _{NRE}) pour une toiture inclinée pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 63 |
| Figure 46: EOI financières et environnementales (GWP) pour une toiture inclinée pour les différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> | 63 |
| Figure 47: Coûts totaux des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la toiture inclinée | 64 |
| Figure 48: Impacts totaux (CED _{NRE}) des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la toiture inclinée | 64 |
| Figure 49: Impacts totaux (GWP) des différents couples <i>isolants/systèmes de chauffage</i> pour la toiture inclinée | 65 |
| Figure 50: Démarche pour la discussion et l'interprétation des résultats obtenus | 68 |
| Figure 51: Influence de la durée de vie des matériaux sur les EOI environnementales (CED _{NRE}) pour une façade compacte isolée avec un EPS..... | 70 |
| Figure 52: Représentation graphique des EOI financières pour une toiture inclinée isolée avec de l'EPS 150 ECO (à gauche) et de l'EPS graphité (à droite) avec un chauffage par PAC AE dans les deux cas. Les résultats sans doubléments sont présentés à milieu ; ceux avec doubléments à 20 [cm] en bas et ceux avec doubléments à l'épaisseur maximale commercialisée en haut..... | 71 |
| Figure 53: Coûts liés à l'énergie de chauffage, à l'isolation et aux subventions aux EOI pour les différents couples isolants – PAC AE pour la toiture inclinée (climat Berne, subventions VD) | 72 |
| Figure 54: EOI financières sans subvention, avec subventions et EOI environnementales (CED _{NRE}) pour une toiture inclinée et un chauffage par PAC AE..... | 73 |
| Figure 55: Représentation graphique des EOI financières pour une toiture inclinée isolée avec de l'EPS 150 ECO (en haut) et de la laine de bois (en bas), avec un chauffage par PAC AE dans les | |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| deux cas. Les résultats sans subvention sont présentés à gauche ; ceux avec subventions (VD) sont présentés à droite..... | 74 |
| Figure 56: Comparaison des impacts optimaux CED_{NRE} (à gauche) et GWP (à droite) selon la version de la base KBOB pour les couples laine de verre/PAC AE, laine de pierre/PAC AE (couple optimal avec la KBOB: 2012) pour une toiture inclinée | 79 |
| Figure 57: Impact CED_{NRE} du couple optimal (EPS 150 ECO/pellets) dans le cas de base comparé aux résultats du couple verre cellulaire/pellets pour une durée de vie de l'isolant de 30 ans et 60 ans pour la toiture plate..... | 80 |
| Figure 58: EOI financière et environnementale (CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP) avec les exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour chaque isolant de la toiture inclinée et un système de chauffage par PAC AE..... | 82 |
| Figure 59: Coûts financiers et impacts environnementaux (CED_{NRE}) aux EOI pour les différentes exigences SIA avec coûts et impacts correspondant aux exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour chaque isolant de la toiture inclinée et un système de chauffage par PAC AE | 82 |
| Figure 60: Evolution du facteur d'utilisation en fonction du rapport entre les apports de chaleur et les pertes pour le bâtiment analysé [31] | 89 |
| Figure 61: Variation d'énergie liée aux déperditions(Q_T) du bâtiment par rapport aux variations d'énergie de chauffage (Q_h) pour le bâtiment analysé [31] et entre une épaisseur d'isolation de 2 et 50 [cm]..... | 89 |

Liste des tableaux

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Analyse du taux d'utilisation des apports de chaleur dans le cas d'un bâtiment défini [27], avec une surface de fenêtre au sud de 13.7%..... | 23 |
| Tableau 2: Analyse du taux d'utilisation des apports de chaleur dans le cas d'un bâtiment défini [27], avec une surface de fenêtre au sud de 80.0%..... | 23 |
| Tableau 3: Rendement et coefficients de performance considérés pour les cinq systèmes de chauffage selon la norme SIA 2040 | 36 |
| Tableau 4: Coût du kilowattheure utile pour les cinq systèmes de chauffage | 36 |
| Tableau 5: Valeurs d'impacts considérées pour les cinq systèmes de chauffage par kilowattheure utile | 36 |
| Tableau 6: Description de la façade compacte | 39 |
| Tableau 7: Isolants considérés pour la façade compacte | 39 |
| Tableau 8: Valeurs d'impacts pour les isolants de la façade compacte [22]. | 41 |
| Tableau 9: Description de la façade ventilée | 41 |
| Tableau 10: Isolants considérés pour la façade ventilée | 42 |
| Tableau 11: Valeurs d'impacts pour les isolants de la façade ventilée [22]. | 43 |
| Tableau 12: Description de la toiture plate..... | 44 |
| Tableau 13: Isolants considérés pour la toiture plate | 44 |
| Tableau 14: Valeurs d'impacts pour les isolants considérés pour la toiture plate [22]. | 46 |
| Tableau 15: Description de la toiture en pente | 46 |
| Tableau 16: Isolants considérés pour la toiture en pente | 47 |
| Tableau 17: Valeurs d'impacts pour les isolants considérés pour la toiture en pente [22]. | 48 |
| Tableau 18: Couples <i>isolant/système de chauffage</i> optimaux et valeurs des EOI correspondantes avec fourchette de 5% entre parenthèses pour les coûts, le CED _{NRE} , le GWP et le CED _{TOT} pour les quatre éléments de construction ; les valeurs en bleu correspondent aux EOI au-delà des épaisseurs maximales de pose actuelles pour les façades et la toiture en pente..... | 66 |
| Tableau 19: Stations météo considérées et degrés jours correspondants selon SIA 2028..... | 69 |
| Tableau 20: Couples isolant/système de chauffage pour les coûts, le CED _{NRE} , le CED _{TOT} et le GWP pour les quatre éléments de construction ; les valeurs en rouge indiquent des variations positives des EOI, des coûts et des impacts ; les valeurs en vert indiquant des variations négatives..... | 69 |
| Tableau 21: Subventions accordées par m ² de façade par le canton de Vaud (VD) et le programme Bâtiments..... | 72 |
| Tableau 22: Bilan de l'évolution de l'épaisseur optimale d'isolation selon différents paramètres | 75 |
| Tableau 23: Coût du kilowattheure utile pour les cinq systèmes de chauffage avec et sans distributions | 77 |
| Tableau 24: Ecart relatifs sur les impacts des isolants entre les versions 2012 et 2014 de la base KBOB..... | 78 |
| Tableau 25: Ecart relatifs sur les impacts des systèmes de chauffage entre les versions 2012 et 2014 de la base KBOB | 78 |
| Tableau 26: Valeurs U ponctuelles maximales admises pour des éléments de construction en contact avec l'extérieur selon différents référentiels..... | 81 |
| Tableau 27: Analyse du taux d'utilisation des apports de chaleur dans le cas d'un bâtiment défini [31] | 89 |
| Tableau 28: Description de l'élément considéré dans l'analyse (sans isolation extérieure)..... | 90 |

1 Objectif du travail

Lors d'une rénovation (ou d'une construction neuve), le maître d'œuvre doit choisir un type d'isolant et fixer une épaisseur dans les différents éléments de construction de son bâtiment. Dans la pratique, ce choix est souvent lié à la valeur du coefficient de transmission thermique U que le bâtiment devra atteindre, ceci dans le but de répondre soit à la valeur limite fixée par les normes en vigueur soit afin d'atteindre un standard (par exemple : Minergie®, programme Bâtiments, etc.).

Le présent rapport présente une approche différente consistant à définir l'épaisseur du matériau isolant en recherchant les minimas financiers et environnementaux entre les coûts de l'isolant et les gains de chauffage obtenu grâce à celui-ci. L'augmentation de l'épaisseur de l'isolation engendre un accroissement du coût financier et des impacts environnementaux. Par contre, cette augmentation d'isolation induit une diminution des coûts financiers et environnementaux liés à l'énergie de chauffage épargnée. Selon le type d'isolant et le type de producteur de chaleur, il existe, pour chaque élément de construction, une épaisseur d'isolation optimale entraînant un minimum de coûts ou d'impacts environnementaux.

L'approche développée et son application à quelques éléments de construction sont présentées dans le présent rapport (WP2).

2 Introduction

En Suisse, plus de 40% de la consommation énergétique et des émissions de CO_2 sont générées par le secteur du bâtiment. Dans une démarche de développement durable pour réduire l'empreinte carbone et améliorer l'efficacité des bâtiments, la Suisse a lancé en 2010 le "Programme Bâtiments". Ce programme vise, par le moyen d'une incitation financière, à motiver les propriétaires à assainir leur habitat [1]. Selon ce programme, environ 1.5 million de maisons nécessiteraient de toute urgence un assainissement énergétique, mais, seulement 1% environ est rénové chaque année. L'amélioration de l'enveloppe du bâtiment et de son isolation thermique représente le point de départ pour rendre une maison énergétiquement efficace.

Un des aspects les plus importants de la réglementation thermique dans le secteur du bâtiment concerne l'utilisation d'isolation pour réduire les déperditions thermiques. L'élaboration de ces normes se voit souvent confrontée à la question de l'épaisseur optimale d'isolation. Des exigences minimales en termes des déperditions à travers l'enveloppe sont souvent décrites mais ne reflètent pas nécessairement l'optimum économique ou écologique. En effet, il existe une limite d'épaisseur d'isolant au-delà de laquelle les coûts liés à l'énergie consommée par le bâtiment additionnée aux coûts liés au matériau isolant suivent une évolution croissante. Il en est de même pour des épaisseurs plus faibles. C'est pourquoi, il est important de mettre en rapport les économies apportées par l'isolation thermique à son coût, ainsi que la problématique environnementale liée à ce problème. Il faut savoir que l'efficacité de l'isolation suit la loi des gains décroissants et est toujours synonyme de dépenses additionnelles pour l'investisseur.

Le concept d'une épaisseur économique d'isolation tient compte de l'augmentation des coûts d'achat du matériau liés à l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation mais également de la diminution des frais de chauffage estimés sur la durée de vie du matériau isolant. L'épaisseur optimale d'isolation (EOI) est déterminée par le minimum atteint par la courbe de dépenses globales, soit l'épaisseur pour laquelle ces dépenses sont les plus faibles sur la durée de vie considérée. Outre le coût d'investissement, d'autres paramètres influencent également ce calcul, à savoir le type de bâtiment, sa forme, son orientation et utilisation ; le climat, les matériaux de construction, le matériau isolant, la source d'énergie et son prix ainsi que le type et le rendement de l'installation de production de chaleur.

D'une manière graphique, cette démarche peut être résumée dans le scénario de rénovation présenté dans la figure 1 et décrite ci-dessous :

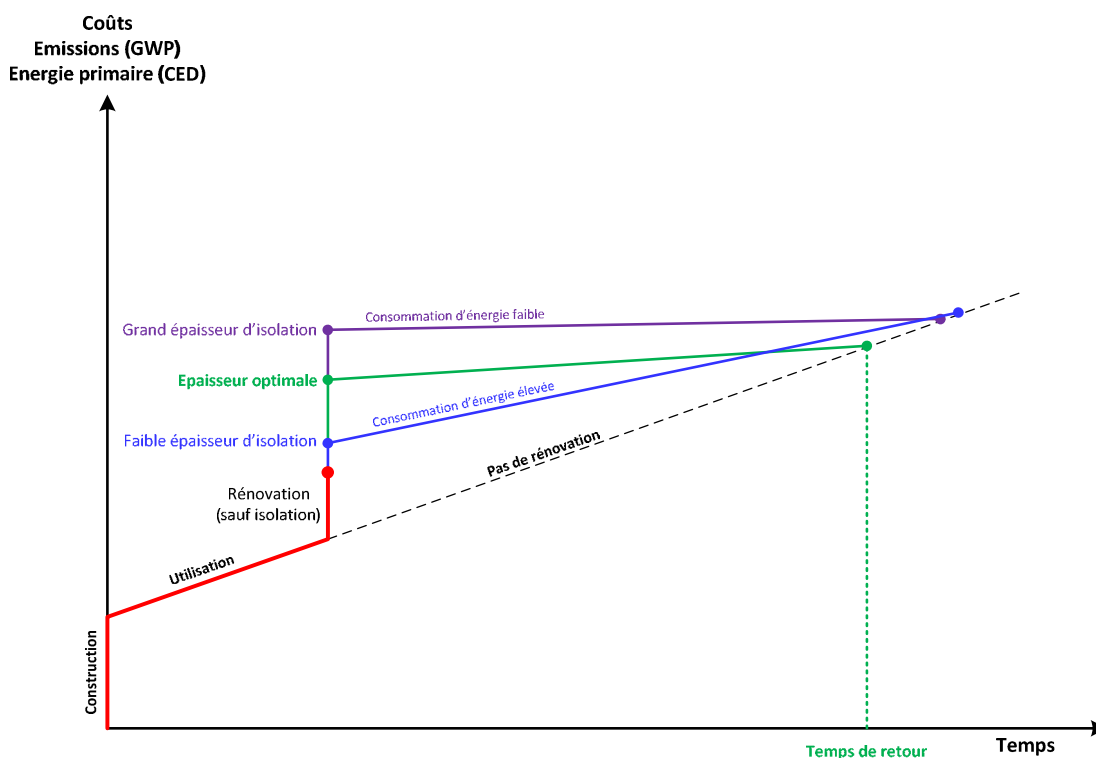


Figure 1 : Visualisation de différents scénarios de rénovation

Le raisonnement s'applique indifféremment pour différents indicateurs, comme les coûts, les émissions de gaz à effet (GWP) de serre, l'énergie primaire totale (CED_{TOT}), l'énergie primaire non-renouvelable (CED_{NRE}) ou tout autre impact non-représenté ici. Afin de bien comprendre le concept, la Figure 1 est détaillée ci-dessous avec, comme exemple, les coûts. Lors de la construction d'un bâtiment, un certain coût de construction doit être investi (trait rouge vertical "Construction"). Ensuite, le bâtiment consomme de l'énergie, ce qui se traduira par un coût d'utilisation (trait rouge oblique "Utilisation"). Après un certain nombre d'années, une rénovation doit être envisagée. Des coûts de rénovation devront être investis quelle que soit l'épaisseur d'isolation finale choisie (trait rouge vertical "rénovation (sauf isolation)"). A cela s'ajoute un coût pour l'isolant qui va dépendre de l'épaisseur de cette dernière. En choisissant une faible épaisseur d'isolation (courbe bleue), le coût d'investissement sera faible (trait bleu vertical), mais la consommation résultante annuelle du bâtiment sera élevée (trait bleu incliné "Consommation d'énergie"). En optant pour une plus grande épaisseur (courbe violette), le prix de l'isolation sera plus élevé, mais le coût de l'énergie de chauffage sera plus faible. En fonction de paramètres comme le type d'isolation, de son épaisseur et du type de chauffage, il existe une situation présentant le temps de retour sur investissement le plus faible (courbe verte). Ce temps de retour se définit par l'intersection entre la courbe de consommation avant rénovation (trait-tillés noirs) et la courbe de consommation après rénovation.

Ce document présente la méthodologie permettant de déterminer cet optimum. Une approche théorique sera présentée dans les cas faciles à analyser, comme les isolations en toiture plate. Dans ce cas, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolation ne nécessite pas de supports particuliers pour tenir l'isolation. Pour ces éléments de construction, l'approche théorique permet d'obtenir une équation analytique permettant de déterminer l'épaisseur optimale d'isolation. Pour les éléments dont l'épaisseur d'isolation nécessite des supports supplémentaires à partir de certaines épaisseurs (qui dépendent du système constructif et de l'isolant), l'approche théorique devient moins élégante et il est préférable de la remplacer par une approche tenant compte des contraintes liées aux fabricants et à la mise en œuvre sur chantier.

3 Revue bibliographique

Au cours de la dernière décennie, un grand nombre d'études a été publié sur les différentes solutions d'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, notamment l'isolation thermique de l'enveloppe. Dans la plupart des cas, les études ont été menées sur les épaisseurs d'isolation économiquement viables et peu d'efforts se sont portés sur la question de l'épaisseur écologique d'isolation.

Beaucoup d'études se sont focalisées en Europe où les résultats ont permis de tirer des lignes directrices servant de base à des normes de construction plus respectueuses de l'environnement [[2], [3]]. D'autres investigations ont analysé cette problématique dans des climats plus chauds. L'ensemble de ces résultats a été revu récemment par Kaynakli [4].

En général, les études démontrent que les gains énergétiques résultants de l'emploi d'une épaisseur d'isolation optimale varient en fonction du type de bâtiment, du climat, du type d'isolation et de la source d'énergie. Il est aussi suggéré que le calcul de l'épaisseur optimale d'isolation se fasse sur la base des conditions climatiques prédominantes [5].

En plus des murs extérieurs, certaines analyses ont aussi considérées l'isolation optimale de la toiture, différentes orientations des murs et l'emploi de surfaces colorées [[6], [7]].

Outre les besoins en chauffage, quelques études se sont penchées sur l'impact de l'isolation pour les besoins en climatisation des bâtiments où d'importants gains sont possibles, voir par exemple l'étude de Cheung et al. [8]. Dans une étude portant sur des bâtiments résidentiels, il a été montré que l'application d'isolation thermique aux bâtiments du sud de l'Europe réduit considérablement la demande en climatisation [9].

Dans la majorité des études, la méthode traditionnelle des degré-jours (DJ) a été adoptée pour quantifier les besoins énergétiques annuels de chauffage et de refroidissement des bâtiments. Cette méthode des DJ est un modèle statique où les conditions dans le bâtiment sont considérées constantes pendant toute l'année. Dans la notion de degré-jour, certaines études utilisent à la place de la température extérieure de l'air, une température qui prend en compte l'effet du rayonnement solaire. Cette correction s'avère importante, par exemple, pour les régions particulièrement ensoleillées comme le sud de l'Europe et les régions du Golfe [10].

Malgré sa simplicité, les résultats obtenus avec la méthodologie des DJ sont assez précis dans des cas où les variations journalières d'utilisation du bâtiment sont faibles, comme par exemple pour les maisons familiales. Pour les bâtiments de type administratif, sujets à d'importantes fluctuations horaires, la méthode des DJ est inappropriée [[11], [12]]. Dans ce cas, une méthode dynamique, qui tient compte du rayonnement solaire, de l'inertie thermique du bâtiment, du rendement des installations et du comportement des utilisateurs, est nécessaire pour mieux représenter le comportement des éléments de l'enveloppe du bâtiment. Par exemple, pour la Tunisie, des études basées sur la transformation de Fourier ont été conduites afin de déterminer la combinaison la plus économique entre différentes structures de murs et de matériaux isolants [13]. Avec une épaisseur d'isolation optimale, des économies d'énergie de l'ordre de 70% ont été communiquées pour des périodes de retour inférieures à 4 ans. Une autre étude a employé un logiciel de calcul dynamique pour étudier l'impact de l'isolation thermique dans un bâtiment résidentiel pendant la période d'été [14]. Les auteurs ont conclu que dans ces conditions, l'augmentation du niveau d'isolation ne conduit pas forcément à des consommations énergétiques plus basses. Dans le cas étudié, une augmentation globale de l'énergie pour la climatisation a été observée due à d'importants gains internes. Plus récemment, des simulations, basées sur un modèle thermique dynamique ont été menées afin de déterminer les épaisseurs d'isolation économiquement et écologiquement optimales pour des bâtiments au Japon [15]. D'après cette étude l'épaisseur écologique est plus grande que l'épaisseur économique.

Certains chercheurs ont mis l'accent sur la réduction des gaz à effet de serre (GWP) obtenue par l'optimisation de l'épaisseur d'isolation économique. En Turquie, pour deux villes aux climats différents, la variation de l'épaisseur optimale d'isolation avec différentes sources d'énergie pour deux isolants distincts a été obtenue [12]. Les économies potentielles et la réduction des émissions dans le climat chaud et humide des Maldives ont été investiguées par Mahlia et al. [16] en appliquant différents isolants d'épaisseurs optimales dans les parois extérieures des bâtiments.

Des réductions proches de 80% en termes d'émissions de gaz à effet de serre ont été annoncées par rapport aux épaisseurs habituellement posées. Dans une étude européenne, le calcul d'une valeur U optimale a été réalisée du point de vue financier et environnemental et des recommandations pour des épaisseurs d'isolation des différents éléments de constructions ont été présentées [9]. Deux types de bâtiments ont été considérés au travers de 100 climats européens différents (pour la Suisse, les climats de Zürich et Genève sont considérés). Les résultats ont montré l'existence d'un écart entre les exigences actuelles et l'optimum économique sur 30 ans, même pour quelques pays traditionnellement soucieux en termes de demande énergétique des bâtiments. L'étude démontre également que les exigences en matière d'efficacité lors des rénovations devraient être presque les mêmes que lors de constructions neuves.

Les études mentionnées ci-dessus ont été effectuées dans des conditions très variables comme le type de climat, la température intérieure, les caractéristiques du bâtiment et sa durée de vie, le type d'isolation et son coût, et le coût de l'énergie.

Afin d'évaluer l'impact de ces différents paramètres dans le calcul de l'épaisseur optimale d'isolation, il est important d'avoir une vision plus globale, car l'épaisseur optimale d'isolation n'est pas forcément la même en fonction de l'indicateur utilisé (coûts ou impact environnemental).

Une revue de la littérature assez complète sur les EOI a été effectuée par Kaynakli [17]. Cet article montre l'influence de nombreux paramètres sur l'EOI financière. Par exemple, l'auteur conclut qu'un climat plus rude conduit à des EOI plus élevées. De même, si la durée de vie, le coût de l'énergie, la conductibilité thermique des isolants augmentent alors les EOI ont tendance à augmenter également. Inversement, si le coût de l'isolant ou le rendement de l'installation de production de chaleur augmente, les EOI ont alors tendance à diminuer.

Comme pour le calcul économique, les épaisseurs écologiquement optimales pour tel ou tel indicateur (GWP, CED_{NRE}, ...) sont déterminées par la valeur minimale de la somme des impacts de production et de pose de l'isolation et des impacts énergétiques de l'énergie de chauffage.

Une étude portant sur les bâtiments à faible consommation énergétique en Allemagne a calculé l'épaisseur d'isolation économiquement et écologiquement optimale sur la base d'une analyse du cycle de vie des différents isolants [18]. Dans une démarche similaire, une étude danoise a démontré la faisabilité écologique et économique d'augmenter l'épaisseur d'isolation bien au-delà des valeurs couramment employés [19]. Plus récemment, le calcul des épaisseurs optimales d'isolation selon plusieurs indicateurs (économiques et environnementaux) et systèmes de chauffage a été présenté pour le climat allemand [20]. Les résultats obtenus, pour une plage comprise entre -5 et +10% de l'épaisseur optimale, ont montré que les indicateurs économiques favorisent un faible investissement initial, à savoir des épaisseurs comprises entre 20 et 30 [cm]. Par contre, les indicateurs environnementaux favorisent une épaisseur d'isolation beaucoup plus élevée, située entre 40 et 80 [mm]. Cette dernière conclusion a été confirmée par Goto et al. pour le climat japonais [15].

D'après la revue de la littérature effectuée, l'épaisseur optimale d'isolation a souvent été étudiée dans des contextes différents avec parfois un point de vue environnemental au côté des coûts financiers. En effet, souligner les économies environnementales potentielles dans l'avenir reste l'approche la plus simple pour communiquer sur les avantages d'une dépense financière supplémentaire. Ceci a encore plus de sens pour la conception ou la réhabilitation de bâtiments à haute performance énergétique qui peuvent présenter des impacts environnementaux liés aux matériaux plus importants que ceux liés à la consommation d'énergie [21]. Cependant, peu d'études présentent des comparaisons de couples optimaux pour de nombreux éléments de construction, systèmes de chauffage et isolants. Par ailleurs, les études existantes n'ont pas vraiment analysé la sensibilité des épaisseurs optimales à différents paramètres spécifiques à la rénovation (p. ex. incitations financières sous forme de subventions), à la mise en œuvre sur chantier (p. ex. contraintes de pose avec doublement de panneaux isolants en fonction des gammes disponibles sur le marché), ou concernant les prix (p. ex. évolution des coûts de l'énergie de chauffage). Les résultats présentés jusqu'à maintenant n'ont également pas comparé les EOI par rapport aux épaisseurs calculées selon les méthodes de calcul issus de normes ou de labels énergétiques.

4 Méthodologie

Ce chapitre présente l'approche générale utilisée pour déterminer l'épaisseur optimale d'isolation d'un point de vue financier et environnemental. Pour parvenir à cette détermination, il faut mettre en relation l'évolution des paramètres respectifs (coût, CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP etc.) en fonction de l'épaisseur d'isolant pour les deux contributions suivantes :

- Matériau (isolation)
- Système de production de chaleur pour le chauffage

La figure 2 montre la représentation graphique permettant de définir l'épaisseur optimale d'isolation:

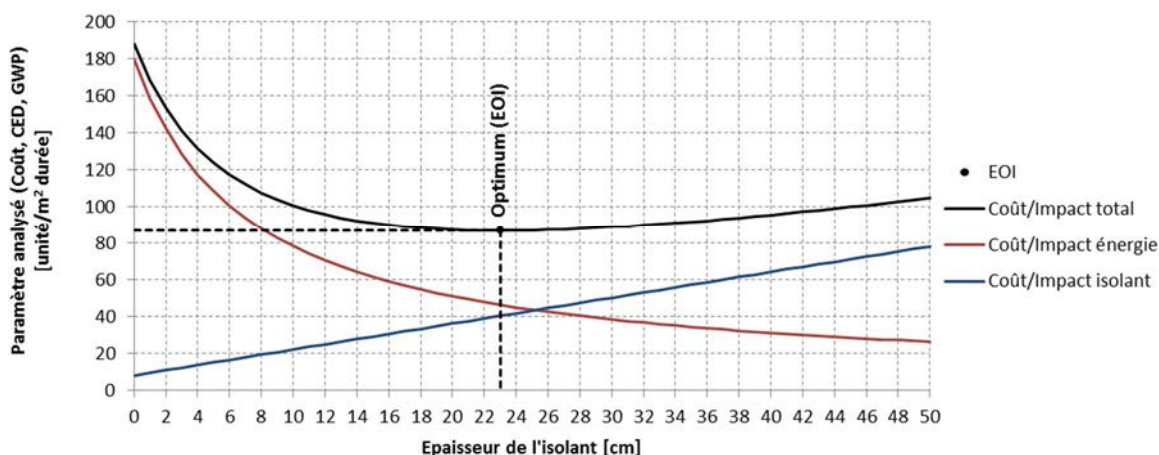


Figure 2: Représentation graphique de l'épaisseur optimale d'isolation (EOI)

Dans le cas présenté dans la figure 2, le coût/impact de l'isolation croît d'une manière linéaire avec l'épaisseur (courbe bleue). Les coûts/impacts liés à l'installation de chauffage décroissent avec l'augmentation de l'épaisseur d'isolation (courbe rouge). La courbe noire correspond à la somme des deux courbes précédentes (bleue et rouge). Le minimum de cette courbe résultante correspond à l'épaisseur optimale d'isolation (EOI).

Il existe plusieurs méthodes de calcul pour définir ces différentes contributions, le présent rapport utilisera des méthodes de calculs proches de la pratique et couramment appliquées par les professionnels de la construction. Ainsi, cette analyse se basera sur les normes SIA ad-hoc que ce soit pour le calcul de la contribution des matériaux (isolation) ou pour la contribution de l'énergie de chauffage.

Afin de pouvoir effectuer l'analyse des résultats sur une base simple, les calculs réalisés seront présentés et analysés pour 1 m² d'élément de construction considéré ayant une fonction d'isolation thermique et calculé pour une certaine durée de vie (unité fonctionnelle).

De plus, l'ensemble de cette analyse se concentre sur les aspects liés à l'isolation, c'est-à-dire que les différents coûts et les impacts mentionnés se rapportent à l'isolation propre et non à l'ensemble de l'élément considéré.

4.1 Contribution liée au matériau

La contribution liée au matériau nécessite de connaître l'évolution du paramètre considéré en fonction de son épaisseur.

4.1.1 Analyse financière

Le coût de l'isolation en fonction de son épaisseur doit inclure plusieurs paramètres, à savoir :

- Prix de l'isolant
- Prix des systèmes de fixation
- Prix des composants indispensables à la pose de l'isolation (par exemple lavage de la façade, toilage, crépis, échafaudage,...)
- Coût de la main-d'œuvre

Dans ces catégories, seul le prix de l'isolant est proportionnel à l'épaisseur d'isolation. Les autres grandeurs sont soit fixes pour toutes les épaisseurs, soit subissent un saut à une épaisseur donnée (par exemple les fixations ou l'augmentation du temps de travail lié au doublement des panneaux isolants pour de plus grandes épaisseurs). La détermination précise de toutes ses grandeurs doit être faite en collaboration avec des professionnels. Ces différentes catégories sont susceptibles de varier selon le type d'isolation, le type d'élément de construction considéré et selon des critères particuliers liés à la construction (tarification selon le lieu géographique, rabais accordés par l'entrepreneur, etc.).

Dans le cas de l'analyse mathématique simplifiée, nous considérons que la droite caractérisant le coût de l'isolation se compose de deux termes, à savoir, un terme proportionnel (coût de l'isolant) et un terme fixe (main-d'œuvre et composants indispensables à la pose) comme le montre la figure 3.

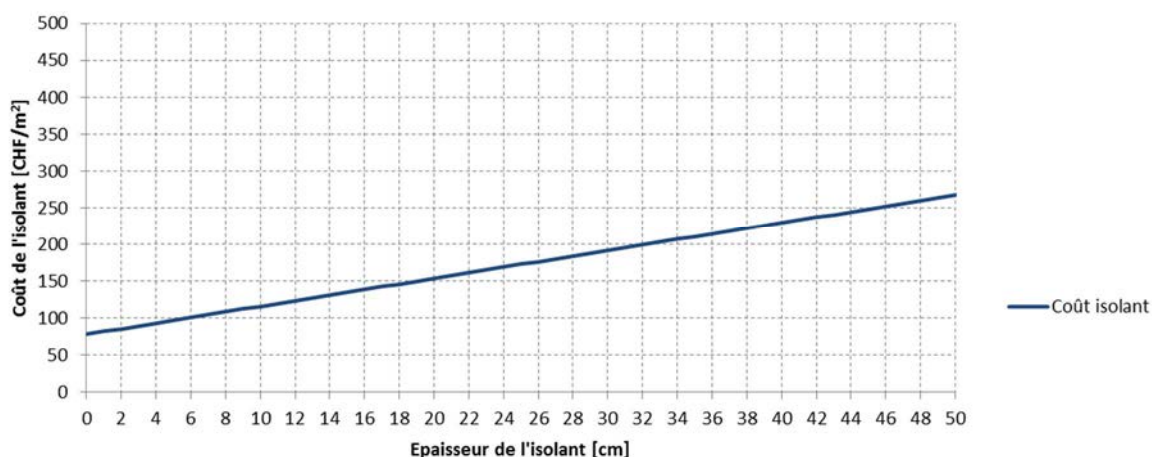


Figure 3: Représentation graphique du coût de l'isolation

4.1.2 Analyse environnementale

Les indicateurs environnementaux (CED_{TOT} , CED_{NRE} et GWP) correspondant au type d'isolation sont tirés de la base de données KBOB [22]. Les impacts liés à la fabrication et à l'élimination du matériau sont inclus dans l'analyse. Les différents impacts liés à la pose de l'isolation et aux différents moyens mis en œuvre pour effectuer cette pose devraient être évalués et considérés.

4.2 Contribution liée à l'énergie de chauffage

Cette contribution permet d'évaluer l'énergie de chauffage nécessaire à maintenir un niveau de confort donné côté intérieur de l'élément considéré.

Afin de pouvoir déterminer cette contribution, il est tout d'abord nécessaire de calculer les déperditions thermiques au travers de l'élément considéré. Ces déperditions thermiques sont dépendantes des paramètres suivants :

- Climat dans lequel est situé le bâtiment
- Composition de l'élément de construction
- Type et épaisseur d'isolation

Après avoir défini les déperditions thermiques au travers de l'élément considéré, il est possible de calculer l'énergie utile nécessaire à compenser ces déperditions.

Selon le vecteur énergétique considéré, une analyse du paramètre (coût, CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP) par unité d'énergie utile doit être effectuée et, ainsi, la contribution liée à l'énergie de chauffage peut être calculée.

Tout comme pour la contribution liée au matériau, la détermination de cette contribution se différencie selon le paramètre considéré.

4.2.1 Analyse financière

Le coût de l'énergie de chauffage en fonction de l'épaisseur d'isolation inclut plusieurs paramètres, à savoir :

- Prix du vecteur énergétique et évolution dans le temps.
- Coûts liés à l'installation de production de chaleur incluant l'investissement, l'entretien, les taxes et autres coûts de fonctionnement.

4.2.2 Analyse environnementale

Dans l'approche effectuée, les impacts liés à la consommation d'énergie et au producteur de chaleur sont considérés; les indicateurs environnementaux (CED_{TOT} , CED_{NRE} et GWP) correspondant au vecteur énergétique sont tirés de la base de données KBOB [22].

5 Prise en compte des apports de chaleur utile dans le calcul des épaisseurs optimales d'isolation

La méthodologie présentée dans le chapitre 4 nécessite quelques considérations et analyses concernant les points suivants :

- Facteur d'utilisation des gains solaires et des gains internes
- Apports d'énergie solaire par les parois et les toitures
- Différence de température entrant dans le calcul des déperditions thermiques

Nous rappelons, dans un premier temps, les équations régissant les transferts de chaleur par déperditions thermiques à travers un élément de construction.

5.1 Rappels concernant le transfert de chaleur par déperditions thermiques au travers d'un élément opaque

Les déperditions au travers d'un élément de construction permettent d'évaluer l'énergie de chauffage nécessaire à garantir un niveau de confort pour l'utilisateur. Cette partie présente un rappel des principales équations régissant ce transfert de chaleur.

5.1.1 Détermination des déperditions thermiques au travers un élément de construction

Dans le domaine de la construction, trois types d'éléments sont considérés:

- Les éléments homogènes qui se caractérisent par la superposition de plusieurs couches de matériaux posées les unes sur les autres.
- Les éléments inhomogènes qui, par opposition aux éléments homogènes, présentent des interruptions régulières dans la superposition des couches (par exemple chevron, poutrelle).
- Les ponts thermiques au travers de l'élément.

La formule générale pour définir les déperditions thermiques d'une paroi est donnée dans l'équation suivante:

$$\dot{Q} = (S \cdot U + U' \cdot L + \chi) \cdot (T_{ext} - T_i) \quad (5.1)$$

Avec :

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------|----------------------|
| \dot{Q} | Puissance thermique à travers l'élément | [W] |
| S | Surface de l'élément | [m ²] |
| U | Coefficient de transfert thermique de l'élément | [W/m ² K] |
| U' | Coefficient de transmission thermique linéique | [W/m·K] |
| χ | Coefficient de transmission thermique ponctuel | [W/K] |
| L | Longueur du pont thermique | [m] |
| T_{ext} | Température extérieure | [°C] |
| T_i | Température intérieure | [°C] |

5.1.2 Eléments homogènes

Dans le cas d'un élément de construction homogène, le coefficient U se définit avec :

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_1^n \frac{e}{\lambda} + R_{se}} \quad (5.2)$$

Avec :

| | | |
|-----------|-------------------------------------------------|-------------------|
| U | Coefficient de transfert thermique de l'élément | $[W/m^2 \cdot K]$ |
| R_{si} | Résistance superficielle interne | $[m^2 \cdot K/W]$ |
| R_{se} | Résistance superficielle externe | $[m^2 \cdot K/W]$ |
| e | Epaisseur du composant | $[m]$ |
| λ | Coefficient de conduction du composant | $[W/m \cdot K]$ |

Dans le cadre de la détermination de l'épaisseur optimale d'isolation, il est intéressant de réécrire l'équation ci-dessus en fixant la résistance liée aux matériaux autre que celle de l'isolation :

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{tot-isol} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + R_{se}} \quad (5.3)$$

Avec :

| | | |
|----------------|-------------------------------------------------|-------------------|
| U | Coefficient de transfert thermique de l'élément | $[W/m^2 \cdot K]$ |
| $R_{tot-isol}$ | Résistance des matériaux autre que l'isolation | $[m^2 \cdot K/W]$ |
| R_{si} | Résistance superficielle interne | $[m^2 \cdot K/W]$ |
| R_{se} | Résistance superficielle externe | $[m^2 \cdot K/W]$ |
| e_{isol} | Epaisseur du composant | $[m]$ |
| λ | Coefficient de conduction du composant | $[W/m \cdot K]$ |

5.1.3 Eléments inhomogènes

Dans le cas des éléments inhomogènes, la norme SIA 180 [23] définit une méthode permettant de calculer le coefficient U, celle-ci doit être appliquée pour la détermination du coefficient U d'éléments inhomogène mais n'est pas décrite dans le présent rapport.

5.1.4 Ponts thermiques

Les différents ponts thermiques rencontrés dans cette analyse seront définis au moyen des catalogues de ponts thermiques basés sur les normes SN EN ISO 14683 [24] et ISO 10211-1 et 10211-2 [25], [26].

Il est à signaler que les ponts thermiques considérés concernent essentiellement ceux liés à l'élément de construction (par exemple : fixation isolation) et non les ponts thermiques pouvant intervenir sur la totalité du bâtiment (par exemple : tête de dalle).

5.1.5 Détermination des pertes par transmission au travers d'un élément

Compte tenu des considérations faites dans le chapitre précédent, l'énergie de transmission par déperditions thermiques au travers d'un élément opaque durant une année est calculée avec:

$$Q_T = \frac{U \cdot S \cdot DJ_{SIA} \cdot 24}{\underbrace{1'000}_{W \rightarrow kW}} \quad (5.4)$$

Avec :

| | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Q_T | Déperditions par transmissions thermiques | [kWh] |
| U | Valeur U totale de l'élément | [W/m ² ·K] |
| S | Surface de l'élément considéré | [m ²] |
| DJ_{SIA} | Différence de température entre l'extérieur et l'intérieur pour le climat considéré multiplié par la | |
| durée considérée défini par $\sum_{i=1}^{12} \left\{ \left(T^i_i - \bar{T}_{e,j} \right) n^i \right\}$ | | [K·j] |

5.2 Facteur d'utilisation des gains solaires et des gains internes

La méthodologie permettant de définir l'épaisseur optimale d'isolation nécessite de définir les pertes thermiques par déperdition au travers de l'élément considéré. D'une manière intuitive, il découle que les gains obtenus par la pose d'une épaisseur d'isolation se reportent directement et d'une façon proportionnelle par une diminution de l'énergie de chauffage nécessaire à maintenir un niveau de confort suffisant pour les utilisateurs.

Cependant, selon la norme SIA 380/1, il s'avère, qu'à l'échelle d'un bâtiment, l'énergie de chauffage correspond au bilan thermique des pertes par transmission et par renouvellement d'air diminué d'une partie de l'énergie "gratuite" reçue par le bâtiment (apports solaires et apports internes) comme le montrent l'équation (5.5) et le schéma de la figure 4.

Ainsi, ce chapitre apporte un éclairage sur l'influence de ces apports "gratuits" dans la détermination des épaisseurs optimales d'isolation.

L'équation (5.5) donne la formule générale donnée dans la norme SIA 380/1 pour définir les besoins en chaleur de chauffage d'un bâtiment:

$$Q_h = \sum [Q_T + Q_V - \eta_g \cdot (Q_i + Q_s)] \quad (5.5)$$

Avec :

| | | |
|----------|-------------------------------------------|-------|
| Q_h | Besoins de chaleur pour le chauffage | [kWh] |
| Q_T | Déperditions par transmission | [kWh] |
| Q_V | Déperditions par renouvellement d'air | [kWh] |
| η_g | Taux d'utilisation des apports de chaleur | [-] |
| Q_i | Apports de chaleur internes | [kWh] |
| Q_s | Apports de chaleur solaires | [kWh] |

Cette équation peut être visualisée sous une forme schématique comme le montre la figure 4 :

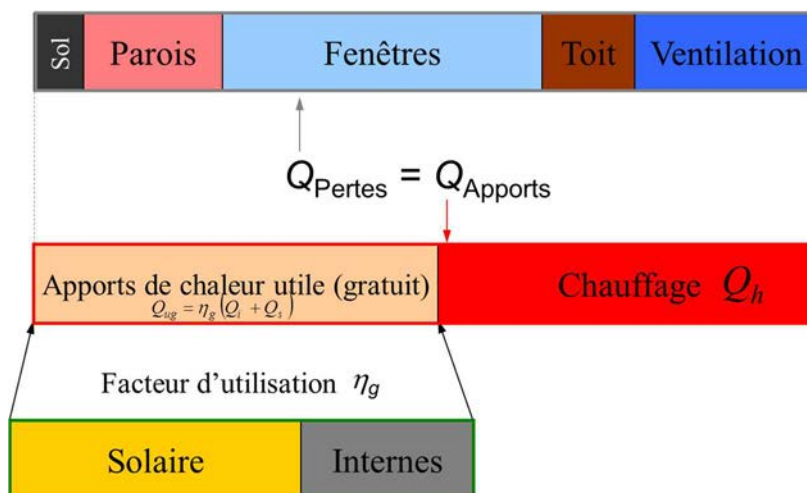


Figure 4: Visualisation des différents éléments entrants dans le bilan global d'un bâtiment selon SIA 380/1

Le taux d'utilisation des apports de chaleur (η_g) dépend de l'inertie thermique du bâtiment et du rapport (γ) entre les apports totaux de chaleur gratuites (Q_g) et la somme des déperditions d'énergie par transmission et par ventilation (Q_L) comme montré dans l'équation (5.6).

$$\gamma = \frac{Q_i + Q_s}{Q_T + Q_V} = \frac{Q_g}{Q_L} \quad (5.6)$$

Avec :

| | | |
|----------|------------------------------------------------------|-------|
| γ | Quotient apports/déperditions | [-] |
| Q_g | Somme des apports de chaleur (solaires et internes) | [kWh] |
| Q_i | Apports de chaleur internes | [kWh] |
| Q_L | Somme des déperditions (transmission et ventilation) | [kWh] |
| Q_s | Apports de chaleur solaires | [kWh] |
| Q_T | Déperditions par transmission | [kWh] |
| Q_V | Déperditions par renouvellement d'air | [kWh] |

Ainsi, le fait de faire varier l'épaisseur d'isolation d'un élément de construction entraîne une modification du rapport (γ), ce qui va influencer le taux d'utilisation (η_g) des apports "gratuits" (Q_g). De même, lorsque des grandes épaisseurs d'isolation sont considérées, l'influence de l'emplacement du vitrage dans le mur joue un rôle sur les apports de chaleur solaires (Q_s) (effets d'ombrage) et modifiera la valeur du rapport (γ).

Dans la présente étude, c'est l'optimisation de l'épaisseur d'isolation dans un élément de construction qui est analysé. Par conséquent, il est important de pouvoir se soustraire, autant que possible, de paramètres qui pourraient varier entre différentes variantes d'un bâtiment donné ou entre différents bâtiments; or, ce n'est pas le cas du rapport γ .

Afin d'estimer la sensibilité du taux d'utilisation η_g , une étude a été effectuée à partir d'un bâtiment connu [27] et pour lequel nous avons fait varier les caractéristiques de l'enveloppe (bâtiment massif et léger) et les proportions de surfaces vitrées du bâtiment. Cette analyse a été effectuée à l'aide du logiciel Lesosai [28] (logiciel certifié SIA 380/1 [29]). Cette analyse considère, dans un premier temps, que les vitrages sont placés à l'extérieur de l'enveloppe et que le terme Q_s n'est pas modifié selon l'épaisseur d'isolant.

L'analyse a permis d'observer la variation de η_g sur le bilan total du bâtiment en fixant une isolation de 2 [cm], puis de 50 [cm] dans les éléments de construction (façade, toiture et dalle), ceci pour une capacité thermique du bâtiment de 1000 [MJ/K] et de 100 [MJ/K]. Dans un second temps, la même analyse a été effectuée en augmentant la surface de fenêtre de la façade sud (de 13% à 80% de la

surface totale du mur), ceci afin d'augmenter les apports solaires du bâtiment. Les résultats globaux sont montrés dans le tableau 1 et le tableau 2.

| Capacité therm-ique du bâtiment [K/m²K] | Surface de fenêtre façade sud [%] | Epaisseur isolation façade [cm] | Q _h [MJ/m²] | Q _T [MJ/m²] | Q _v [MJ/m²] | Q _i [MJ/m²] | Q _s [MJ/m²] | η _g [-] | γ [-] |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------|
| 1'000 | 13.7 | 2 | 160 | 227 | 75 | 74 | 120 | 0.732 | 0.6424 |
| | | 50 | 90 | 146 | 75 | 74 | 120 | 0.675 | 0.8778 |
| 100 | | 2 | 171 | 227 | 75 | 74 | 120 | 0.675 | 0.6424 |
| | | 50 | 98 | 146 | 75 | 74 | 120 | 0.634 | 0.8778 |

Tableau 1: Analyse du taux d'utilisation des apports de chaleur dans le cas d'un bâtiment défini [27], avec une surface de fenêtre au sud de 13.7%

| Capacité therm-ique du bâtiment [kJ/m²K] | Surface de fenêtre façade sud [%] | Epaisseur isolation façade [cm] | Q _h [MJ/m²] | Q _τ [MJ/m²] | Q _v [MJ/m²] | Q _i [MJ/m²] | Q _s [MJ/m²] | η _g [-] | γ [-] |
|------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------|
| 1'000 | 80.0 | 2 | 131 | 263 | 75 | 74 | 246 | 0.647 | 0.9467 |
| | | 50 | 79 | 194 | 75 | 74 | 246 | 0.594 | 1.1896 |
| 100 | | 2 | 152 | 263 | 75 | 74 | 246 | 0.581 | 0.9467 |
| | | 50 | 96 | 194 | 75 | 74 | 246 | 0.541 | 1.1896 |

Tableau 2: Analyse du taux d'utilisation des apports de chaleur dans le cas d'un bâtiment défini [27], avec une surface de fenêtre au sud de 80.0%

Une première vérification a été faite pour vérifier que les η_g obtenus avec Lesosai, soient conformes à des valeurs référencées. Cette vérification a été effectuée en utilisant la norme EN 13790 (repris dans la SIA 380/1) qui donne l'évolution du taux d'utilisation en fonction du rapport γ . Cependant, pour que cette visualisation soit cohérente, il est nécessaire de calculer la valeur η_g mensuellement et par zone. Ces valeurs mensuelles ont été tirées des résultats fournis par LESOSAI et sont représentées dans la figure 5:

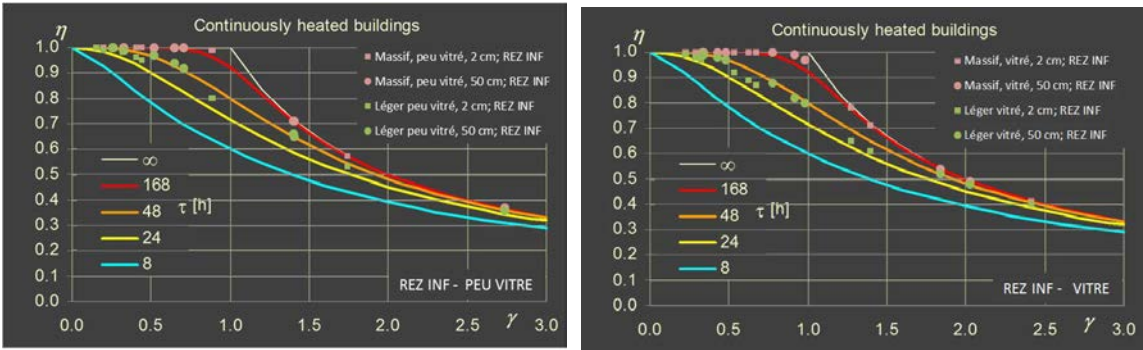


Figure 5: Evolution du facteur d'utilisation en fonction du rapport entre les apports de chaleur et les pertes [30] pour le bâtiment analysé (à gauche : bâtiment peu vitré ; à droite : bâtiment fortement vitré)

Ces graphiques permettent de voir que le facteur d'utilisation des apports de chaleur évolue avec l'augmentation d'isolation. De plus, ces graphiques montrent que l'évolution du facteur d'utilisation des apports de chaleur est directement liée aux caractéristiques propres du bâtiment (capacité, apports solaires, apports internes, facteur de forme, etc.). Ainsi, il est montré que lorsque le bâtiment est massif, le facteur d'utilisation subit moins de variation que lorsqu'il est léger. De plus, la part de vitrage dans le bâtiment joue un rôle important sur la valeur des apports solaires, qui elle-même influencera le facteur d'utilisation des apports de chaleur.

Afin de mieux peser l'influence de ce facteur, il est intéressant d'analyser l'effet de la variation d'énergie liée aux déperditions thermiques (ΔQ_T) entre 2 et 50 [cm] d'isolant et la variation de besoin de chauffage (ΔQ_h) résultante calculée par LESOSAI. Les résultats sont présentés dans le graphique de la figure 6.

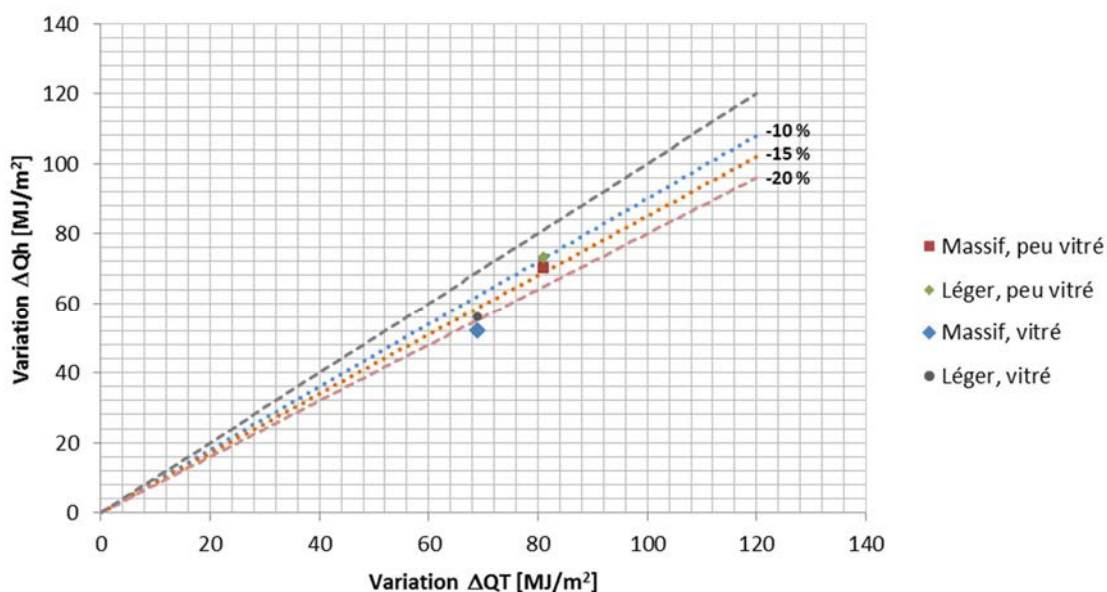


Figure 6: Variation d'énergie liée aux déperditions (Q_T) du bâtiment par rapport aux variations d'énergie de chauffage (Q_h) pour le bâtiment analysé entre une épaisseur d'isolation de 2 et de 50 [cm].

Cette représentation montre d'une façon assez claire que le facteur d'utilisation joue un rôle significatif dans le bilan énergétique d'un bâtiment considéré dans son ensemble. En effet, pour l'analyse effectuée, avec le bâtiment peu vitré, une différence de l'ordre de 15% est visible alors que dans la version bâtiment vitré, la différence dépasse les 20%. Ainsi, et en d'autres termes, il est possible de dire, que, selon le type de bâtiment considéré, les gains obtenus par une augmentation de l'épaisseur d'isolation d'un élément de construction ne se répercutent pas directement sur les besoins de chaleur à fournir par le système de production de chaleur. Dans le cas analysé, cette différence se situe entre 10 et 20% selon que le bâtiment soit peu ou bien isolé !

Cette considération sera prise en compte lors de la détermination de l'épaisseur optimale d'isolation par la multiplication de la valeur Q_T par un coefficient (κ).

L'analyse ci-dessus a été effectuée sur une villa des années 80 de forme compacte. Afin de vérifier et de confirmer les résultats ci-dessus, une analyse similaire a été effectuée sur un immeuble d'habitation rénové récemment (SRE de 4'728 m²), présentant une géométrie complexe et dont la consommation d'énergie est plus faible qu'un bâtiment similaire vérifiant le label Minergie-P® neuf [31]. Les valeurs obtenues sur la variation d'énergie liée aux pertes thermiques (Q_T) entre 2 et 50 [cm] d'isolant et la variation de besoin de chauffage (Q_h) se situent également entre 15 et 20% selon que le bâtiment soit léger ou massif (cf. annexe 1).

De plus, l'analyse mathématique montre que dans le cas où les fenêtres sont posées en position intérieure du mur et en présence d'une épaisseur conséquente d'isolation, les apports solaires tendent vers une valeur nulle, le taux d'utilisation (η_g) tend à augmenter légèrement, tandis que le terme $\eta_g(Q_T + Q_s)$ devient plus petit. Ainsi, dans ce cas, l'énergie nécessaire au chauffage (Q_H) tend à se rapprocher des pertes thermiques (Q_T).

Ainsi, ce chapitre montre qu'il est important de prendre en considération les aspects liés aux apports solaires. Cependant, dans le cadre d'une méthode simplifiée qui n'intègre que l'élément opaque sans considérer le bâtiment dans son ensemble, une prise en compte précise et adaptée à toutes les configurations possibles n'est guère possible. Les analyses effectuées montrent que le coefficient κ peut fluctuer entre des valeurs comprises entre 0.5 et 1.0, en fonction du pourcentage de surface vitrée du bâtiment, de l'épaisseur d'isolant et de la position des fenêtres (position intérieure ou extérieure).

5.2.1 Apports d'énergie solaire par les parois et les toitures

Selon Dind [32], lorsque le rayonnement solaire frappe une paroi, une partie du flux absorbé peut être transféré vers l'intérieur par conduction à travers la paroi puis par convection et finalement par rayonnement. Le rayonnement solaire absorbé par l'élément est lié au coefficient d'absorption de celui-ci, mais également à la valeur U de l'élément.

Ces travaux montrent que lorsque l'épaisseur d'isolation augmente, les gains solaires au travers de l'élément diminuent considérablement. Cependant, la valeur absolue de ces gains est très faible et ne joue pas un rôle essentiel dans notre analyse.

De plus, pour pouvoir quantifier ces gains, il faudrait impérativement intégrer l'élément de construction dans un bâtiment réel (orientations des éléments de construction, gains solaire, ombrages). Pour ces différentes raisons, ces apports ne seront pas considérés dans l'analyse des EOI.

5.2.2 Considérations sur la différence de température entrant dans le calcul des déperditions

Comme montré dans l'équation (5.5), les déperditions thermiques au travers d'un élément de construction sont fonction de la différence de température entre les deux milieux entourant l'élément. Dans le cas d'un bâtiment, il s'agit de considérer la température intérieure du bâtiment et la température extérieure.

La température extérieure est dépendante du climat dans lequel se trouve le bâtiment. L'analyse présentée dans ce rapport consistant à définir l'épaisseur optimale d'isolation, nécessite de mettre en relation les déperditions thermiques d'un élément de construction avec l'énergie de chauffage consommée par le bâtiment. Ainsi, l'analyse doit considérer la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur durant les périodes de chauffe. Plusieurs approches peuvent être envisagées:

Calcul selon SIA 380/1: Cette approche considère une température moyenne mensuelle par climat. Selon cette norme, les besoins annuels de chaleur pour le chauffage s'obtiennent en additionnant les besoins de chaleur pour le chauffage des mois durant lesquels les déperditions totales de chaleur sont positives. Cette définition tient implicitement compte du bilan global défini dans l'équation (5.5) et englobe, dans son calcul, l'ensemble des pertes du bâtiment ainsi que les gains internes pondérés par le facteur d'utilisation des apports de chaleur (η_g). Dans le cas d'un calcul pour un élément de construction, nous avons vu qu'il est impossible de considérer l'ensemble de ces énergies et que, de ce fait, l'égalité $Q_H = Q_T$ n'est pas respectée. Autrement dit, l'utilisation de la différence de température basée entre la température intérieure et la température extérieure donnée dans la norme SIA 380/1 entraînera une incertitude sur les résultats obtenus.

Calcul selon la méthode des degrés-jours (ou degrés-heure) : Les degrés-jours (ou degrés-heures) permettent de connaître, pour un endroit donné, le nombre de jours (d'heures) où la température extérieure descend au-dessous d'une température conventionnelle de non-chauffage. En effet, dans un bâtiment, il n'est pas nécessaire de chauffer dès que la température extérieure descend au-dessous de la température intérieure. Cette température de non-chauffage n'est pas constante et dépend des conditions climatiques du moment (vent, ensoleillement), du type du bâtiment et des apports de chaleur (internes et solaires). Pour simplifier, la SIA propose trois couples de températures conventionnelles T_i/T_{nc} , à savoir 20/14; 20/12 et 20/10°C.

Tout comme pour la méthode SIA 380/1, il est, dans notre cas, difficile d'appliquer la méthode des degrés-jours, car, la variation d'épaisseur d'isolation dans un élément entraîne une variation de la température de non-chauffage et par conséquent un déséquilibre dans l'équation $Q_H = Q_T$, ceci en fonction de l'épaisseur d'isolant.

Afin d'observer l'influence de cette température de non-chauffage sur les DJ, le graphique de la figure 7 montre l'évolution des DJ pour quelques climats suisses lorsque la température de non-chauffage passe de 10 à 14°C (avec une température intérieure fixée à 20°C). Ce calcul est basé sur la norme SIA 381/3 [33].

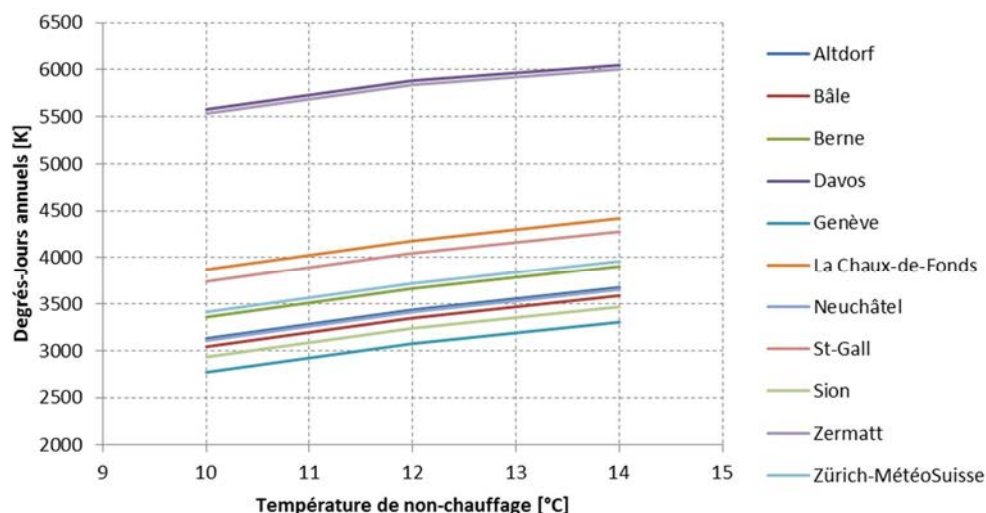


Figure 7: Evolution des DJ annuels pour différents climats en fonction de la température de non-chauffage

Ce graphique montre, que pour la majorité des climats de plaine, une diminution de la température de non-chauffage de 1 K entraîne une diminution d'environ 4% sur la valeur annuelle des degrés-jours. Cette diminution est moins grande pour les climats de montagne (-2%).

Sur la base d'un matériau isolant considéré et défini dans l'annexe 2, un calcul a été fait afin d'observer l'influence de la méthode (SIA 380/1 ou DJ) sur les déperditions thermiques annuelles d'un élément de construction de 1 [m²], ceci pour le climat de Berne. Le graphique de la figure 8 montre l'évolution de ces déperditions en fonction de l'épaisseur d'isolation.

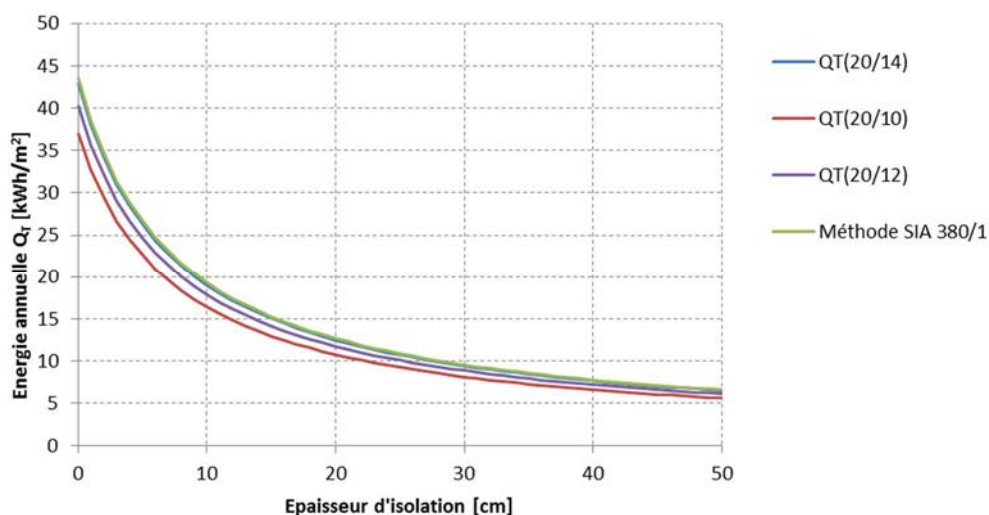


Figure 8: Evolution de l'énergie de déperdition annuelle selon la méthode considérée (élément décrit dans l'annexe 2; climat de berne)

La méthode SIA 380/1 surestime le calcul. En effet, avec cette méthode de calcul, dès que la température descend au-dessous de la température ambiante une énergie de déperdition est totalisée alors que dans la réalité, le chauffage ne sera allumé que lorsque la température est plus basse de plusieurs degrés. La différence observée entre la méthode SIA 380/1 et les degrés-jours 20/12 est de

-7.4%, tandis qu'elle est de -15% avec les DJ 20/10 et de -1.3% avec les DJ 20/14, ceci pour toutes les épaisseurs. Cependant, il est utile de constater que lorsque l'isolation est conséquente, la différence en valeur absolue est relativement faible. Ainsi, les deux méthodes peuvent être utilisées pour la suite de l'analyse. Nous opterons pour la méthode SIA 380/1 en gardant à l'esprit que les résultats devront tenir compte d'une marge d'erreur liée à l'évolution de la température de non-chauffage.

5.2.3 Validation de la méthodologie simplifiée

La méthodologie simplifiée a pu être validée dans le cadre d'un travail de diplôme de la HEIG-VD [34]. Pour se faire, un bâtiment de type villa a été thermiquement modélisé au moyen du logiciel LESOSAI [28]. Les épaisseurs d'isolation ont été modifiées par pas successifs dans les murs et dans la toiture et un calcul thermique a été fait pour chaque itération. Sur la base des besoins énergétiques du bâtiment obtenus par LESOSAI, des surfaces respectives de l'enveloppe et des différents inputs liés à l'isolation (prix et impacts), un calcul a permis de chiffrer les coûts et les impacts de l'isolation du bâtiment pour l'isolation sur une durée de vie de 30 ans. Les épaisseurs des couples d'isolants (mur-toiture) présentant les coûts et les impacts les plus faibles ont été comparées aux valeurs d'EOI obtenus au moyen de la méthodologie simplifiée. De plus, une analyse semblable à celle qui a été réalisée dans le chapitre 5.2 par rapport à l'influence du facteur d'utilisation des gains solaires et des gains internes a été faite sur ce bâtiment.

Les résultats de cette validation sont les suivants:

- Il est cohérent de définir des EOI par éléments séparés. En effet, ces EOI sont les mêmes lorsque l'analyse est faite sur plusieurs éléments en parallèle (bâtiment complet) ou sur plusieurs éléments de façon séparée.
- L'introduction du coefficient κ est nécessaire dans la méthodologie simplifiée. Dans la comparaison effectuée, les EOI coïncident lorsqu'un coefficient κ de 0.9 est utilisé dans l'approche simplifiée, ceci pour toutes les épaisseurs d'isolation. Comme mentionné précédemment, le coefficient κ devrait évoluer avec l'épaisseur d'isolation. Dans notre cas, le fait de considérer une valeur constante tend à minorer légèrement la valeur du Q_H aux petites épaisseurs et au contraire tend à la majorer pour les grandes épaisseurs.
- Un écart de plusieurs centimètres a été observé sur l'EOI des impacts environnementaux. Cependant, cet écart représente, en valeur absolue, une très faible différence selon la méthode (ordre du ‰). Il est montré que plus la pente de l'impact est faible, plus grande devra être la tolérance sur la valeur de l'EOI (le minima se trouvant sur une section très plate).

6 Approches mathématiques pour le calcul des épaisseurs optimales d'isolation (EOI)

6.1 Coût financier

Comme expliqué dans la méthodologie, l'épaisseur optimale d'isolation peut être définie comme étant l'épaisseur qui minimise les coûts totaux liés à la pose (coût d'investissement) et à l'utilisation d'isolation (coût de l'énergie de chauffage) sur la durée de vie du matériau.

6.1.1 Equation générale

Pour définir l'épaisseur optimale d'isolation, plusieurs paramètres doivent être introduits dans le calcul, à savoir :

Coûts liés à la fourniture et à la pose de l'isolant

Coûts liés à la consommation d'énergie de chauffage du bâtiment, ceci en fonction du type de producteur de chaleur et du vecteur énergétique utilisé

Ainsi, il est possible de définir :

- 1) l'équation F_{isol} [Frs] qui exprime le prix de l'isolation en fonction de son épaisseur (y compris le coût lié à la pose)
- 2) l'équation F_{nrj} [Frs] qui exprime le prix de l'énergie finale consommée durant la durée de vie de l'isolation en fonction de son épaisseur. Cette valeur va dépendre :
 - de l'énergie utile nécessaire pour compenser les pertes thermiques de l'élément de construction
 - du rendement de l'installation de production de chaleur
 - du prix de l'énergie (incluant les coûts d'investissement et d'entretien du système producteur de chaleur)
 - de la durée de vie des composants (isolation et installation technique)

Au final, le prix total F_{tot} [Frs] qu'aura coûté l'isolant inclut les deux coûts définis ci-dessus comme le montre l'équation (6.1):

$$F_{tot} = F_{isol} + F_{nrj} \quad (6.1)$$

Avec :

| | | |
|------------|-------------------------------------------------------------------|-------|
| F_{tot} | Prix total payé durant la durée de vie de l'isolation | [Frs] |
| F_{isol} | Prix d'achat de l'isolation (fourniture et pose) | [Frs] |
| F_{nrj} | Prix de l'énergie nécessaire pour compenser les pertes thermiques | [Frs] |

6.1.1.1 Prix du matériau en fonction de l'épaisseur (F_{isol})

Le calcul du prix de l'isolation dépend de l'épaisseur de cette dernière. Les fabricants donnent en général le prix de l'isolant par mètre carré, pour les épaisseurs livrables. Cependant, afin d'être complet, il est nécessaire d'ajouter au coût de la matière seule, les coûts de pose et les coûts inhérents au type d'isolant.

Ainsi, la détermination de F_{isol} peut se faire au moyen de l'équation (6.2) qui se compose d'un terme fixe et d'un terme variable lié à l'épaisseur d'isolation :

$$F_{isol} = F_{fixe} + F_{mat} \cdot e_{isol} \cdot S \quad (6.2)$$

Avec :

| | | |
|------------|--------------------------------------------------|-----------------------|
| F_{isol} | Prix d'achat de l'isolation (fourniture et pose) | [Frs] |
| F_{fixe} | Frais fixes liés à la pose de l'isolation | [Frs] |
| F_{mat} | Prix volumique du matériau isolant | [Frs/m ³] |
| e_{isol} | Epaisseur de l'isolation | [m] |
| S | Surface de l'isolation | [m ²] |

6.1.1.2 Prix de l'énergie utile pour compenser les pertes thermiques (F_{nrj})

Sur la base de l'équation (6.1) et des considérations faites dans le chapitre 5, il a été vu que pour un bâtiment complet l'énergie de chauffage Q_h est fonction des pertes du bâtiment et des apports de chaleur "gratuits" pondérés par un facteur d'utilisation (η_g). Le facteur d'utilisation varie selon le type de bâtiment (construction massive ou légère), la forme du bâtiment, les apports solaires et les apports internes. Ainsi, il a été vu que pour un même bâtiment, le gain obtenu par une augmentation de l'épaisseur d'isolation (diminution des déperditions Q_T) n'est pas équivalent au gain obtenu sur l'énergie de chauffage Q_h . La considération d'un mètre carré d'un élément de construction (sans tenir compte d'un bâtiment dans son ensemble) doit également prendre en considération cet état de fait. Ainsi, comme le montre l'équation (6.3), un coefficient appelé " κ " est introduit et permet de tenir compte de ce phénomène:

Ainsi, l'équation (6.3) peut être définie par :

$$Q_h = Q_T \cdot \kappa \quad (6.3)$$

Avec :

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-------|
| Q_h | Besoins de chaleur pour le chauffage | [kWh] |
| Q_T | Déperditions par transmission | [kWh] |
| κ | Coefficient intégrant le facteur d'utilisation des gains de chaleur | [-] |

Le prix de l'énergie nécessaire à compenser les pertes thermiques à travers l'élément durant la vie de l'élément est donné par:

$$F_{nrj} = \frac{Q_T \cdot \kappa}{\eta_{prod}} \cdot F_{vec}^{finale} \cdot D_V \quad (6.4)$$

ou

$$F_{nrj} = Q_{utile} \cdot F_{vec}^{utile} \cdot D_V \quad (6.5)$$

Avec :

| | | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| F_{nrj} | Prix de l'énergie de chauffage pour compenser les déperditions thermiques tout au long de la durée de vie du matériau | [Frs] |
| Q_T | Déperditions par transmission | [kWh] |
| κ | Coefficient intégrant le facteur d'utilisation des gains de chaleur | [-] |
| Q_{utile} | Energie utile pour compenser les pertes thermiques annuelles | [kWh] |
| η_{prod} | Rendement de l'installation de production de chaleur | [-] |
| F_{vec}^{utile} | Prix du vecteur énergétique consommé (énergie utile) | [Frs/kWh] |
| F_{vec}^{finale} | Prix du vecteur énergétique consommé (énergie finale) | [Frs/kWh] |
| D_V | Durée de vie de l'isolant | [an] |

La combinaison de cette dernière équation avec les Eq. (5.3) et (5.4) permet d'obtenir le prix de l'énergie nécessaire pour compenser les pertes thermiques F_{nrj} :

$$F_{nrj} = \left(\frac{1}{R_{si} + R_{tot-isol} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + R_{se}} \right) \frac{S \cdot DJ_{SIA} \cdot 24}{1'000} \cdot \kappa \cdot F_{vec}^{utile} \cdot D_v \quad (6.6)$$

6.1.1 Optimum financier de l'épaisseur d'isolation

L'optimum financier s'obtient en sommant les équations (6.2) et (6.6) et en cherchant le point minimal de la résultante (cf. Figure 2). Mathématiquement, l'épaisseur optimale d'isolation est donnée par e_{opt}^{fin}

$$\left(\frac{dF_{tot}}{de_{isol}} \right)_{e_{opt}^{fin}} = \left(\frac{d(F_{isol} + F_{nrj})}{de_{isol}} \right)_{e_{opt}^{fin}} = 0 \quad (6.7)$$

Or

$$\frac{dF_{tot}}{de_{isol}} = \frac{d}{de_{isol}} \left(F_{fixe} + F_{mat} \cdot e_{isol} \cdot S + \left(\frac{1}{R_{si} + R_{tot-isol} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + R_{se}} \right) \frac{S \cdot DJ_{SIA} \cdot 24}{1'000} \cdot \kappa \cdot F_{vec}^{utile} \cdot D_v \right) \quad (6.8)$$

soit

$$\frac{dF_{tot}}{de_{isol}} = 0 + F_{mat} \cdot S + \frac{d}{de_{isol}} \left(\left(\frac{1}{R_{si} + R_{tot-isol} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + R_{se}} \right) \frac{S \cdot DJ_{SIA} \cdot 24}{1'000} \cdot \kappa \cdot F_{vec}^{utile} \cdot D_v \right) \quad (6.9)$$

Pour simplifier l'écriture, il est possible de poser les deux constantes suivantes:

$$\alpha = \frac{S \cdot DJ_{SIA} \cdot 24}{1'000} \cdot \kappa \cdot F_{vec}^{utile} \cdot D_v \quad \beta = R_{si} + R_{tot-isol} + R_{se} \quad (6.10)$$

L'équation (6.9) se réécrit :

$$\frac{dF_{tot}}{de_{isol}} = F_{mat} \cdot S + \frac{d}{de_{isol}} \left(\frac{\alpha}{\frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + \beta} \right) = F_{mat} \cdot S + \alpha \lambda_{isol} \frac{d}{de_{isol}} \left(\frac{1}{e_{isol} + \beta \lambda_{isol}} \right) \quad (6.11)$$

En utilisant la propriété des dérivées:

$$\left(\frac{1}{f(x)} \right)' = (f(x)^{-1})' = -1 f(x)^{-2} f'(x) \quad (6.12)$$

L'équation (6.11) se réécrit:

$$\frac{dF_{tot}}{de_{isol}} = F_{mat} \cdot S - \alpha \lambda_{isol} (e_{isol} + \beta \lambda_{isol})^{-2} \frac{d}{de_{isol}} (e_{isol} + \beta \lambda_{isol}) \quad (6.13)$$

Sachant que:

$$\frac{d}{de_{isol}} (e_{isol} + \beta \lambda_{isol}) = \frac{d}{de_{isol}} e_{isol} + \frac{d}{de_{isol}} \beta \lambda_{isol} = 1 + 0 = 1 \quad (6.14)$$

Il vient que,

$$\frac{dF_{tot}}{de_{isol}} = F_{mat} \cdot S - \alpha \lambda_{isol} (e_{isol} + \beta \lambda_{isol})^{-2} \quad (6.15)$$

$$\left(\frac{dF_{tot}}{de_{isol}} \right)_{e_{opt}} = 0$$

Ainsi l'optimum est donné par la résolution de l'équation

Ce qui donne:

$$F_{mat} \cdot S - \alpha \lambda_{isol} (e_{opt} + \beta \lambda_{isol})^{-2} = 0 \quad (6.16)$$

Après résolution, l'épaisseur optimale est donnée par

$$e_{opt} = \sqrt{\frac{\alpha \lambda_{isol}}{F_{mat} \cdot S}} - \beta \lambda_{isol} \quad (6.17)$$

En réinjectant les expressions de α et β dans (6.17), l'épaisseur d'isolation optimale est donnée par l'équation (6.18):

| | |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Optimum financier | $e_{opt}^{fin} = \sqrt{\frac{DJ_{SIA} \cdot 24 \cdot \kappa \cdot F_{vec}^{utile} \cdot D_v \cdot \lambda_{isol}}{1'000 F_{mat}}} - (R_{si} + R_{tot-isol} + R_{se}) \lambda_{isol} \quad (6.18)$ |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Avec :

DJ_{SIA} Différence de température entre l'extérieur et l'intérieur pour le climat considéré multiplié par la

durée considérée défini par $\sum_{j=1}^{12} \left\{ (T_{i,j}^i - \bar{T}_{e,j}^i) n^i \right\} \quad [K \cdot j]$

| | | |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| e_{opt}^{fin} | Epaisseur optimale financière de l'isolant | [m] |
| κ | Coefficient intégrant le facteur d'utilisation des gains de chaleur | [-] |
| F_{vec}^{utile} | Prix du vecteur énergétique consommé (énergie utile) | [Frs/kWh] |
| D_v | Durée de vie de l'isolant | [an] |
| $R_{tot-isol}$ | Résistance des matériaux autre que l'isolation | [m²K/W] |
| R_{si} | Résistance superficielle interne | [m²K/W] |
| R_{se} | Résistance superficielle externe | [m²K/W] |
| λ_{isol} | Coefficient de conduction du composant | [W/m·K] |

L'analyse de l'équation (6.18) permet de montrer que :

- Plus le climat est chaud (DJ_{SIA} petit), plus e_{opt} est petite
- Plus le prix de l'énergie F_{vec} est élevé, plus e_{opt} est grande
- Plus le prix de l'isolant F_{mat} est faible, plus e_{opt} est grande
- Plus la durée de vie de l'isolant D_v est longue, plus e_{opt} est grande
- Le prix de pose de l'isolant n'intervient pas dans le calcul

6.2 Impact environnemental

L'approche mathématique est similaire à celle utilisée pour déterminer l'optimum financier.

L'épaisseur optimale d'isolation peut être définie comme étant l'épaisseur qui minimise les impacts liés à la pose d'isolant et à son utilisation (impacts liés à l'énergie de chauffage), ceci sur la durée de vie du matériau.

Remarque: Dans ce chapitre, les unités des impacts environnementaux ($[kg\ CO_2_{eq}]$, $[MJ]$) sont représentées de manière générique par $[Imp]$.

6.2.1 Equation générale

Pour définir l'épaisseur optimale d'isolation du point de vue environnemental, plusieurs paramètres doivent être introduits dans le calcul, à savoir :

Impacts liés à la fourniture et à la pose de l'isolant

Impacts liés à la consommation d'énergie de chauffage du bâtiment, ceci en fonction du type de producteur de chaleur et du vecteur énergétique utilisé

Ainsi, il est possible de définir:

- 1) l'équation I_{isol} $[Imp]$ qui exprime l'impact de l'isolation en fonction de son épaisseur (y compris l'impact lié à la pose).
- 2) l'équation I_{nrj} $[Imp]$ qui exprime l'impact de l'énergie finale consommée durant la durée de vie de l'isolation en fonction de son épaisseur. Cette valeur va dépendre :
 - de l'énergie utile nécessaire pour compenser les pertes thermiques de l'élément de construction
 - du rendement de l'installation de production de chaleur
 - de l'impact du vecteur énergétique de l'énergie
 - de la durée de vie des composants (isolation et installations techniques)

Au final, l'impact total I_{tot} $[Imp]$ du matériau isolant inclut les deux impacts définis ci-dessus comme montré dans l'équation (6.19):

$$I_{tot} = I_{isol} + I_{nrj} \quad (6.19)$$

Avec :

| | | |
|------------|-----------------------------------------------------------------------|---------|
| I_{tot} | Impact total durant la durée de vie de l'isolant (matériau + énergie) | $[Imp]$ |
| I_{isol} | Impact de l'isolation (fourniture et pose) | $[Imp]$ |
| I_{nrj} | Impact de l'énergie nécessaire pour compenser les pertes thermiques | $[Imp]$ |

6.2.1.1 Impacts environnementaux de l'isolant

L'impact environnemental de l'isolant se décompose en une partie liée à la pose de l'isolant et en une partie liée au matériau isolant.

La base de données KBOB [22] sera utilisée pour définir ces différents impacts.

L'équation (6.19) définit l'équation utilisée pour définir ces impacts :

$$I_{isol} = FI_{pose} + FI_{isol} \cdot m_{isol} = FI_{isol} \cdot \rho_{isol} \cdot e_{isol} \cdot S \quad (6.20)$$

Avec :

| | | |
|---------------|--------------------------------------------|----------------------|
| I_{isol} | Impacts de l'isolation | [Imp] |
| FI_{pose} | Facteur d'impact lié à la pose du matériau | [Imp] |
| FI_{isol} | Facteur d'impact du matériau | [Imp/kg] |
| m_{isol} | Masse du matériau | [kg] |
| ρ_{isol} | Masse volumique | [kg/m ³] |
| e_{isol} | Epaisseur de l'isolation | [m] |
| S | Surface de l'isolation | [m ²] |

6.2.1.2 Impacts environnementaux de l'énergie

Tout comme présenté dans le chapitre 6.1.1.2, les impacts liés à la consommation d'énergie peuvent être définis comme étant:

$$I_{nrj} = \left(\frac{1}{R_{si} + R_{tot-isol} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + R_{se}} \right) \cdot \frac{S \cdot DJ_{SIA} \cdot 24}{1'000} \cdot \kappa \cdot FI_{vec}^{utile} \cdot D_v \quad (6.21)$$

Avec :

| | | |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| I_{nrj} | Impacts liés aux pertes thermiques pendant la durée de vie de l'isolant | [Imp] |
| e_{isol} | Epaisseur de l'isolation | [m] |
| λ_{isol} | Conductibilité thermique de l'isolant | [W/m·K] |
| $R_{tot-isol}$ | Résistance thermique des matériaux de l'élément sans l'isolant | [m ² ·K/W] |
| R_{si} | Résistance superficielle intérieure | [m ² ·K/W] |
| R_{se} | Résistance superficielle extérieure | [m ² ·K/W] |
| FI_{vec}^{utile} | Facteur d'impact du vecteur d'énergie (énergie utile) | [Imp/MJ] |
| κ | Coefficient intégrant le facteur d'utilisation des gains de chaleur | [-] |
| D_v | Durée de vie de l'isolant | [an] |
| DJ_{SIA} | Différence de température entre l'extérieur et l'intérieur pour le climat considéré multiplié par la durée considérée défini par $\sum_{j=1}^{12} \left\{ \left(T_i^j - \bar{T}_{e,j} \right) n^j \right\}$ | [K·j] |

6.2.2 Optimum environnemental de l'épaisseur d'isolation

La définition de l'optimum environnemental s'obtient de la même façon que démontré dans le chapitre 6.1.1 et peut s'écrire :

$$\left. \frac{dI_{tot}}{de_{isol}} \right|_{e_{opt}^{env}} = \left. \frac{d(I_{isol} + I_{nrj})}{de_{isol}} \right|_{e_{opt}^{env}} = 0 \quad (6.22)$$

Avec :

$$\frac{dI_{tot}}{de_{isol}} = FI_{pose} + FI_{isol} \cdot \rho_{isol} \cdot S + \frac{d}{de_{isol}} \left(\left(\frac{1}{R_{si} + R_{tot-isol} + \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + R_{se}} \right) \frac{S \cdot DJ_{SIA} \cdot 24}{1'000} \cdot \kappa \cdot FI_{vec}^{utile} \cdot D_v \right) \quad (6.23)$$

Après dérivation, l'optimum environnemental s'écrit:

$$\text{Optimum environnemental} \quad e_{opt}^{env} = \sqrt{\frac{DJ_{SIA} \cdot 24 \cdot \kappa \cdot FI_{vec}^{utile} \cdot D_v \cdot \lambda_{isol}}{1'000 \cdot FI_{isol} \cdot \rho_{isol}}} - (R_{si} + R_{tot-isol} + R_{se}) \lambda_{isol} \quad (6.24)$$

Avec :

| | | |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| e_{opt}^{env} | Epaisseur optimale environnementale de l'isolant | [m] |
| κ | Coefficient intégrant le facteur d'utilisation des gains de chaleur | [-] |
| FI_{vec}^{utile} | Impact du vecteur énergétique consommé (énergie utile) | [Imp/kWh] |
| D_v | Durée de vie de l'isolant | [an] |
| $R_{tot-isol}$ | Résistance des matériaux autre que l'isolation | [m²K/W] |
| R_{si} | Résistance superficielle interne | [m²K/W] |
| R_{se} | Résistance superficielle externe | [m²K/W] |
| λ_{isol} | Coefficient de conduction du composant | [W/m·K] |

L'analyse de l'équation (6.24) permet de montrer que :

- Plus le climat est chaud (DJ petit), plus e_{opt} est petite
- Plus les impacts liés à l'énergie FI_{vec} sont élevés, plus e_{opt} est grande
- Plus l'impact de l'isolant FI_{mat} est faible, plus e_{opt} est grande
- Plus la durée de vie de l'isolant D_v est longue, plus e_{opt} est grande
- L'impact lié à la pose de l'isolation n'intervient pas dans le calcul

7 Cas d'application : Hypothèses

7.1 Paramètres d'entrée

7.1.1 Type de bâtiment

Le bâtiment considéré est une villa. Ainsi, les prix introduits pour les matériaux isolants correspondent à des volumes d'achat relativement faibles. Selon certains professionnels de la construction [35], dans le cas d'achat de plus grands volumes d'isolant, les coûts utilisés pour la fourniture et la pose de l'isolation pourraient être diminués de 7% par rapport aux prix utilisés dans le cas d'une villa.

7.1.2 Climat

L'analyse effectuée se limite à un climat du plateau suisse, à savoir Berne; la température intérieure du bâtiment est fixée à 20°C.

Une analyse de sensibilité sur un élément de construction est présentée pour trois autres climats (Lugano, La Chaux-de-Fonds et Davos).

7.1.3 Vecteur énergétique

Les vecteurs énergétiques considérés, correspondant à différents systèmes de chauffage, sont:

- Electricité
- Gaz naturel
- Mazout
- PAC air-eau (AE)
- Pellets

7.1.3.1 Coûts des systèmes de chauffage

Le prix de l'énergie est un paramètre très variable qui prend en compte de nombreuses hypothèses. Dans l'idéal, le prix à considérer doit inclure l'ensemble des coûts de l'énergie consommée, mais également de l'installation de production de chaleur en incluant, l'investissement, l'entretien, les taxes (p. ex. TVA, taxe CO₂), etc. Ces différents coûts varient d'un bâtiment à l'autre, d'un endroit à l'autre, des conditions d'emprunts du propriétaire et surtout de la variation du coût de l'énergie. Lors de travaux de rénovations, ils dépendent également du bâti existant et des systèmes énergétiques présents. Par exemple, le remplacement d'un chauffage électrique direct par un chauffage à gaz ou à pellets entraîne la mise en place d'un nouveau réseau de distribution. A l'inverse, si la distribution est déjà en place, lors de travaux de rénovations, il ne sera pas forcément nécessaire de la déposer^[1]. Ce type de contraintes spécifiques à la rénovation et leur influence sur les résultats fera l'objet d'une analyse de sensibilité.

Les coûts considérés pour chaque système de chauffage dans cette étude sont tirés des résultats obtenus dans le WP3 du projet ECO-Réno [36], maison située à Savigny. Ces coûts tiennent compte :

- des coûts liés à l'installation de chauffage intégrant le raccordement, le stockage, et le local technique
- des coûts de l'énergie et de la taxe CO₂
- des coûts liés à l'entretien.

^[1] Par exemple, dans le WP3 du projet ECO-Réno [36], plusieurs scénarios de rénovations ont été analysés pour rénover des bâtiments d'habitation disposant de chauffage électrique direct. Le coût et les impacts de certains systèmes de chauffage (mazout, gaz ou pellets), nécessitant d'installer une nouvelle distribution (tuyaux, canalisations etc.) se trouvent fortement augmentés par unité d'énergie en raison du coût de cette distribution.

Ces coûts sont annualisés sur la durée de vie considérée. Le coût total (somme des coûts liés à l'installation de chauffage et au vecteur énergétique), exprimé en [CHF/kWh_{utile}], intègre également l'augmentation des coûts de l'énergie selon la norme SIA 480; ces coûts sont exprimés TTC (valeur considérée de la TVA 8%).

Le passage des coûts exprimé en énergie finale dans les calculs du rapport WP3 en énergie utile pour cette étude s'est basé sur les rendements et coefficients de performance des installations techniques de la norme SIA 2040 [37]. Le tableau 3 présente les hypothèses retenues.

| Système de production de chaleur | Electricité | Gaz | Mazout | PAC Air/eau | Pellets |
|----------------------------------|-------------|------|--------|-------------|---------|
| Rendement [-] | 1.00 | 0.90 | 0.90 | - | 0.75 |
| COP [-] | | | | 3.3 | |

Tableau 3: Rendement et coefficient de performance considérés pour les cinq systèmes de chauffage selon la norme SIA 2040 [37]

Le tableau 4 présente les coûts retenus dans cette étude :

| Système de production de chaleur | Electricité | Gaz | Mazout | PAC air/eau | Pellets |
|--------------------------------------|-------------|------|--------|-------------|---------|
| Coûts en [Frs/kWh _{utile}] | 0.22 | 0.29 | 0.37 | 0.21 | 0.33 |

Tableau 4: Coût du kilowattheure utile pour les cinq systèmes de chauffage

7.1.3.1 Impacts environnementaux des systèmes de chauffage

Les valeurs d'impact pour la consommation d'énergie et la production de chaleur se basent également sur les résultats obtenus dans le WP3 du projet ECO-Réno [36]. Ces valeurs considèrent les impacts liés à la production de chaleur et à la consommation d'énergie. Le tableau 5 présente les valeurs considérées selon le système de chauffage :

| Vecteur | CED _{TOT} [MJ/kWh _u ·an] | CED _{NRE} [MJ/kWh _u ·an] | GWP [kgCO ₂ _eq/kWh _u ·an] |
|-------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Electricité | 11.2 | 9.7 | 0.16 |
| Gaz | 4.9 | 4.8 | 0.29 |
| Mazout | 5.4 | 5.3 | 0.35 |
| PAC AE | 3.6 | 3.1 | 0.058 |
| Pellets | 6.1 | 1.2 | 0.062 |

Tableau 5: Valeurs d'impacts considérées pour les cinq systèmes de chauffage par kilowattheure utile

7.1.4 Durée de vie de l'élément

Dans le domaine de la construction, la norme SIA 2032 [38] définit les durées de vie selon le type d'installation :

- Enveloppe du bâtiment : 30 (à 40) ans
- Installation de chauffage : 20 ans
- Distribution de chaleur : 30 ans

Ces différentes durées de vie sont introduites dans les calculs selon le besoin. La durée de l'isolation correspond à la durée de vie de l'enveloppe du bâtiment alors que les durées de vie correspondant aux installations de production et de distribution de chaleur interviennent dans le calcul du coût de l'énergie.

L'analyse considère une durée de vie de 30 ans pour tous les types d'isolants.

7.1.5 Eléments de fixation

Le cas des fixations d'isolation est particulier. Lorsque la valeur du pont thermique d'un matériau de fixation n'est pas mentionnée, le calcul considérera les valeurs présentées dans la figure 9 :

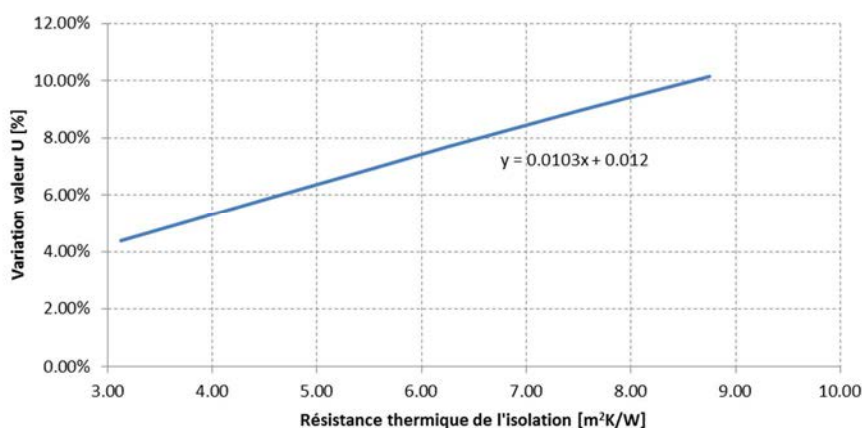


Figure 9: Augmentation de la valeur U d'un élément en fonction de la résistance de l'isolation liée aux fixations de l'isolation – 3 vis par m² [39]

Afin de valider l'équation présentée ci-dessus, une analyse a été effectuée au moyen du logiciel U-Sai [40] sur un élément de construction de type façade ventilée avec une isolation en laine de pierre. Le graphique de la figure 10 montre l'évolution du coefficient U de la façade avec :

- Courbe bleue : calcul U-Sai sans élément de fixation
- Courbe rouge : calcul U-Sai avec élément de fixation
- Courbe verte : calcul effectuée au moyen de l'équation présentée dans la Figure 9.

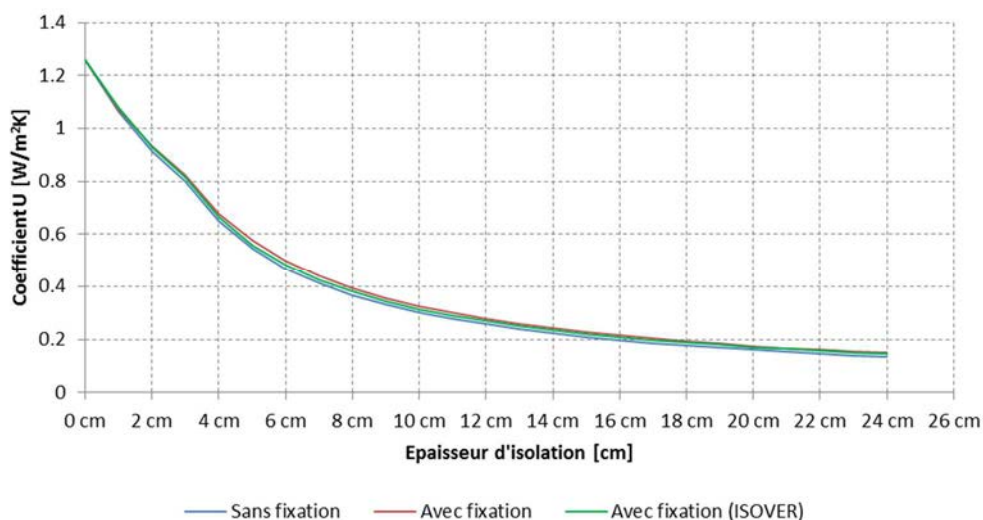


Figure 10: Comparaison de la valeur U définie par U-sai et par une équation donnée par ISOVER dans la prise en compte des fixations de l'isolation – façade ventilée, laine de pierre

Ce graphique montre que les résultats obtenus sont très proches selon la méthode utilisée et que la différence observée s'atténue avec l'augmentation de l'épaisseur d'isolation.

Dans la suite de l'analyse, lorsque l'élément de construction est de type homogène, l'équation sera considérée alors que pour les éléments de construction inhomogènes (éléments pour lesquels le coefficient U est calculé par U-Sai), les fixations seront directement intégrées au calcul dans U-Sai.

7.1.6 Éléments de construction

Quatre éléments de construction typiques sont considérés pour l'analyse, il s'agit de deux façades et de deux toitures. Les compositions de ces éléments ont été choisies afin d'être représentatif d'éléments couramment rencontrés dans les constructions en Suisse. Les paragraphes suivants décrivent les différentes données d'entrées considérées pour ces éléments.

7.1.6.1 Coûts des isolants

L'ensemble des prix des isolants a été fourni à partir d'échanges avec des professionnels du domaine des isolants [35]. Ces prix se composent de la fourniture et de la pose de l'isolant, ceci pour des épaisseurs actuellement réalisables. Des extrapolations sur les coûts ont été réalisées pour les épaisseurs plus grandes, même si, selon les cas, la réalisation ne peut être envisagée.

7.1.6.2 Façade compacte

Composition

La façade compacte étudiée est un mur extérieur de construction homogène. La composition de cet élément est représentée dans la figure 11 et décrite dans le tableau 6 :

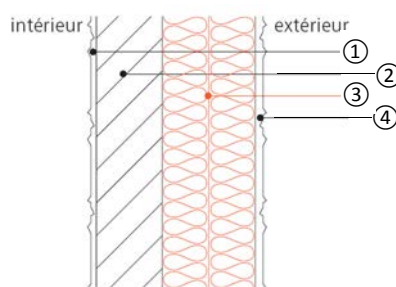


Figure 11: Composition de la façade compacte, tiré de [41]

| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conduction thermique [W/(m·K)] | Résistance [(m²·K)/W] |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | Crépi intérieur | 2.0 | 0.70 | 0.029 |
| 2 | Brique terre cuite | 17.5 | 0.35 | 0.50 |
| 3 | Isolation thermique | <i>variable</i> | <i>variable</i> | <i>variable</i> |
| 4 | Enduit de mortier | 2.0 | 0.87 | 0.023 |

Tableau 6: Description de la façade compacte

Type d'isolants

Les isolants considérés pour la façade compacte sont recensés dans le tableau 7 :

| Isolant | Fournisseur | Type | Epaisseurs commercialisées [mm] | Conductivité thermique [W/m·K] | Masse volumique [kg/m³] |
|-----------------|-----------------|----------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| EPS | <i>swisspor</i> | swissporLambda Façade 030 ¹ | 20-400 | 0.030 | 18 |
| Laine de pierre | <i>swisspor</i> | swissporROC Façade ² | 60-200 | 0.036 | 120 |

Tableau 7: Isolants considérés pour la façade compacte

¹ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=233>

² <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=188>

Valeur U

Le graphique de la figure 12 donne l'évolution du coefficient de transmission thermique U pour la façade compacte, ceci pour chaque type d'isolant.

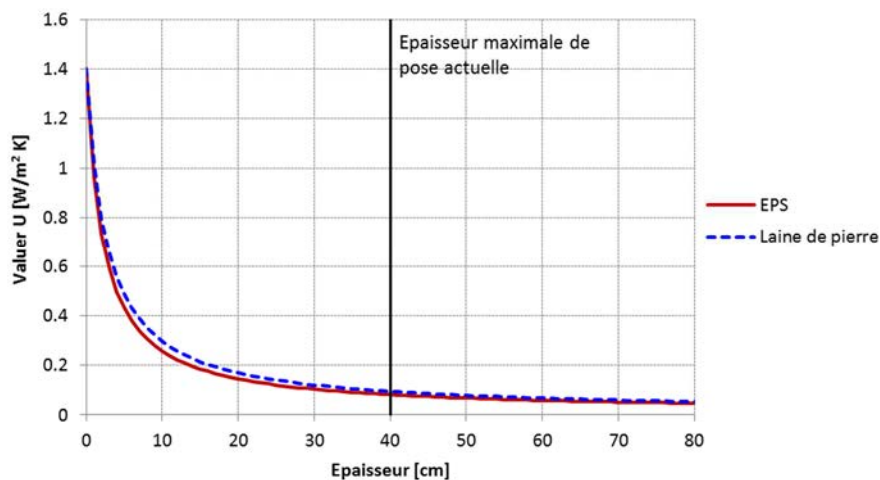


Figure 12: Evolution du coefficient de transmission U pour la façade compacte en fonction de l'épaisseur d'isolant

Coût des isolants considérés

Le coût considéré pour la fourniture et la pose des isolants de la façade compacte a été fourni à la suite d'échanges avec des professionnels du domaine des isolants [35]. Ces coûts sont représentés dans le graphique de la figure 13.

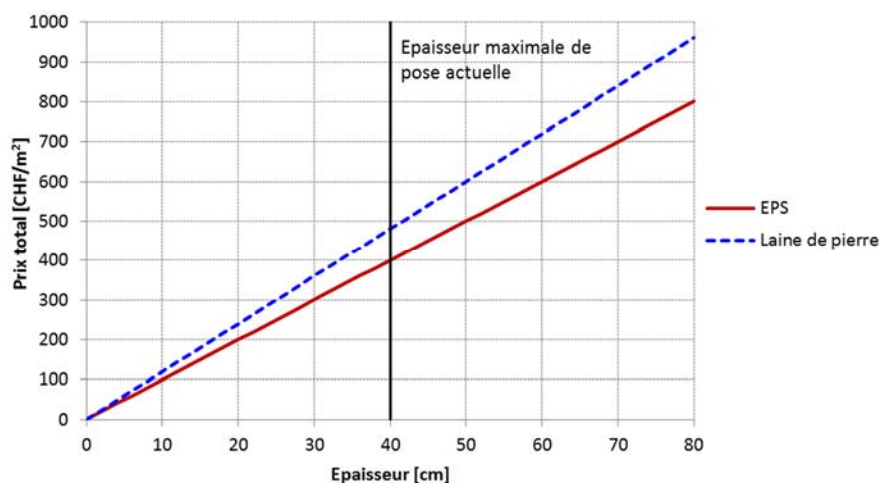


Figure 13: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la façade compacte en fonction de l'épaisseur (prix HT, déterminé suite à des échanges avec des professionnels du domaine des isolants [35])

Selon ces professionnels [35], ce type d'isolation se pose uniquement en une couche et des épaisseurs maximales de 40 [cm] sont possibles à réaliser.

Valeur d'impacts des isolants considérés

Les valeurs d'impact pour les isolants ont été tirées de la base de données KBOB [22] et se trouvent dans le tableau 8.

| Isolant | CED _{TOT} [MJ/kg] | CED _{NRE} [MJ/kg] | GWP [kgCO ₂ _eq/kg] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| EPS | 106 | 105 | 7.36 |
| Laine de pierre | 16.9 | 15.2 | 1.04 |

Tableau 8: Valeurs d'impacts pour les isolants de la façade compacte [22].

Seuls les impacts du matériau sont pris en considération.

7.1.6.3 Façade ventilée**Composition**

La façade ventilée considérée est un mur extérieur de construction inhomogène. La composition de cet élément est représentée dans la figure 14 et décrite dans le tableau 9 :

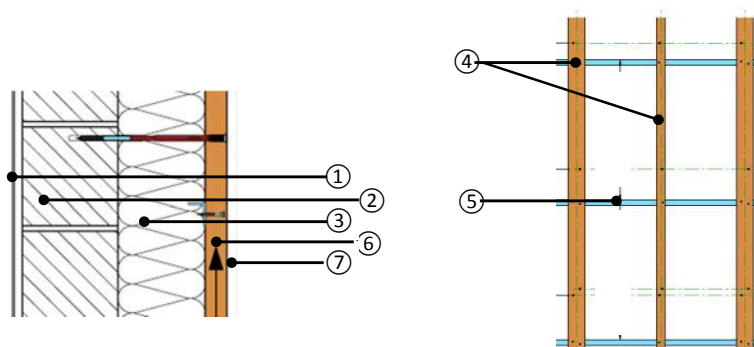


Figure 14: Composition de la façade ventilée, à gauche vue en coupe, à droite vue de face, tiré de [42]

| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conduction thermique [W/(m·K)] | Résistance [(m²·K)/W] |
|-----------|-----------------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | Enduit de mortier intérieur | 2.0 | 0.7 | 0.029 |
| 2 | Brique terre cuite | 17.5 | 0.35 | 0.50 |
| 3 | Isolation thermique | <i>variable</i> | <i>variable</i> | <i>variable</i> |
| 4 | Lambris de bois | 3.0 | 0.13 | - |
| 5 | Profil en aluminium | 3.0 | 200 | - |
| 6 | Lame d'air ventilée | 3.0 | 0.166 | 0 |
| 7 | Revêtement extérieur | 0.8 | 0.48 | 0 |

Tableau 9: Description de la façade ventilée

Type d'isolants

Les isolants considérés pour la façade ventilée sont recensés dans le tableau 7 :

| Isolant | Fournisseur | Type | Epaisseurs commercialisées [mm] | Conductivité thermique [W/m·K] | Masse volumique [kg/m³] |
|-----------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| EPS graphité | <i>swisspor</i> | swissporLAMBDA Vento ³ | 60-320 | 0.031 | 15 |
| Laine de pierre | <i>Flumroc</i> | Flumroc DUO ⁴ | 60-220 | 0.034 | 48 |
| Laine de verre | <i>Isover</i> | PBF extra 032 ⁵ | 100-200 | 0.032 | 29 |

Tableau 10: Isolants considérés pour la façade ventilée

Valeur U

Le graphique suivant donne l'évolution du coefficient de transmission thermique U pour la façade ventilée considérée, ceci pour chaque type d'isolant. Ces coefficients U ont été définis au moyen du logiciel U-Sai [40]. Un calcul d'élément inhomogène a été effectué et les fixations ont été intégrées au calcul.

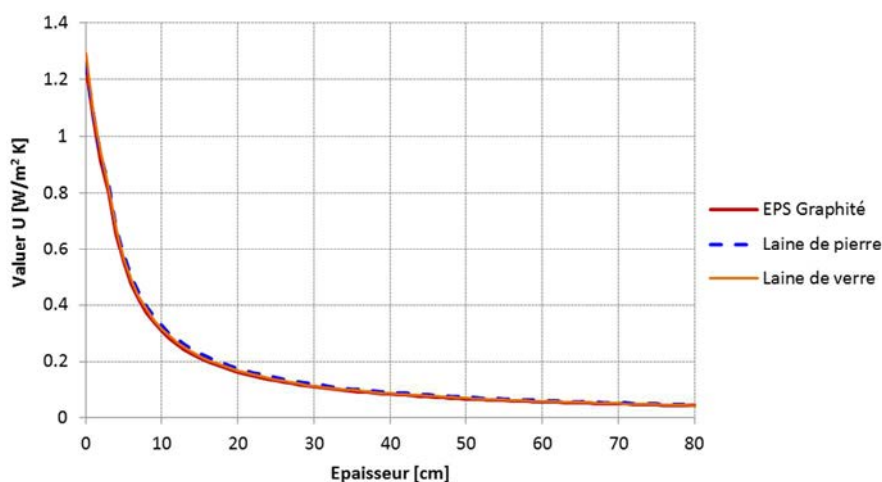


Figure 15: Evolution du coefficient de transmission U pour la façade ventilée en fonction de l'épaisseur d'isolant

³ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=61>

⁴ <http://www.flumroc.ch/fr/produkte/content.php?id=6&lid=1&lbez=B105#>

⁵ <http://www.isover.ch/murs/story17654/product4282.html>

Coût des isolants considérés

Le coût considéré pour la fourniture et la pose des isolants de la façade ventilée a été fourni par des professionnels du domaine des isolants [35]. Ces coûts sont représentés dans le graphique de la figure 16.

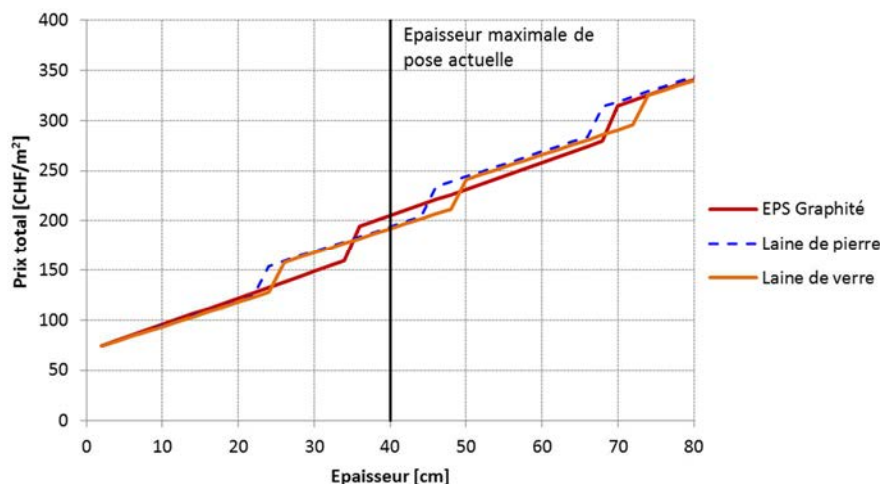


Figure 16: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la façade ventilée en fonction de l'épaisseur (prix HT, déterminé suite à des échanges avec des professionnels des isolants [35])

Pour cet élément, le prix correspond à la fourniture de l'isolation, à sa pose et au frais inhérent à la fixation et au lattage nécessaire à faire tenir l'isolation. Les sauts observés correspondent à l'augmentation du prix de pose lié à la pose de panneaux d'isolation supplémentaires. Une épaisseur de 40 [cm] correspond à l'épaisseur actuellement maximale de pose.

Valeur d'impacts des isolants considérés

Les valeurs d'impact pour les isolants de la façade ventilée ont été tirées de la base de données KBOB [22] et se trouvent dans le tableau 11.

| Isolant | CED _{TOT} [MJ/kg] | CED _{NRE} [MJ/kg] | GWP [kgCO ₂ _eq/kg] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| EPS graphité | 106 | 105 | 7.36 |
| Laine de pierre | 16.9 | 15.2 | 1.04 |

Tableau 11: Valeurs d'impacts pour les isolants de la façade ventilée [22].

Seuls les impacts du matériau sont pris en considération.

7.1.6.4 Toiture plate

Composition

La toiture plate considérée est un élément de construction homogène. La composition de cet élément est représentée dans la figure 17 et est décrite dans le tableau 12 :

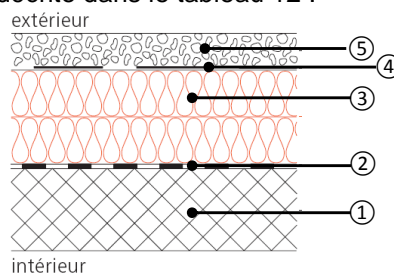


Figure 17: Composition de la toiture plate, tiré de [41]

| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conduction thermique [W/(m·K)] | Résistance [(m²·K)/W] |
|-----------|--------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | Béton armé | 30.0 | 1.8 | 0.167 |
| 2 | Pare-vapeur | 0.3 | 0.2 | 0.001 |
| 3 | Isolation thermique | <i>variable</i> | <i>variable</i> | <i>variable</i> |
| 4 | Etanchéité | 0.7 | 0.23 | 0.009 |
| 5 | Couche de protection, sable gravier pour toiture | 5.0 | 0.7 | 0.071 |

Tableau 12: Description de la toiture plate

Type d'isolants

Les isolants considérés pour la toiture plate sont recensés dans le tableau 13 :

| Isolant | Fournisseur | Type | Epaisseurs commercialisées [mm] | Conductivité thermique [W/m·K] | Masse volumique [kg/m³] |
|------------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| PUR Voile | swisspor | swissporPUR Voile ⁶ | 20-280 | 0.025 | 30 |
| PUR ALU | swisspor | swissporPUR Alu ⁷ | 20-280 | 0.022 | 30 |
| PUR Premium | swisspor | swissporPUR Premium ⁸ | 20-200 | 0.020 | 30 |
| Laine de pierre | swisspor | swissporROC type 150 ⁹ | 60-200 | 0.040 | 150 |
| EPS 150 ECO | swisspor | swissporEPS150 Eco ¹⁰ | 100-300 | 0.033 | 26 |
| EPS Graphité | swisspor | swissporLAMBDA Roof ¹¹ | 50-300 | 0.029 | 25 |
| Verre cellulaire | Foamglas | Foamglas S3 ¹² | 40-180 | 0.045 | 130 |

Tableau 13: Isolants considérés pour la toiture plate

Valeur U

Le graphique de la figure 18 donne l'évolution du coefficient de transmission thermique U pour la toiture plate considérée, ceci pour chaque type d'isolant. Un calcul d'élément homogène a été effectué.

⁶ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=56>

⁷ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=57>

⁸ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=205>

⁹ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=79>

¹⁰ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=212>

¹¹ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=63>

¹² http://ch.foamglas.com/fr/batiment/produits/vue_densemble_des_produits/plaques_foamglas/#1-1-3

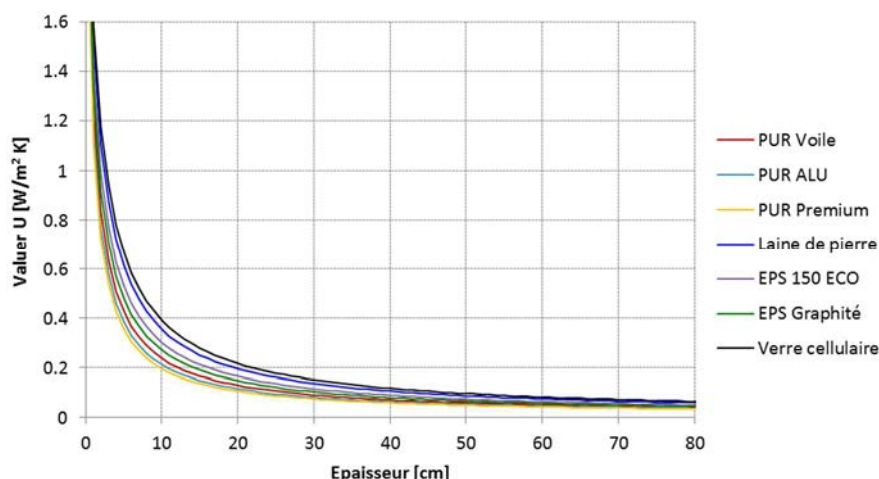


Figure 18: Evolution du coefficient de transmission U pour la toiture plate en fonction de l'épaisseur d'isolant

Coût des isolants considérés

Le coût considéré pour la fourniture et la pose des isolants de la toiture plate a été fourni à partir d'échanges avec des professionnels du domaine des isolants [35]. Ces coûts sont représentés dans le graphique de la figure 19.

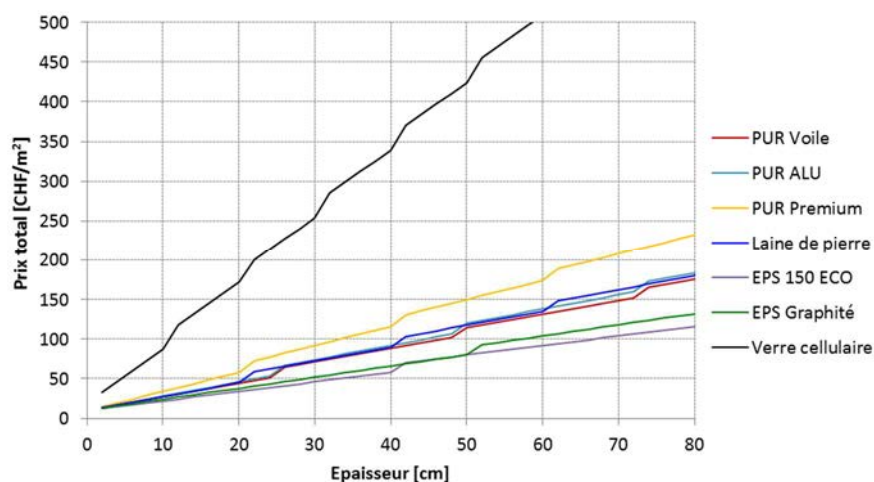


Figure 19: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la toiture plate en fonction de l'épaisseur (prix HT, déterminé suite à des échanges avec des professionnels des isolants [35])

Les sauts observés correspondent à l'augmentation du prix de pose lié à la pose de panneaux d'isolation supplémentaires. La pose de l'isolation en verre cellulaire nécessite l'utilisation de bitume. Le coût de celui-ci a été ajouté au prix de base du verre cellulaire. Sur conseil de professionnels du domaine des isolants, une quantité de $0.7 \text{ [kg/m}^2\text{/cm d'isolation]}$ a été considérée. L'analyse complète considérera une durée de vie identique pour tous les isolants même si le verre cellulaire est susceptible de durer plus longtemps.

Valeur d'impacts des isolants considérés

Les valeurs d'impact pour les isolants ont été tirées de la base de données KBOB [22] et se trouvent dans le tableau 14, à l'exception de l'EPS 150 ECO qui se base sur les résultats d'une étude d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'un EPS d'un fabricant (swisspor) [43].

| Isolant | CED _{TOT} [MJ/kg] | CED _{NRE} [MJ/kg] | GWP [kgCO ₂ _eq/kg] |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| PUR Premium | 103.9 | 101.3 | 6.79 |
| Laine de pierre | 16.9 | 15.2 | 1.04 |
| EPS 150 ECO | 63.8 | 64.3 | 5.74 |
| EPS Graphité | 106.4 | 105.3 | 7.36 |
| Verre cellulaire | 26.5 | 19.7 | 1.17 |

Tableau 14: Valeurs d'impacts pour les isolants considérés pour la toiture plate [22].

Pour le verre cellulaire, l'impact lié à l'utilisation de bitume à chaud indispensable à la pose des panneaux d'isolation a été ajouté. Pour les autres isolants, seuls les impacts du matériau sont considérés.

7.1.6.5 Toiture en pente

Composition

La toiture en pente considérée est une toiture standard avec isolation sur chevron de type inhomogène. La composition de cet élément est représentée dans la figure 20 et est décrite dans le tableau 15 :

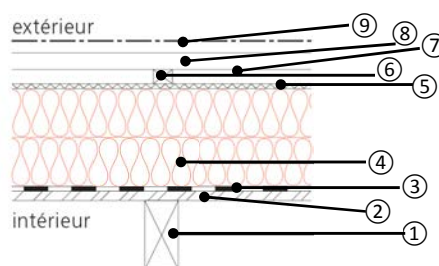


Figure 20: Composition de la façade compacte, à gauche vue en coupe, à droite vue de face, tiré de [42]

| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conduction thermique [W/(m·K)] | Résistance [(m²·K)/W] |
|-----------|---------------------|-------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | Chevron | 14.0 | 0.25 | - |
| 2 | Panneau OSB | 2.0 | 0.11 | 0.182 |
| 3 | Pare-vapeur | 0.05 | 0.2 | 0.003 |
| 4 | Isolation thermique | <i>variable</i> | <i>variable</i> | <i>variable</i> |
| 5 | Sous-toiture | 0.64 | 0.48 | 0.013 |
| 6 | Contre-lattage | 6.0 | 0.25 | - |
| 7 | Lame d'air ventilée | 6.0 | 6.00 | - |
| 8 | Lattage | 3.0 | 0.25 | - |
| 9 | Couverture (tuiles) | 2.0 | 1.00 | - |

Tableau 15: Description de la toiture en pente

Type d'isolants

Les isolants considérés pour la toiture en pente sont recensés dans le tableau 16 :

| Isolant | Fournisseur | Type | Epaisseurs commercialisées [mm] | Conductivité thermique [W/m·K] | Masse volumique [kg/m³] |
|-----------------|-------------|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| PUR VOILE | swisspor | swissporPUR Voile ¹³ | 20-280 | 0.025 | 30 |
| PUR ALU | swisspor | swissporPUR Alu ¹⁴ | 20-280 | 0.022 | 30 |
| PUR Premium | swisspor | swissporPUR Premium ¹⁵ | 20-200 | 0.020 | 30 |
| Laine de pierre | swisspor | swissporROC type 3 ¹⁶ | 30-200 | 0.034 | 60 |
| EPS 150 ECO | swisspor | swissporEPS150 Eco ¹⁷ | 100-300 | 0.033 | 26 |
| EPS graphité | swisspor | swissporLAMBDA Roof ¹⁸ | 50-300 | 0.029 | 25 |
| Laine de verre | Isover | Isotherm 035 ¹⁹ | 40-200 | 0.035 | 65 |
| Laine de bois | Pavatex | Pavatherm-plus ²⁰ | 60-160 | 0.043 | 180 |

Tableau 16: Isolants considérés pour la toiture en pente

Valeur U

Le graphique suivant donne l'évolution du coefficient de transmission thermique U pour la toiture en pente considérée, ceci pour chaque type d'isolant. Ces coefficients U ont été définis au moyen du logiciel U-Sai [40]. Un calcul d'élément inhomogène a été effectué.

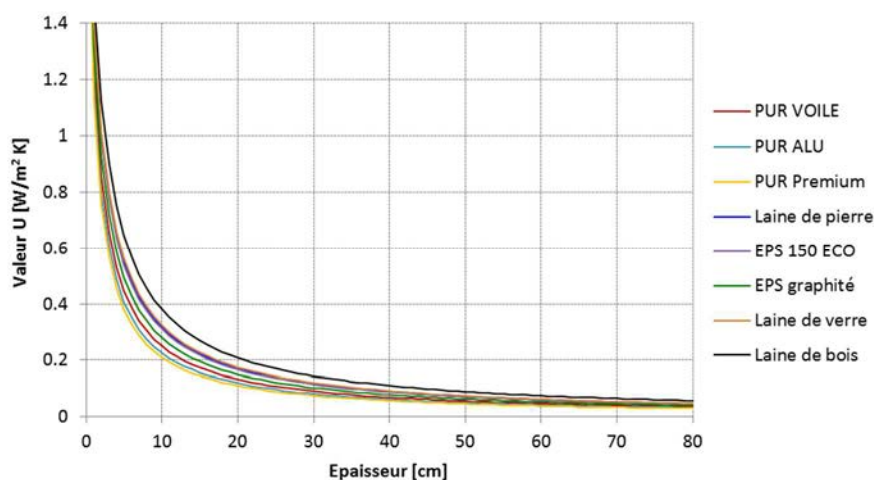


Figure 21: Evolution du coefficient de transmission U pour la toiture en pente en fonction de l'épaisseur d'isolant

Coût des isolants considérés

Le coût considéré pour la fourniture et la pose des isolants de la toiture en pente a été fourni à partir d'échanges avec des professionnels du domaine des isolants [35]. Ces coûts sont représentés dans le graphique de la figure 22.

¹³ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=56>

¹⁴ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=57>

¹⁵ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=205>

¹⁶ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=77>

¹⁷ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=212>

¹⁸ <http://www.swisspor.ch/index.php?section=datasheet&cmd=productPage&id=63>

¹⁹ <http://www.isover.ch/produits/story17652/product4340.html>

²⁰ <http://www.pavatex.ch/fr/produits/mur/pavatherm-plus/>

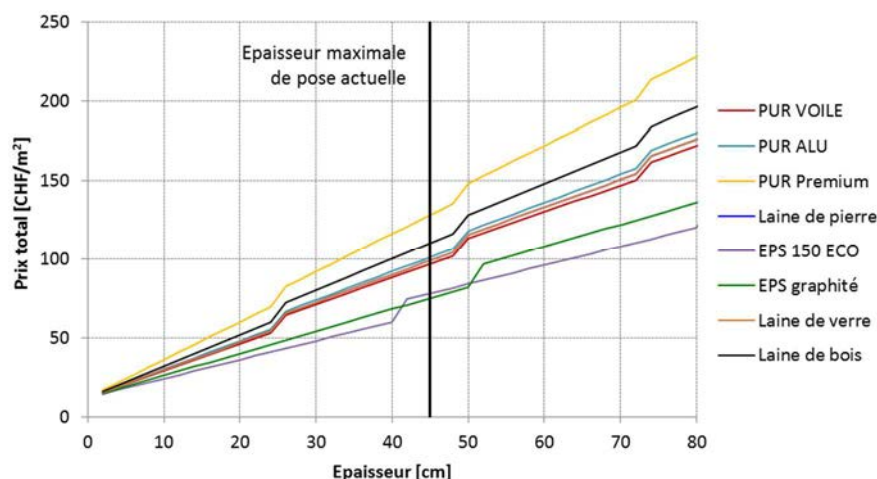


Figure 22: Coûts pour la fourniture et la pose des isolants considérés pour la toiture en pente en fonction de l'épaisseur (prix HT, déterminé suite à des échanges avec des professionnels des isolants [35])

Pour cet élément, le prix correspond à la fourniture et pose de l'isolation. Les sauts observés correspondent à l'augmentation du prix de pose lié à la pose de panneaux d'isolation supplémentaires. Une épaisseur maximale de pose de 40 [cm] est actuellement en vigueur.

Valeur d'impacts des isolants considérés

Les valeurs d'impact pour les isolants ont été tirées de la base de données KBOB [22] et se trouvent dans le tableau 17 à l'exception de l'EPS 150 ECO qui se base sur les résultats d'une étude d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'un EPS du fabricant (swisspor) [43].

| Isolant | CED _{TOT} [MJ/kg] | CED _{NRE} [MJ/kg] | GWP [kgCO ₂ _eq/kg] |
|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| PUR VOILE | 103.9 | 101.3 | 6.79 |
| PUR ALU | 103.9 | 101.3 | 6.79 |
| PUR Premium | 103.9 | 101.3 | 6.79 |
| Laine de pierre | 16.9 | 15.2 | 1.04 |
| EPS 150 ECO | 63.8 | 64.3 | 5.74 |
| EPS graphité | 106.4 | 105.3 | 7.36 |
| Laine de verre | 49.7 | 45.8 | 1.51 |
| Laine de bois | 23.4 | 11.0 | 0.43 |

Tableau 17: Valeurs d'impacts pour les isolants considérés pour la toiture en pente [22].

Seuls les impacts du matériau sont pris en considération.

7.1.7 Coefficient κ

Un coefficient κ de 0.9 est considéré pour toutes les analyses. En effet, Wyss [34] a montré que pour une villa typique, cette valeur est cohérente.

7.1.8 Indicateurs considérés

L'analyse présentée considère quatre indicateurs différents, à savoir :

- Aspects financiers : Ceux-ci considèrent le prix d'un mètre carré d'isolant (fourniture et pose) et le coût du vecteur énergétique considéré (cf. chapitre tels que décrit dans le chapitre 7.1.3.1)
- CED_{NRE} : Energie primaire non-renouvelable incluant le nucléaire, le fossile, le bois et la biomasse provenant des forêts primaires et exprimé en MJ-équ.
- CED_{TOT} : Energie primaire totale incluant le non-renouvelable et renouvelable et exprimé en MJ-équ.
- GWP : Gaz à effet de serre exprimé en kg CO₂-équ.

Pour les trois indicateurs environnementaux, les résultats présentés incluent tout le cycle de vie, de l'extraction des matières premières à leur élimination. Les valeurs d'impact propres à chaque isolant sont tirées de la base de donnée KBOB 2012 [22]. Pour les valeurs d'impact des systèmes de chauffage, se référer au chapitre 7.1.3.1.

8 Cas d'application: résultats et analyses

L'objectif de cette partie est de présenter les couples *isolants thermiques/systèmes de chauffage* pour les quatre éléments de construction définis dans le chapitre 7.1.6 "Eléments de construction" (façade compacte, façade ventilée, toiture plate et toiture en pente) associé aux cinq systèmes de chauffage considérés et décrit dans le chapitre 7.1.3 (électricité, gaz naturel, mazout, PAC air-eau (AE) et pellets).

Un nombre très important de résultats peuvent être générés par l'application de la méthodologie des EOI sur les quatre éléments de construction et pour les quatre indicateurs retenus (financier et environnementaux). L'ensemble des résultats détaillés est reporté en annexe 3 dans vingt fiches de synthèse (une fiche par couple "élément de construction/système de chauffage").

Dans la suite de ce rapport, seuls des résultats synthétiques sont présentés²¹. Ils permettent de mettre en évidence des couples *systèmes de chauffage et isolants optimaux* pour chaque élément de construction. Les EOI financières ainsi que les valeurs absolues résultantes sont mises en correspondance avec les EOI environnementales.

8.1 Données de base pour la lecture des graphiques de résultats

Dans cette partie, les représentations graphiques utilisées pour présenter les résultats sont expliquées pas à pas, en prenant l'exemple des façades compacte et ventilée.

8.1.1 Mode de représentation des EOI par isolant et par vecteur énergétique

La figure 23 représente la détermination graphique de l'EOI financière dans le cas d'une façade isolée avec de l'EPS et un système de chauffage par PAC AE. La courbe rouge montre la décroissance du coût financier liée à la diminution des besoins de chauffage au fur et à mesure que l'épaisseur d'isolation (et son coût correspondant) augmente (courbe bleue). La courbe noire résulte de l'addition de ces deux dernières courbes (coût de l'énergie + coût de l'isolation) et permet de définir l'EOI qui se situe au minima de cette résultante (point noir). L'épaisseur et le coût correspondant se définissant en suivant les droites vertes. Une fourchette équivalente à un écart de coût de 5% par rapport à l'optimum est également représentée (traits-tillés noirs). Cette valeur reste arbitraire mais permet de montrer la sensibilité de l'EOI à un éventuel surcoût. Dans cet exemple, l'EOI est de 11 [cm], avec une fourchette à 5% entre 7 et 15 [cm]. En d'autres termes, la pose d'une épaisseur d'isolation comprise entre 7 et 15 [cm] entraînera au maximum un surcoût de 5% par rapport au coût à l'EOI. Cet EOI reste en dessous de l'épaisseur maximale de pose égale à 40 [cm] pour une façade compacte (représentée par le trait vertical double sur le graphique).

²¹ Seul le PUR Premium est reporté dans les résultats du rapport étant donné que les tendances sont semblables avec les autres types de PUR. Pour plus d'informations, les fiches annexes par éléments reportent les résultats des trois PUR.

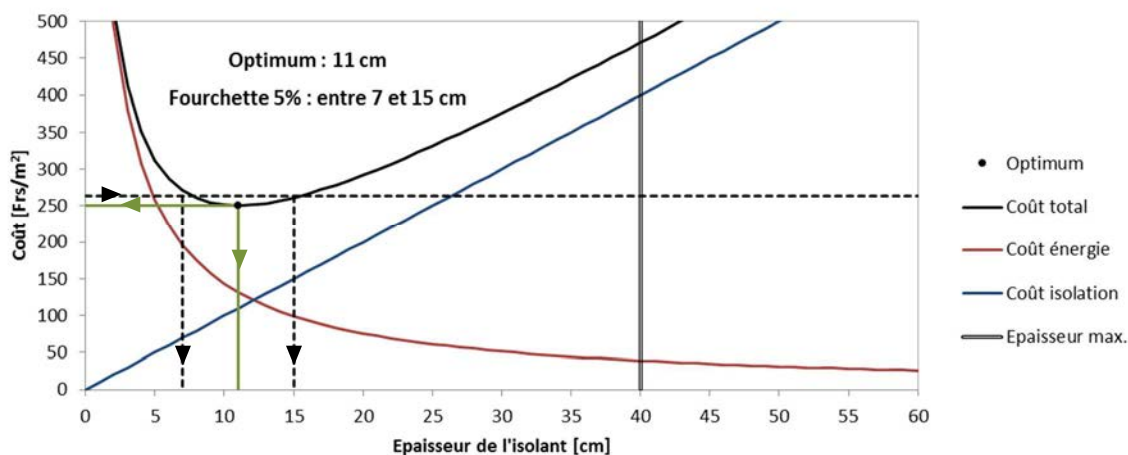


Figure 23: Représentation graphique de l'EOI financière pour une façade compacte isolée avec de l'EPS (système de chauffage : PAC AE)

Cette représentation graphique peut être générée pour chaque isolant d'un élément de construction. Elle permet par exemple de se rendre compte que plus le prix de l'isolant, représenté par la courbe bleue, augmente, plus l'EOI sera décalée vers la gauche et diminuera.

En fonction des configurations propres à chaque isolant et notamment des hypothèses de doubléments d'épaisseurs lors de la pose sur chantier, des points singuliers peuvent apparaître sur le graphique. A titre d'illustration, la figure suivante présente graphiquement l'EOI dans le cas d'une façade ventilée isolée avec de la laine de pierre (système de chauffage : PAC AE).

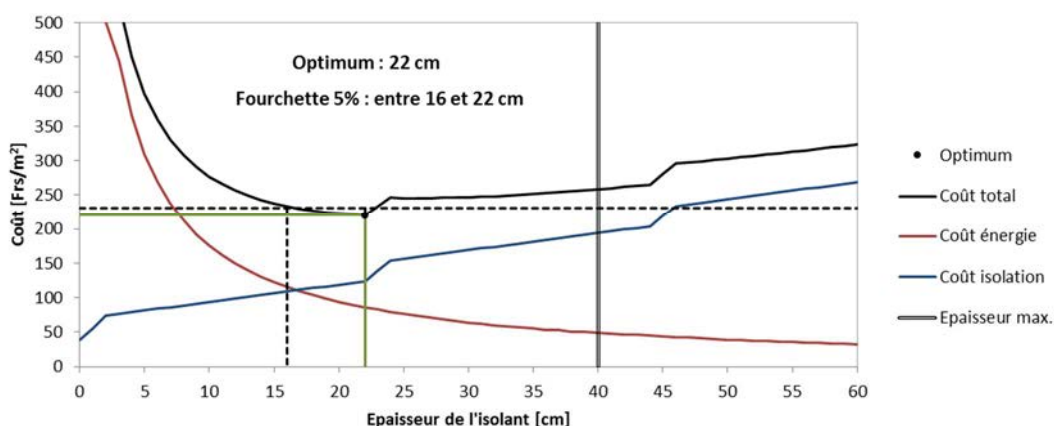


Figure 24: Représentation graphique de l'EOI financière pour une façade ventilée isolée avec de la laine de pierre (système de chauffage : PAC AE)

Nous notons, qu'à partir de 22 [cm], une "cassure" apparaît et vient relever la courbe noire liée au coût total. Cette cassure correspond au doublement du prix de pose de l'isolation dès 22 [cm] (épaisseur à partir de laquelle deux couches sont nécessaires). Dans cet exemple, l'hypothèse de doublement d'épaisseur²² conduit à un rapprochement entre l'EOI financière et la valeur supérieure de la fourchette à 5%. Sur la figure 24, ces deux valeurs sont même confondues à 22 [cm].

D'autres points singuliers ou "cassures" peuvent se produire sur la courbe p. ex. lorsque des subventions sont allouées dans le cadre de travaux de rénovation en fonction de la valeur U de la paroi. Dans ce cas, la "cassure" est dans l'autre sens, le coût total diminuant grâce aux subventions, mais le principe reste le même. Ce point fera l'objet d'une analyse de sensibilité (cf. partie 9.1.4) et n'est pas plus discuté ici.

²² Validée auprès de professionnels du domaine des isolants

La figure 25 représente l'EOI environnementale pour l'indicateur CED_{NRE} pour une façade compacte isolée avec de l'EPS et un système de chauffage par PAC AE.

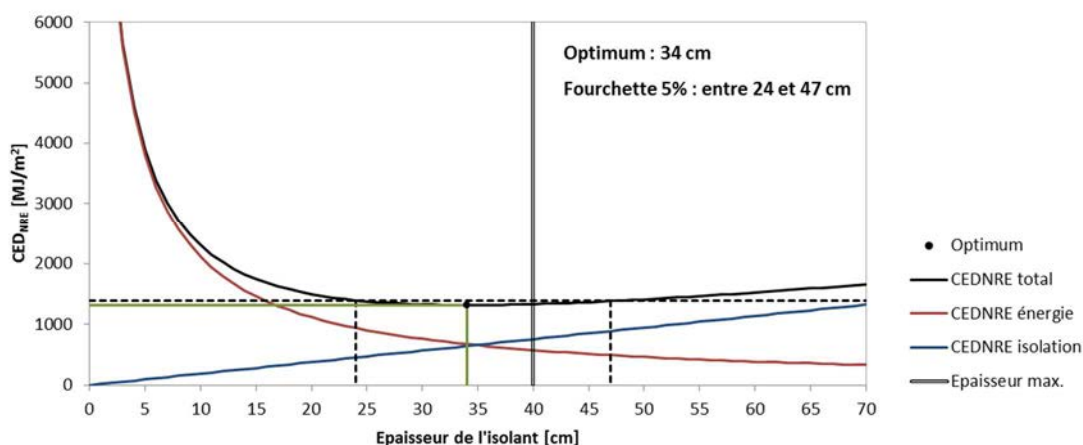


Figure 25 : Représentation graphique de l'EOI environnementale (CED_{NRE}) pour une façade compacte isolée avec de l'EPS (système de chauffage : PAC AE)

La lecture de ce graphique reste la même que pour l'EOI financière. Pour cet indicateur, il n'y a plus d'influences liées aux doubléments d'épaisseurs ou aux subventions. Dans cet exemple, l'EOI se situe à 34 [cm] et la fourchette varie entre 24 et 47 [cm].

Ce mode de représentation graphique est fort utile pour comprendre le principe des EOI pour chaque couple *isolant/système de chauffage*. Cependant, la manipulation de ce graphique s'avère compliquée lorsqu'il s'agit de comparer plusieurs couples d'isolants et de systèmes de chauffage en même temps. Un deuxième graphique est alors proposé pour regrouper les EOI de l'ensemble des isolants et des systèmes de chauffage d'un élément de construction.

8.1.2 Modes de représentation des EOI des couples *isolants/systèmes de chauffage*

La figure 26 présente ce deuxième mode de représentation pour chaque élément de construction. Les résultats sont présentés avec cinq systèmes de chauffage mis côte-à-côte dans l'ordre alphabétique (i.e. **é**lectricité, **g**az naturel, **m**azout, **P**AC AE, et **p**ellets) et rattachés à chaque fois à un isolant. Ce mode de représentation permet d'identifier rapidement les différences d'EOI en fonction des isolants et des systèmes de chauffage retenus. De manière analogue, sont reportés côte-à-côte les EOI financières et les EOI environnementales ce qui facilite la comparaison entre indicateurs. Dans cet exemple, l'indicateur environnemental CED_{NRE} est reporté. En fonction des besoins, pourront être présentés d'autres indicateurs environnementaux, à savoir : la consommation d'énergie primaire totale (CED_{TOT}) ou les émissions de gaz à effet de serre (GWP).

Sur ce mode de représentation, le trait noir épais correspond à l'EOI et les zones colorées, au-dessus et en dessous, à la fourchette équivalente à un écart de 5% par rapport à l'optimum (cf. mode de représentation précédent). Les fourchettes roses correspondent aux fourchettes financières et les vertes aux fourchettes environnementales (CED_{NRE}). Les fourchettes des indicateurs CED_{TOT} et GWP seront quant à elles reportées en bleu et en violet dans la suite de ce rapport. Enfin, le trait continu gris correspond à l'épaisseur maximale de pose (dans cet exemple, 40 [cm]).

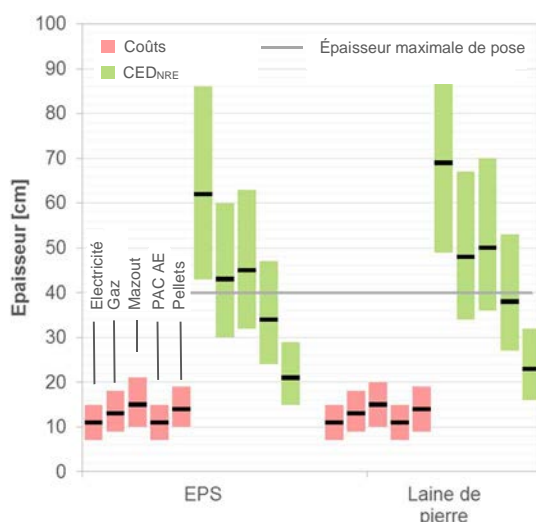


Figure 26 : EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une façade compacte pour les différents couples *isolants/systèmes de chauffage*

Nous retrouvons sur cette figure l'EOI financière de l'EPS en façade avec la PAC AE mis en évidence dans la figure 23 (11 [cm]) et l'EOI CED_{NRE} de la figure 25 (33 [cm]). L'intérêt de cette représentation graphique est de pouvoir comparer entre eux les EOI pour chaque couple *isolant/système de chauffage*.

La figure 26 met également en évidence les épaisseurs correspondantes aux bornes inférieures et supérieures de la fourchette à 5% identifiées en figure 23 (respectivement 7 et 15 [cm] pour l'EOI financière).

En revanche, cet aspect ne se retrouve plus dans l'exemple suivant de la façade ventilée pour la laine de pierre (cf. figure 27). Comme illustré à la figure 24, un doublement d'épaisseur est nécessaire au voisinage de l'EOI financière (à 22 [cm]) ce qui ramène la borne supérieure de la fourchette au même niveau que cet EOI. Cela se traduit pour un "écrasement" de la fourchette supérieure comme visible sur la figure 27. Cette singularité se retrouve quel que soit le vecteur énergétique considéré.

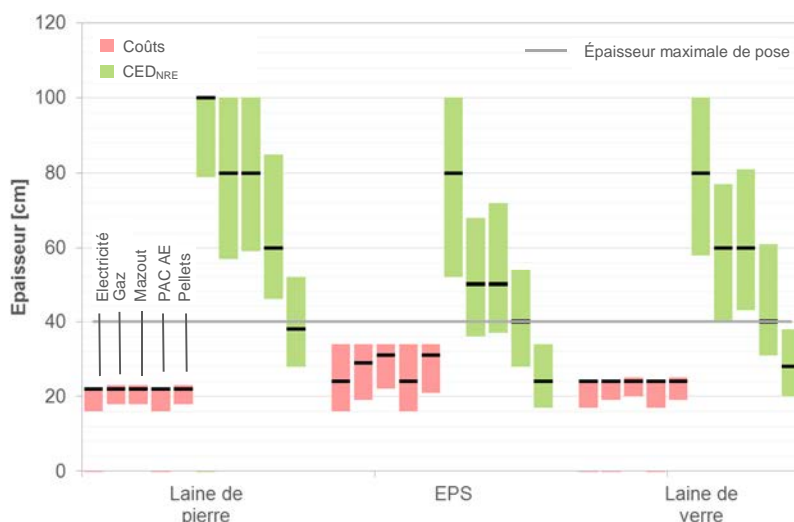


Figure 27: EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une façade ventilée pour les différents couples *isolants/systèmes de chauffage*

Ces deux modes de représentation permettent, pour chaque couple *isolant/système de chauffage*, de déterminer des EOI financières et environnementales. Ces résultats peuvent ensuite être regroupés dans un tableau de synthèse (cf. partie 0). Toutefois et il est important de le souligner, les EOI des couples *isolant/système de chauffage* ne permettent pas de sélectionner la variante optimale. En effet, en fonction du coût financier et environnemental de l'isolant et du système de chauffage à l'EOI, le

couple optimal ne correspondra pas nécessairement au couple dont la valeur d'EOI est la plus faible. Cet aspect est illustré à l'aide d'un troisième mode de représentation qui est présenté dans le chapitre suivant.

8.1.3 Modes de représentation des coûts ou impacts environnementaux optimaux

Le troisième mode de représentation est présenté à la figure 28. Il présente les coûts totaux des différents couples *isolant/système de chauffage* aux épaisseurs optimales d'isolation. Ce mode de représentation permet de déterminer la solution optimale. Dans cet exemple, alors que les EOI financières pour l'EPS sont pour chaque système de chauffage toutes égales à 11 [cm], le coût réel est différent pour chaque type d'isolant. Selon un critère financier, le choix se porterait sur la pose d'EPS couplé avec une PAC AE alors qu'en considérant l'indicateur d'énergie primaire non renouvelable le choix se porterait sur les pellets couplé à l'EPS. Ce mode de représentation permet de rapidement mettre en évidence le couple optimal. Afin de tenir compte d'une marge d'erreur dans le choix du couple optimal, il est adopté que les couples présentant un coût ou un impact supérieur de moins de 10% à la valeur du couple optimal présentent également un intérêt dans le choix. Cette plage est représentée sur le graphique par un trait-tillés horizontal.

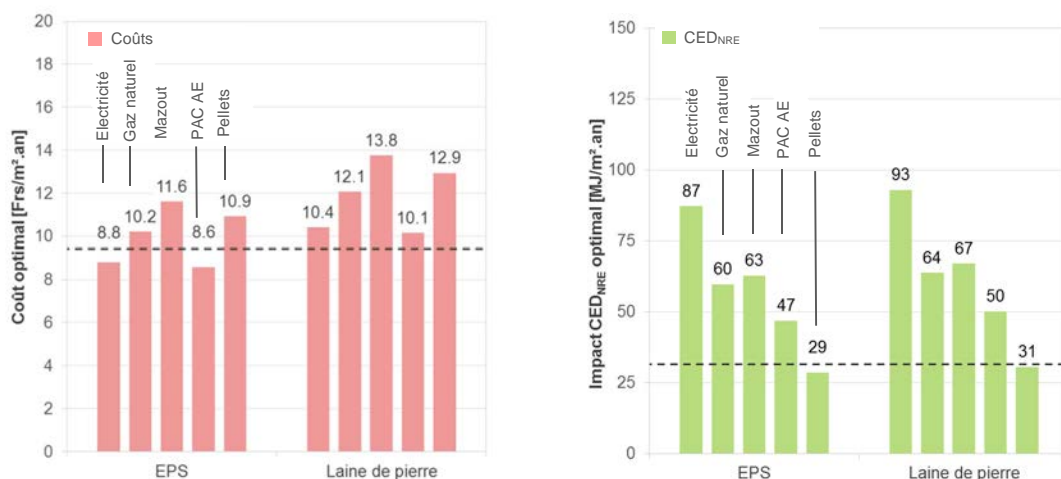


Figure 28: Coûts et impacts CED_{NRE} optimaux des différents couples *isolants/systèmes de chauffage* pour la façade compacte avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

8.2 Résultats détaillés par élément de construction

Dans cette partie, les résultats sont présentés pour chaque élément de construction. Dans un premier temps, une analyse est faite sur les positionnements des EOI financières par rapport aux EOI environnementales. Ensuite, les résultats des couples optimaux *isolant/système de chauffage* sont présentés.

8.2.1 Façade compacte

La figure 29 présente les résultats des EOI financières et environnementales (GWP et CED_{TOT}) pour la façade compacte. Ces résultats sont à comparer avec ceux de la figure 30 pour l'indicateur CED_{NRE} .

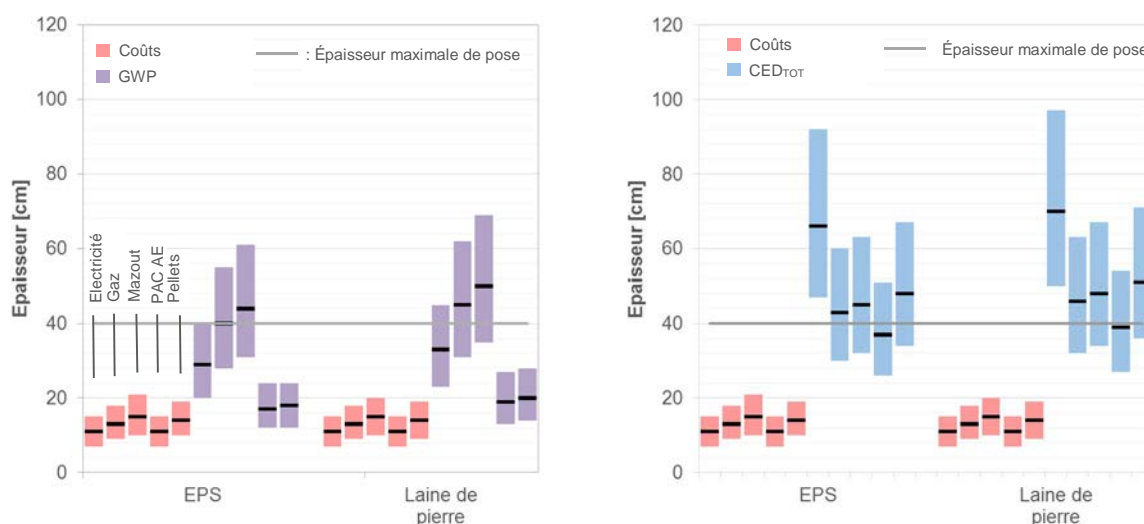


Figure 29: EOI financières et environnementales (GWP à gauche et CED_{TOT} à droite) pour une façade compacte pour les différents couples *isolants/systèmes de chauffage*

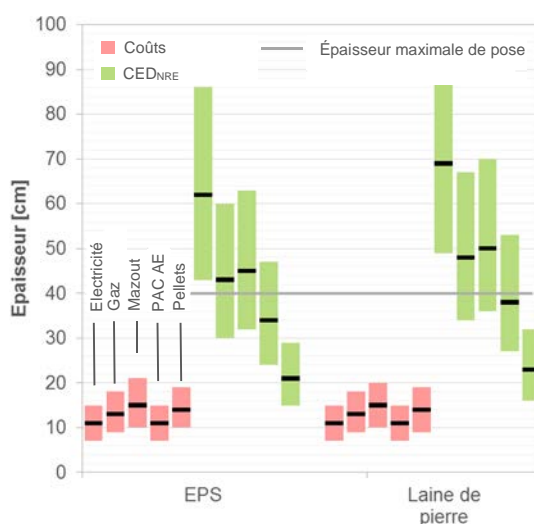


Figure 30 : EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une façade compacte pour les différents couples *isolants/systèmes de chauffage*

Ces graphiques montrent que les EOI financières se situent majoritairement au-dessous des EOI environnementales. Cette constatation se vérifie pour la façade compacte de même que pour l'ensemble des éléments de construction étudiés (cf. parties 8.2.2, 0, 8.2.4). Les EOI financières, quel que soit l'isolant ou le système de chauffage considéré, sont relativement resserrées et sont toutes comprises entre 11 et 15 [cm]. A l'inverse, les EOI environnementales varient entre 17 et 50 [cm] pour

l'indicateur GWP, entre 21 et 69 [cm] pour l'indicateur CED_{NRE} et entre 37 et 70 [cm] pour le CED_{TOT} . Les fourchettes des EOI environnementales pour les indicateurs CED_{NRE} (figure 30) et CED_{TOT} (Figure 29) sont beaucoup plus étendues que pour l'indicateur financier, faisant varier quasiment du simple au double l'épaisseur d'isolation, et ceci quel que soit le système de chauffage considéré. Comme le présente la figure 36, la pente de la courbe bleue représentant l'impact de l'isolation est beaucoup plus faible pour l'indicateur environnemental (p.ex. CED_{NRE}) que financier, entraînant une fourchette plus importante. Ces constatations se vérifient sur tous les éléments de construction étudiés (cf. parties 8.2.2, 0, 8.2.4).

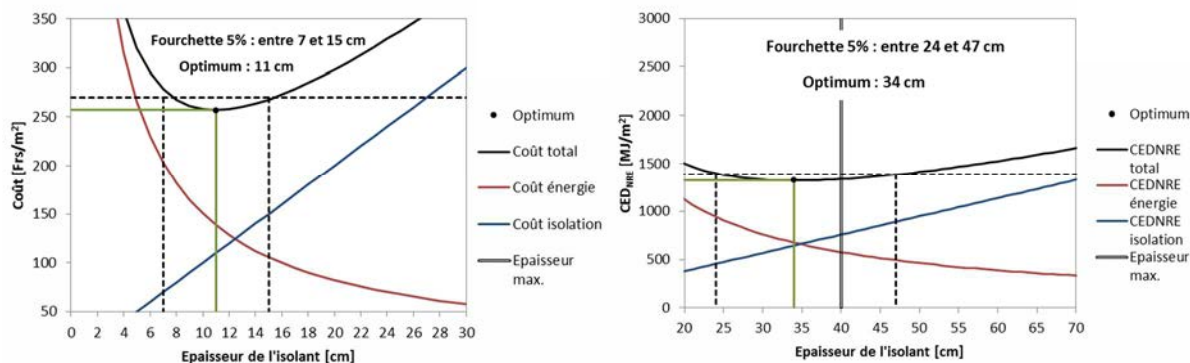


Figure 31 : Représentation graphique de l'EOI financière (à gauche) et l'EOI environnementale CED_{NRE} (à droite) pour une façade compacte isolée avec de l'EPS (système de chauffage : PAC AE)

Dans le cas de la façade compacte, les EOI environnementales se trouvent au-delà de l'épaisseur maximale de pose notamment dans le cas du chauffage électrique direct, du gaz naturel et du mazout pour les CED_{NRE} et CED_{TOT} . L'EOI est particulièrement élevée (60 à 70 [cm]) pour le chauffage électrique direct quel que soit l'isolant pour les indicateurs CED_{TOT} et CED_{NRE} . En revanche, pour le GWP, les résultats sont plus nuancés avec seulement trois cas de figure où les EOI sont au-delà de l'épaisseur maximale de pose (*EPS/mazout*, *laine de pierre/gaz naturel* et *laine de pierre/mazout*). Ces résultats s'expliquent notamment par le lien qui existe entre les coûts ou les impacts environnementaux des systèmes de chauffage et les EOI correspondantes. Comme le montre la figure 32 en prenant l'exemple d'une façade compacte isolée avec de l'EPS, il existe une relation linéaire entre ces deux paramètres. Plus le coût ou l'impact du système de chauffage est élevé, plus l'EOI augmente. Par exemple, l'impact du chauffage à pellets sur la consommation d'énergie primaire non-renouvelable est très faible (1.2 [MJ/kWh_{utile}]) réduisant de facto l'EOI du couple *EPS/pellets* sur la figure 30. Il est à noter également qu'un doublement des coûts ou des impacts unitaires des systèmes de chauffage n'entraîne pas de doublement d'EOI (l'augmentation étant "seulement" de l'ordre de 50% pour l'indicateur financier ou environnemental). Ce point reste valable pour les autres éléments de construction et pour les autres indicateurs environnementaux (cf. parties suivantes).

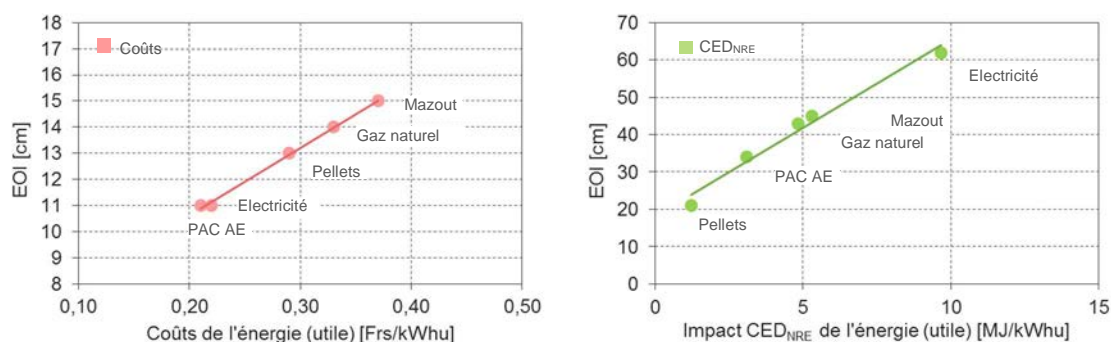


Figure 32: Relations entre les EOI et les indicateurs de coûts et d'impact (CED_{NRE}) des systèmes de chauffage pour la façade compacte avec une isolation en EPS

La figure 33 présente les coûts et les CED_{TOT} , CED_{NRE} et GWP aux EOI pour les différents couples d'isolants/systèmes de chauffage. Pour rappel, une marge de 10% par rapport au couple présentant la meilleure performance est admise; il existe donc, plusieurs couples optimaux pour un élément de construction. Pour cette façade compacte, l'EPS couplé à la PAC AE ou à l'électricité forment les couples optimaux pour l'indicateur financier. Les couples optimaux pour le GWP sont l'EPS ou la laine de pierre couplés à la PAC AE ou au chauffage à pellets. Pour le CED_{NRE} , les deux isolants couplés au chauffage à pellets sont les meilleures solutions alors que pour le CED_{TOT} , les deux isolants devront être couplés à une PAC AE. A l'opposé, les systèmes les plus impactant restent les solutions à mazout et gaz naturel pour le GWP, solutions de chauffage les plus émettrices de gaz à effet de serre par kWh utile et le chauffage électrique pour les indicateurs énergétiques. Ce dernier résultat s'explique en raison du coefficient de conversion énergie primaire/finale plus élevée que pour les autres systèmes de chauffage (mazout, gaz ou pellets).

De manière analogue aux EOI, les coûts et impacts optimaux (i.e., aux EOI) présentent, logiquement, une relation linéaire avec les coûts et impacts par kWh utile des systèmes de chauffage comme l'illustre la figure 34 pour les coûts et le CED_{NRE} .

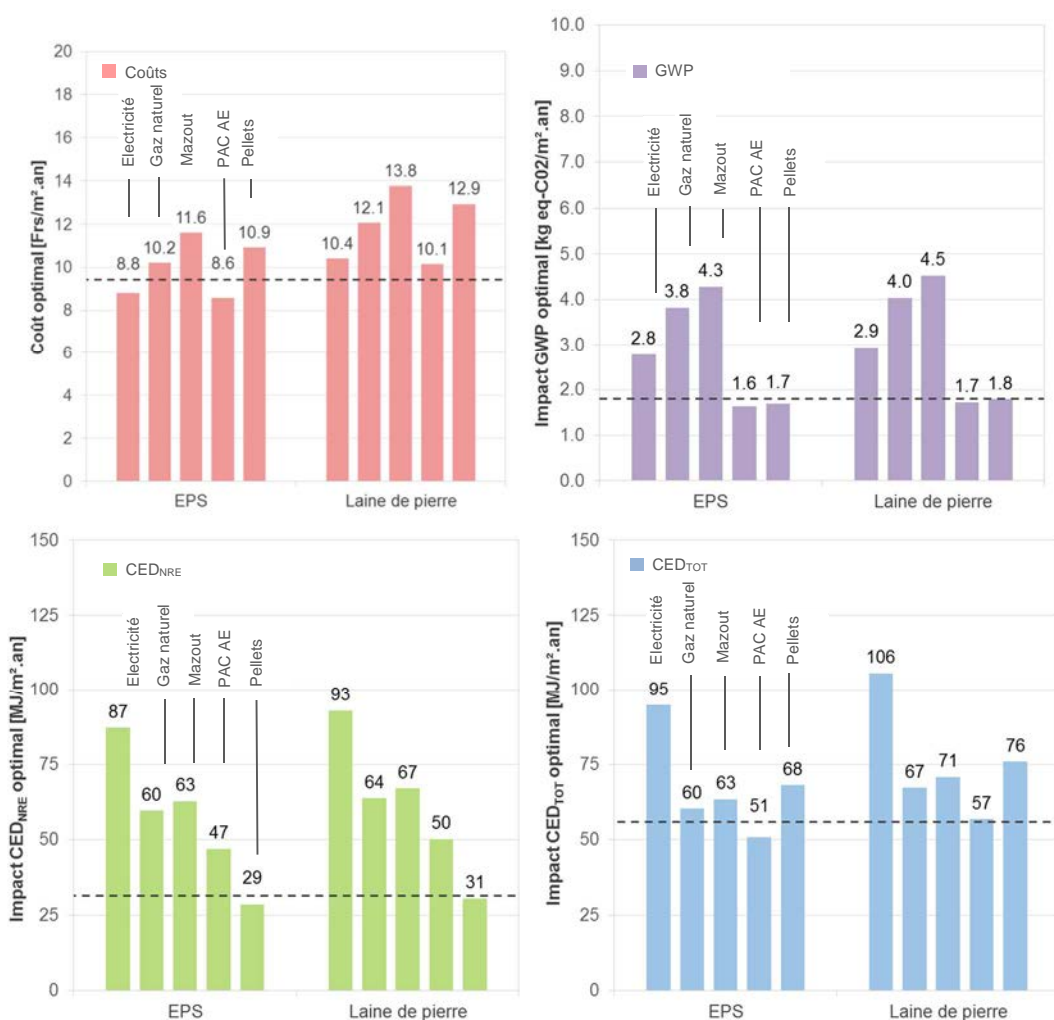


Figure 33: Coûts et impacts GWP optimaux des différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la façade compacte avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

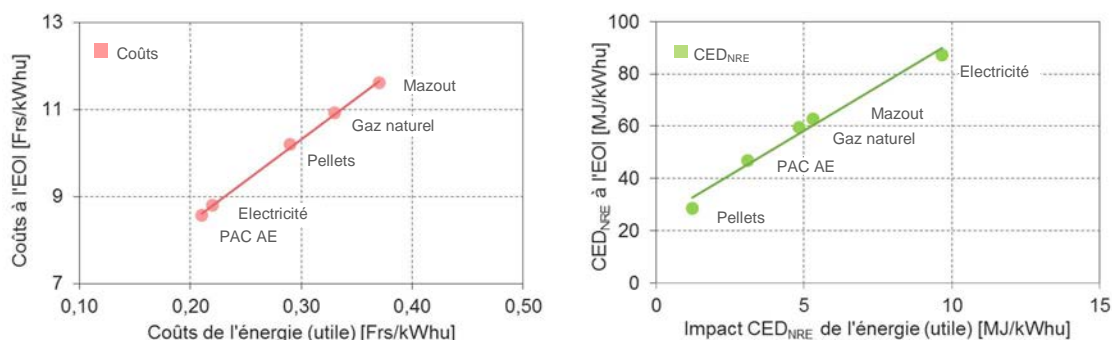


Figure 34: Relations entre les indicateurs de coûts et d'impacts (CED_{NRE}) aux EOI et les indicateurs des systèmes de chauffage (en énergie utile) pour la façade compacte avec une isolation en EPS

Dans la présentation des autres éléments de construction, seuls les résultats détaillés des indicateurs CED_{NRE} et GWP sont présentés afin d'alléger la présentation et de se focaliser sur les deux indicateurs environnementaux actuellement retenus dans les normes SIA 2040 "La voie SIA vers l'efficacité énergétique" [37] et SIA 2032 "L'énergie grise des bâtiments" [38]. Le lecteur intéressé par l'ensemble des résultats détaillés pour l'indicateur CED_{TOT} est invité à consulter les fiches de synthèse en annexe 3.

8.2.2 Façade ventilée

La figure 35 présente les résultats des EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour la façade ventilée. Ces résultats sont à comparer avec ceux de la figure 36 pour l'indicateur GWP.

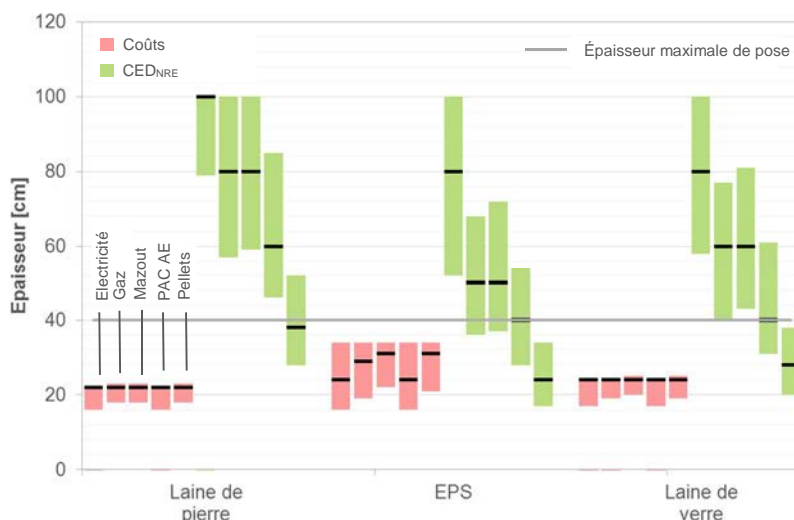


Figure 35: EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une façade ventilée pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage

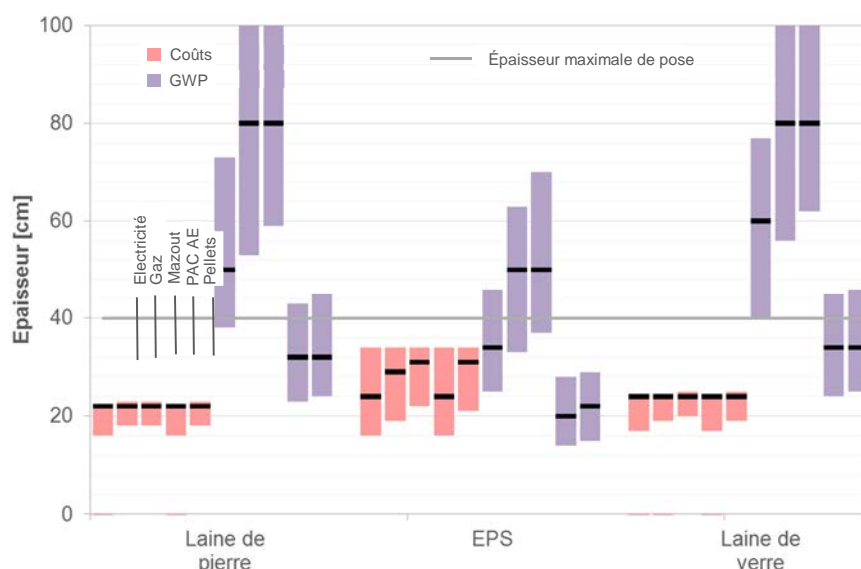


Figure 36: EOI financières et environnementales (GWP) pour une façade ventilée pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage

De manière analogue à la façade compacte, les EOI financières sont plutôt resserrées quel que soit le vecteur énergétique et comprises entre 22 et 35 [cm]. Des blocages d'EOI à l'épaisseur de doublement sont bien visibles pour les laines minérales quel que soit le vecteur énergétique.

Les EOI environnementales (CED_{NRE} et GWP) se situent, à nouveau, au-delà de l'épaisseur maximale de pose pour les isolants associés au gaz naturel et au mazout. A l'inverse, les isolants associés à un chauffage à pellets se situent en dessous. Pour les autres, cela dépend de l'isolant et du vecteur considéré.

Les figures 37, 38 et 39 présentent les coûts et les impacts CED_{NRE} et GWP des différents couples d'isolants et de systèmes de chauffage.

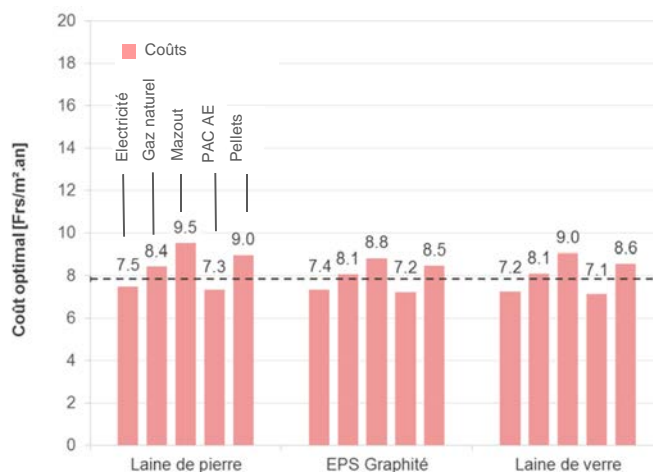


Figure 37: Coûts totaux des différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la façade ventilée avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

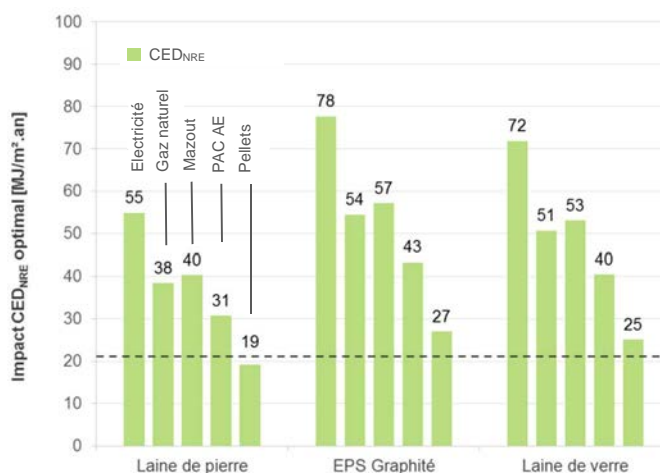


Figure 38: Impacts totaux (CED_{NRE}) des différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la façade ventilée avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

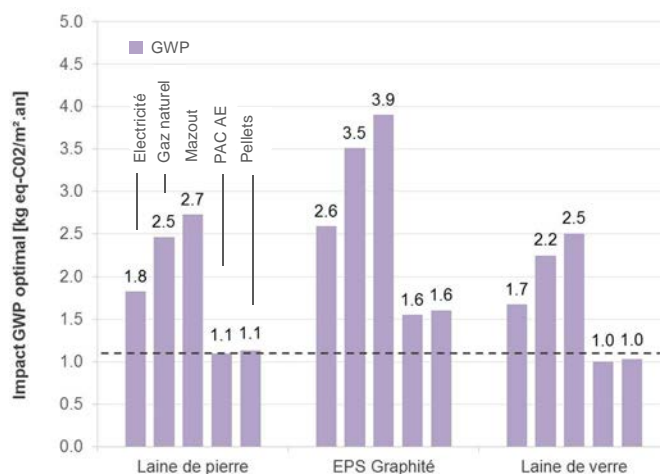


Figure 39: Impacts totaux (GWP) des différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la façade ventilée avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

Les impacts CED_{NRE} et GWP aux EOI présentent les mêmes tendances entre systèmes de chauffage et ceci pour chaque isolant. De manière analogue à la façade compacte, plus le coût ou l'impact du système de chauffage est élevé par unité, plus l'EOI augmente. Pour l'indicateur CED_{NRE}, la solution électrique a toujours plus d'impacts, loin devant le duo gaz naturel/mazout; ces deux solutions ayant des valeurs très proches. Enfin, le chauffage à pellets est toujours celui qui a le moins d'impacts. Ce constat reste valable quel que soit l'élément de construction (cf. parties suivantes).

Pour la façade ventilée et pour l'indicateur financier, les couples *isolant/système de chauffage* optimaux sont représentés par les trois isolants (*laine de pierre*, *EPS graphité* et *laine de verre*) couplés soit à la *PAC AE* soit à l'*électricité*. Pour l'indicateur CED_{NRE} le couple *laine de pierre /pellets* présente l'optimum. Pour l'indicateur GWP, ce sont les couples *laine de verre/PAC AE* et *laine de verre/pellets* qui présentent la meilleure option suivi de très peu de la *laine de pierre/PAC AE* ou *pellets* avec, à nouveau les systèmes de chauffage à énergie fossile (gaz, mazout) les moins favorables (cf. figure 39).

8.2.3 Toiture plate

Les figures 40 et 41 présentent les résultats des EOI financières et environnementales (CED_{NRE} et GWP) pour la toiture plate.

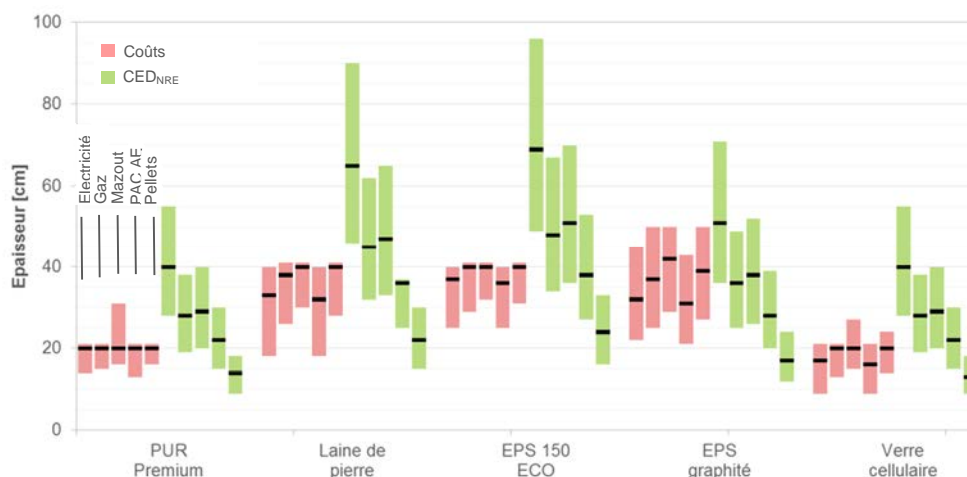


Figure 40: EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une toiture plate pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage

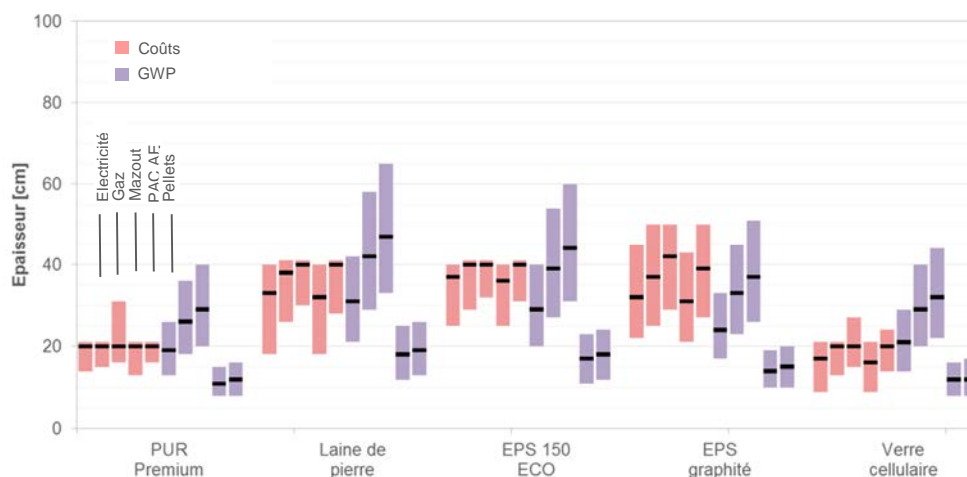


Figure 41: EOI financières et environnementales (GWP) pour une toiture plate pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage

Les EOI financières varient de 18 à 42 [cm] avec des blocages à l'épaisseur de doublement à nouveau bien visibles pour le PUR Premium à 20 [cm] et pour l'EPS 150 ECO à 40 [cm].

Les EOI financières sont plutôt élevées par comparaison avec celles obtenues sur la façade compacte. A titre d'illustration, dans le cas de l'EPS 150 ECO (cf. Figure 26, page 53), nous notons une augmentation nette des EOI pour cette application avec une différence de 16 [cm]. Ces résultats s'expliquent essentiellement par des coûts de matériaux moins élevés augmentant de facto l'EOI financière comparativement aux résultats obtenus sur la façade compacte. Dans cet exemple, les coûts de pose sont près de cinq fois plus élevés en façade qu'en toiture.

Cela entraîne que pour cet élément, les EOI environnementales sont relativement proches des EOI financières et même plus basses pour les isolants associés à une PAC AE ou à un chauffage à pellets pour l'indicateur GWP ou pour les pellets pour l'indicateur CED_{NRE} . Elles varient de 11 à 47 [cm] pour le GWP et de 13 à 69 [cm] pour le CED_{NRE} .

Les figures 42, 43 et 44 présentent les coûts et les impacts CED_{NRE} et GWP optimaux pour les différents couples d'isolants et de systèmes.

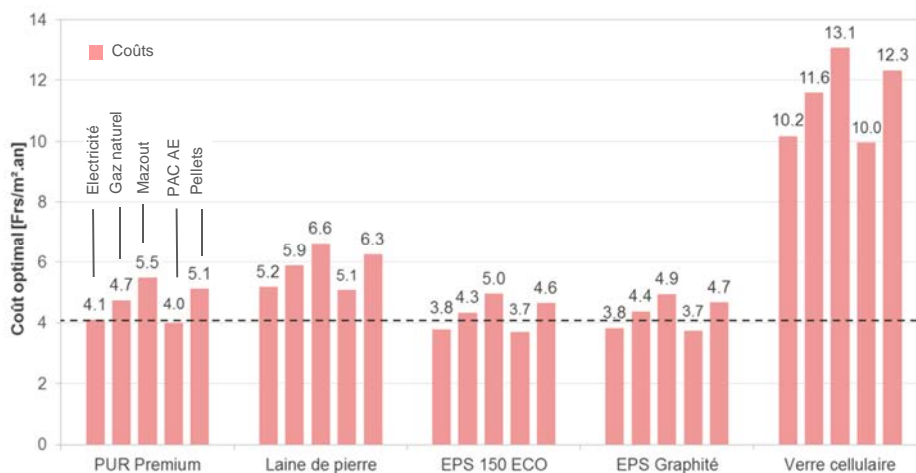


Figure 42: Coûts optimaux pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la toiture plate avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

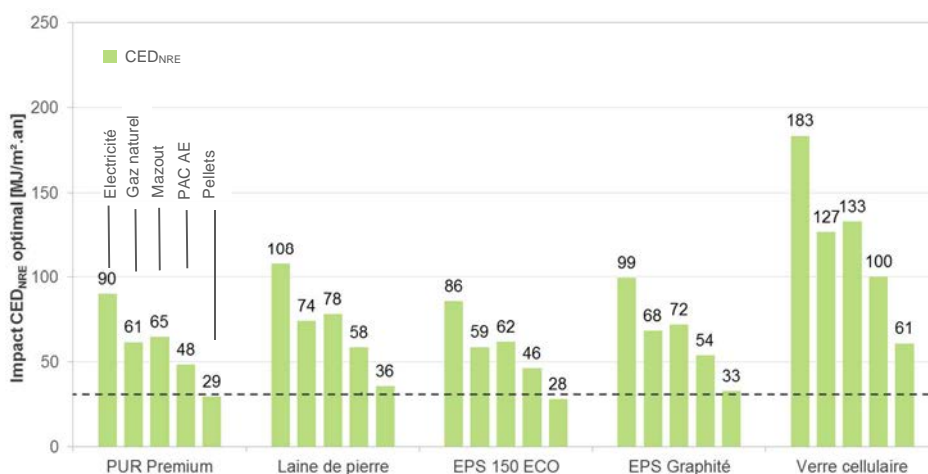


Figure 43: Impacts CED_{NRE} optimaux pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la toiture plate avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

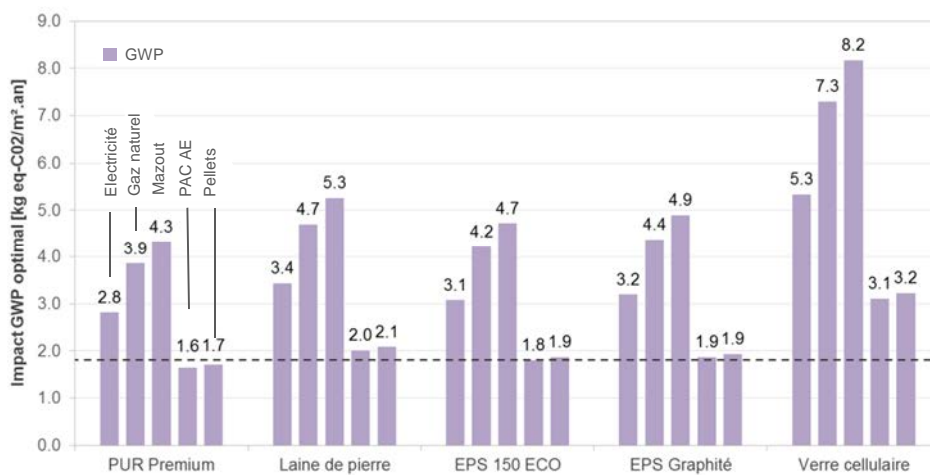


Figure 44: Impacts GWP optimaux pour les différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la toiture plate avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

De manière analogue aux façades, les systèmes de chauffage optimaux sont pour les coûts la PAC AE et le chauffage électrique couplé à tous les isolants sauf au verre cellulaire. Les isolants en *EPS* étant légèrement meilleurs que le *PUR*. Pour le CED_{NRE} , le *chauffage à pellets* présente la meilleure option couplé à l'*EPS 150 ECO* ou au *PUR Premium*. L'*EPS graphité* et la *laine de pierre* présentent des impacts très proches. L'indicateur GWP montre que le *PUR Premium* et une *PAC AE*, ou un *chauffage à pellets* sont les solutions optimales. Les isolants en *EPS* étant très proches de la marge de 10%. Le *verre cellulaire* est nettement moins favorable que tous les autres isolants, quel que soit le système de chauffage et quel que soit l'indicateur, en raison de l'utilisation de bitume lors de sa mise en œuvre qui fait augmenter son coût et son impact environnemental.

8.2.4 Toiture inclinée

Les figures 45 et 46 présentent les résultats des EOI financières et environnementales (CED_{NRE} et GWP) pour la toiture inclinée.

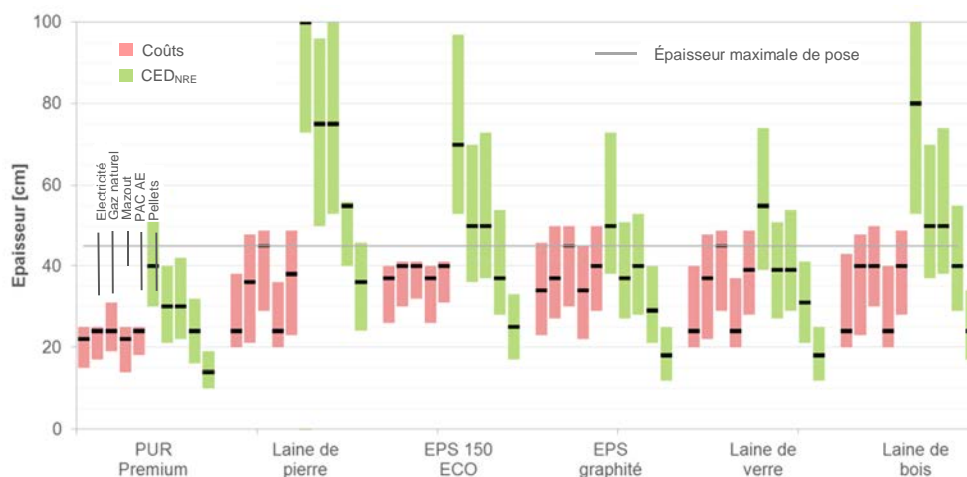


Figure 45: EOI financières et environnementales (CED_{NRE}) pour une toiture inclinée pour les différents couples *isolants/systèmes de chauffage*

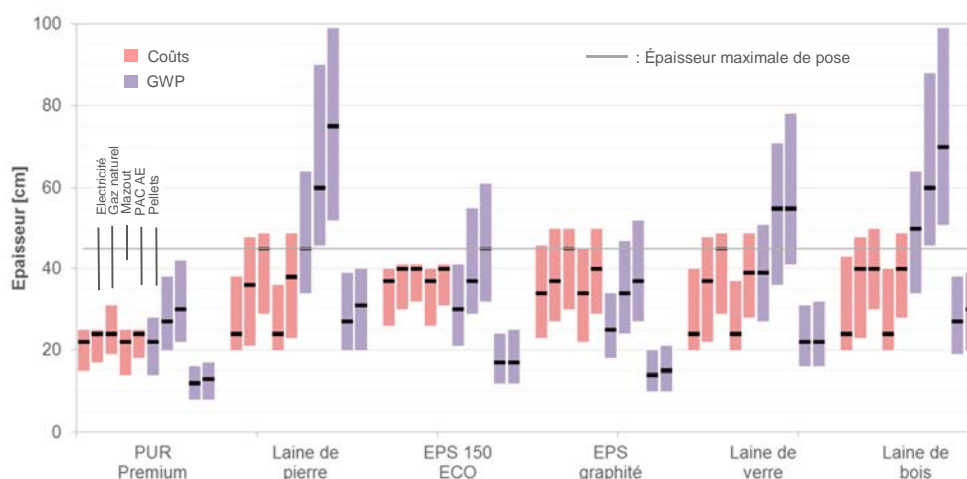


Figure 46: EOI financières et environnementales (GWP) pour une toiture inclinée pour les différents couples *isolants/systèmes de chauffage*

Les résultats sont similaires à ceux de la toiture plate (pour les isolants en commun). Les EOI financières varient à nouveau de 22 à 45 [cm] avec des EOI plus faibles pour le PUR Premium que pour les deux liées à des coûts plus élevés de matériaux pour le PUR que pour l'EPS. Des blocages à l'épaisseur de doublement sont également visibles pour le PUR et l'EPS 150 ECO, de même que pour les laines minérales pour les variantes avec PAC AE.

Les EOI environnementales pour le GWP sont, à nouveau relativement proche des EOI financières dans le cas du PUR et de l'EPS graphité tandis que l'écart est plus élevé sur les laines minérales et la laine de bois qui voient leurs EOI pour le GWP dépasser l'épaisseur maximale de pose et se rapprocher de certaines EOI de l'indicateur CED_{NRE}. Ces résultats s'expliquent notamment par les valeurs d'impacts des isolants. Pour un système de chauffage semblable et des densités équivalentes, plus un isolant a d'impacts, plus son EOI est faible. A titre d'exemple, les laines minérales ont des densités et des conductivités thermiques équivalentes mais la laine de pierre se distingue par un impact CED_{NRE} près de trois fois plus faible que celui de la laine de verre, d'où des différences significatives.

Les figures 47, 48 et 49 présentent les coûts totaux et les impacts CED_{NRE} et GWP des différents couples d'isolants et de vecteurs.

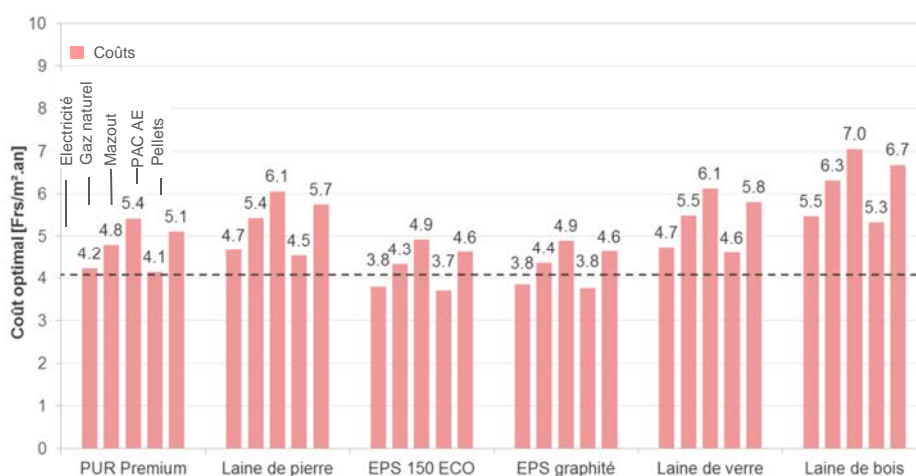


Figure 47: Coûts totaux des différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la toiture inclinée avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

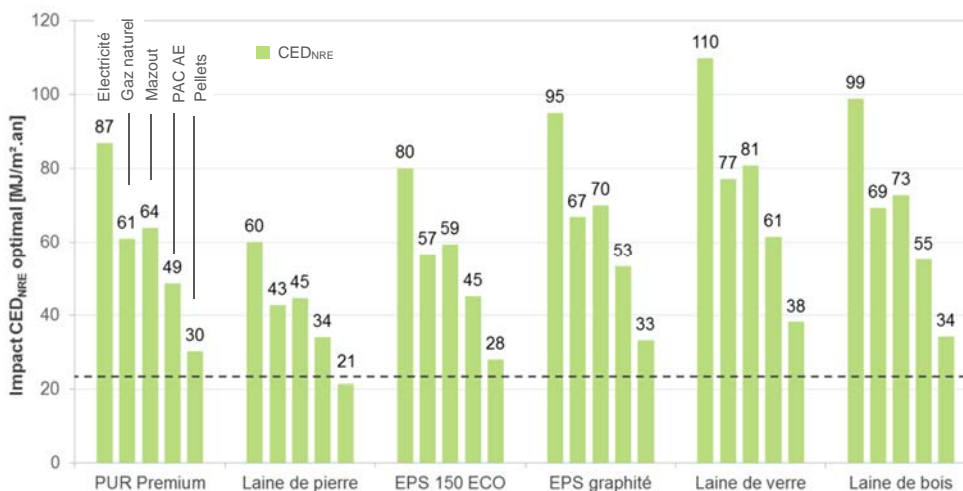


Figure 48: Impacts totaux (CED_{NRE}) des différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la toiture inclinée avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale



Figure 49: Impacts totaux (GWP) des différents couples isolants/systèmes de chauffage pour la toiture inclinée avec marge supérieure de 10% sur la valeur minimale

Pour la toiture inclinée, les couples *isolant/système de chauffage* optimaux sont pour l'indicateur financier les deux *EPS* couplés soit à une *PAC AE* ou un *chauffage électrique*. Pour l'indicateur CED_{NRE} , c'est le couple *laine de pierre/pellets* et pour l'indicateur GWP la *laine de pierre/PAC AE* ou *pellets*.

8.3 Synthèse des couples *isolant/système de chauffage* optimaux pour l'ensemble des éléments de construction

Le tableau 19 récapitule les couples optimaux *isolant/système de chauffage* pour les indicateurs de coûts financiers, et d'impacts environnementaux (CED_{NRE} et GWP) pour les quatre éléments de construction étudiés. Ces couples ont été déterminés à partir des résultats détaillés présentés dans la partie précédente (ch. 8.2). Sont considérés comme couple optimaux, tous les couples (en rouge italique dans le tableau) dont la valeur de l'impact est supérieure de moins de 10% de la valeur obtenue avec le meilleur couple (en vert). De manière analogue, sont reportées les EOI correspondantes à ces solutions optimales. A titre d'information, le CED_{TOT} est également reporté dans cette synthèse.

| Eléments | Indicateurs | | | |
|------------------|------------------------------------|----------|---------------------------------------------------|----------|
| | Coûts | | CED _{NRE} | |
| | Isolant/Syst. de chauffage | EOI [cm] | Isolant/Syst. de chauffage | EOI [cm] |
| Façade compacte | EPS/PAC AE | 11 | EPS/Pellets | 21 |
| | <i>EPS/Electricité</i> | 11 | <i>Laine de pierre/Pellets</i> | 23 |
| Façade ventilée | Laine de verre/PAC AE | 24 | Laine de pierre/Pellets | 38 |
| | <i>Laine de verre/Electricité</i> | 24 | | |
| | EPS graphité/PAC AE | 24 | | |
| | <i>EPS graphité/Electricité</i> | 24 | | |
| | Laine de pierre/PAC AE | 22 | | |
| | <i>Laine de pierre/Electricité</i> | 22 | | |
| Toiture plate | EPS 150 ECO/PAC AE | 36 | EPS 150 ECO/Pellets <i>PUR Premium/Pellets</i> | 24 14 |
| | <i>EPS 150 ECO/Electricité</i> | 37 | | |
| | EPS Graphité/PAC AE | 31 | | |
| | <i>EPS Graphité/Electricité</i> | 32 | | |
| | <i>PUR Premium/PAC AE</i> | 20 | | |
| Toiture inclinée | EPS 150 ECO/PAC AE | 37 | Laine de pierre/Pellets | 36 |
| | <i>EPS 150 ECO/Electricité</i> | 37 | | |
| | EPS Graphité/PAC AE | 34 | | |
| | <i>EPS Graphité/Electricité</i> | 34 | | |

| Eléments | Indicateurs | | | |
|------------------|--------------------------------|----------|-------------------------------------------------|----------|
| | GWP | | CED _{TOT} | |
| | Isolant/Syst. de chauffage | EOI [cm] | Isolant/Syst. de chauffage | EOI [cm] |
| Façade compacte | EPS/PAC AE | 17 | EPS/PAC AE <i>Laine de pierre/PAC AE</i> | 37 39 |
| | <i>EPS/Pellets</i> | 18 | | |
| | Laine de pierre/PAC AE | 19 | | |
| | <i>Laine de pierre/Pellets</i> | 20 | | |
| Façade ventilée | Laine de verre/PAC AE | 34 | Laine de pierre/PAC AE | 60 |
| | <i>Laine de verre/Pellets</i> | 34 | | |
| | Laine de pierre/PAC AE | 32 | | |
| | <i>Laine de pierre/Pellets</i> | 32 | | |
| Toiture plate | PUR Premium/PAC AE | 11 | EPS 150 ECO/PAC AE <i>PUR Premium/PAC AE</i> | 41 23 |
| | <i>PUR Premium/Pellets</i> | 12 | | |
| | EPS 150 ECO/PAC AE | 17 | | |
| Toiture inclinée | Laine de pierre/PAC AE | 27 | Laine de pierre/PAC AE | 55 |
| | <i>Laine de pierre/Pellets</i> | 31 | | |

Tableau 18: Couples *isolant/système de chauffage* optimaux et valeurs des EOI correspondantes pour les coûts, le CED_{NRE}, le GWP et le CED_{TOT} pour les quatre éléments de construction ; les valeurs en vert correspondent aux EOI optimaux et les valeurs en rouge aux couples dont la valeur de l'impact est supérieure de moins de 10% de la valeur obtenue avec le meilleur couple

Les résultats montrent que le(s) système énergétique(s) optimal reste le(s) même(s) pour un indicateur donné quel que soit l'élément de construction. La PAC AE (0.21 CHF/kWh_{utile}) est le système de chauffage le plus économique financièrement avec, des résultats très proches pour le système de chauffage à électricité directe (0.22 CHF/kWh_{utile}). Sur le plan environnemental, la PAC AE est également la meilleure option pour le GWP (suivi de près par le système de chauffage à pellets) et le CED_{TOT} tandis que le chauffage à pellets (1.2 [MJ/kWh_{utile}]) reste la solution optimale pour

réduire l'indicateur CED_{NRE} . Ces systèmes de chauffage sont, par contre, couplés à des isolants différents en fonction des éléments considérés (façades ou toitures).

Pour la façade compacte, l'EPS et la laine de pierre restent les plus avantageux quel que soit l'indicateur évalué. Pour la façade ventilée, trois isolants (laine de verre, EPS graphité et laine de pierre) correspondent aux solutions financièrement optimales. Les deux laines minérales sont les meilleures solutions au niveau du GWP alors que pour les indicateurs CED_{NRE} et CED_{TOT} , la laine de pierre se détache des autres isolants avec un impact relativement faible. Les isolants optimaux pour la toiture plate sont les deux EPS (150 ECO et graphité) et le PUR Premium d'un point de vue financier. Les trois autres indicateurs présentent des optimaux avec l'EPS 150 ECO et le PUR Premium.

Finalement, pour la toiture inclinée, ce sont les deux types d'EPS qui se détachent d'un point de vue financier et la laine de pierre pour les trois autres indicateurs.

Dans les cas de figure où les écarts sont faibles entre les solutions, il est nécessaire de vérifier la robustesse de ces résultats (EOI et couples optimaux) lorsque les paramètres de calcul sont modifiés (p. ex. évolution du coût de l'énergie, valeur du COP etc.) pour chaque indicateur.

9 Discussions et interprétations

L'objectif de cette partie est de discuter les résultats obtenus suivant trois niveaux différents. Dans un premier temps, les principaux paramètres influant les EOI seront analysés et des études de sensibilités réalisées. Puis, une deuxième partie présentera une discussion concernant la robustesse des couples optimaux identifiés pour chaque indicateur, les résultats étant liés à des paramètres incertains et variables comme les coûts des matériaux ou de l'énergie. Puis, nous comparerons les résultats de cette étude (méthode "EOI") par rapport aux calculs d'épaisseurs d'isolation selon les normes et les labels en vigueur. La figure 50 présente cette démarche en trois étapes.

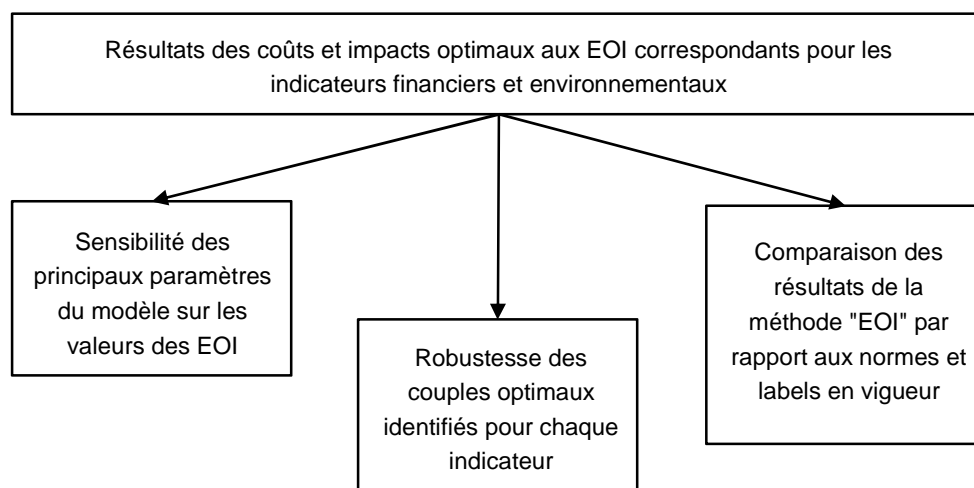


Figure 50: Démarche pour la discussion et l'interprétation des résultats obtenus

9.1 Sensibilité des paramètres du modèle sur les EOI

Les analyses de sensibilité ont pour objectif d'évaluer l'influence des principaux paramètres du modèle de calcul des EOI. Certains paramètres peuvent influencer à la fois les EOI financières et environnementales (p. ex. le climat ou la durée de vie des matériaux), tandis que d'autres influent uniquement sur l'EOI financière (cas des subventions accordées aux travaux de rénovations ou des doubléments d'épaisseurs).

Dans cette partie, l'influence des paramètres sur les valeurs des EOI est illustrée pour les couples *isolant/système de chauffage* de la toiture en pente. En effet, ces éléments de construction permettent de couvrir un grand nombre d'isolants, dont certains, comme l'EPS, sont communs aux autres éléments de construction (façades compacte et ventilée).

9.1.1 Climat

Le tableau 19 présente les trois stations météorologiques considérées dans cette analyse de sensibilité avec leurs degrés jours correspondants. Elles sont représentatives des grandes zones climatiques suisses à savoir le Plateau (cas de base), le Jura, les Alpes et le Sud des Alpes (Tessin). Cette étude est réalisée avec l'isolant PUR Premium, la démarche restant identique pour d'autres isolants.

| Région | Station météo | Degrés jours (DJ) calculés selon SIA 2028 [44] | Ecart relatif par rapport aux DJ de Berne |
|------------------------|---------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Plateau suisse | Berne (cas de base) | 3'958 | - |
| Jura | La Chaux-de-Fonds | 4'895 | +24% |
| Alpes | Davos | 5'977 | +51% |
| Tessin (Sud des Alpes) | Lugano | 2'742 | -31% |

Tableau 19: Stations météo considérées et degrés jours correspondants selon SIA 2028 [44]

Le tableau 20 présente les résultats des couples optimaux pour la toiture inclinée lorsque les données climatiques sont modifiées. Il fournit également les résultats de l'évolution des EOI en [cm], des coûts et des impacts CED_{NRE}, GWP et CED_{TOT} en [%] pour chaque météo par rapport à la station de référence (Berne). L'analyse est réalisée sur la base du couple optimal du Tableau 18.

| Toiture inclinée | Indicateurs | | | |
|--------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| | Coûts | CED _{NRE} | GWP | CED _{TOT} |
| La Chaux de Fonds | EPS 150 ECO/PAC AE EOI: +3 [cm] Coût à l'EOI: +11% | Laine de pierre/pellets EOI: +2 [cm] Impact à l'EOI: +11% | Laine de pierre/PAC AE EOI: +4 [cm] Impact à l'EOI: +12% | Laine de pierre/PAC AE EOI: +5 [cm] Impact à l'EOI: +12% |
| Davos | EPS 150 ECO/PAC AE EOI: +3 [cm] Coût à l'EOI: +22% | Laine de pierre/pellets EOI: +9 [cm] Impact à l'EOI: +23% | Laine de pierre/PAC AE EOI: +9 [cm] Impact à l'EOI: +24% | Laine de pierre/PAC AE EOI: +20 [cm] Impact à l'EOI: +24% |
| Lugano | EPS 150 ECO/PAC AE EOI: -5 [cm] Coût à l'EOI: -15% | Laine de pierre/pellets EOI: -9 [cm] Impact à l'EOI: -17% | Laine de pierre/PAC AE EOI: -5 [cm] Impact à l'EOI: -17% | Laine de pierre/PAC AE EOI: -10 [cm] Impact à l'EOI: -17% |

Tableau 20: Couples isolant/système de chauffage pour les coûts, le CED_{NRE}, le CED_{TOT} et le GWP pour les quatre éléments de construction ; les valeurs en rouge indiquent des variations positives des EOI, des coûts et des impacts ; les valeurs en vert indiquant des variations négatives

Ces résultats montrent que les couples optimaux restent les mêmes quelle que soit la station météo. Assez logiquement, les épaisseurs d'isolation augmentent pour les climats du Jura (La Chaux-de-Fonds) et des Alpes (Davos), tandis qu'elles tendent à diminuer pour le climat du Tessin (Lugano). En effet, les déperditions thermiques au travers de l'élément sont directement proportionnelles à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Le climat de Davos est, sans surprise, celui qui conduit à l'augmentation la plus élevée des coûts et impacts environnementaux aux EOI (de +22 à +24%) suivi par La Chaux-de-Fonds (de +11% à +12%) tandis que le climat de Lugano les réduit de près de 15%. Les EOI augmentent ou diminuent dans les mêmes proportions²³, étant donné qu'il y a une corrélation entre ces deux paramètres.

²³ En dehors des problèmes de blocage liés aux doublages d'épaisseurs lors de la mise en œuvre (cf. partie 9.1.3) pour une analyse de sensibilité détaillée sur cet aspect

9.1.2 Durée de vie

Les durées de vie des matériaux d'isolation sont des paramètres incertains des écobilans. Même si le cahier technique SIA 2032 recommande une durée de vie de 30 [ans] pour les isolants thermiques, cette valeur reste conventionnelle. Cependant, en pratique, la durée de vie des isolants reste un paramètre incertain qu'il est intéressant d'étudier. A titre d'illustration, la figure 51 présente l'évolution des EOI en fonction de l'impact CED_{NRE} selon trois durées de vie : 30 [ans] (cas de base selon SIA 2032), 15 [ans] et 45 [ans].

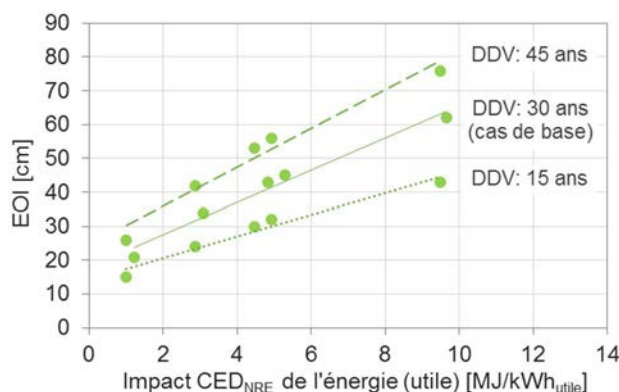


Figure 51: Influence de la durée de vie des matériaux sur les EOI environnementales (CED_{NRE}) pour une façade compacte isolée avec un EPS

Ce type de résultat se retrouve pour les autres indicateurs (GWP, CED_{TOT} mais aussi pour les coûts) et éléments de construction (façade ventilée, toitures plate et ventilée). En effet, une augmentation uniforme de la durée de vie pour tous les isolants revient à augmenter les EOI, car, l'amortissement des coûts d'isolant (financier ou environnementaux) par la non-consommation d'énergie de chauffage peut se faire sur une plus longue durée (et inversement pour la diminution de la durée de vie).

9.1.3 Doublements d'épaisseurs lors de la mise en œuvre

Les résultats présentés au travers du chapitre 0 ont montré que l'EOI financière varie entre 10 et 45 [cm] selon le type d'isolants et l'élément de construction étudié. Une des hypothèses potentiellement sensible dans notre modèle de calcul concerne le doublement d'épaisseurs lors de la pose. Ce doublement intervient lorsqu'il est plus raisonnable de poser plusieurs couches, soit pour des raisons de disponibilité de matériau, soit pour des raisons de pose. Les épaisseurs considérées ont été fournies par des professionnels du domaine des isolants et sont proches des épaisseurs maximales commercialisées. Ils entraînent une augmentation "subite" des coûts financiers à l'épaisseur correspondante et peuvent modifier les EOI et leurs fourchettes graphiques si ces doublements se situent à proximité de l'EOI (cf. figure 24, page 51 dans le cas de la façade ventilée).

A titre d'illustration, la figure 52 présente une comparaison des représentations graphiques des EOI financières avec et sans doublement d'épaisseurs lors de la pose pour une toiture inclinée isolée avec le couple *EPS 150 ECO/chauffage à Pellets* (pris comme exemple) en distinguant trois cas de figure :

- Le premier cas correspond aux résultats déjà présentés dans la partie 8.2.4 i.e. avec une hypothèse de doublement proche de l'épaisseur maximale commercialisée
- Le deuxième cas "sans doublement de pose" correspond à l'état de l'art des travaux déjà publiés dans ce domaine (cf. partie 3).
- Le troisième cas correspond à une hypothèse de doublement de pose dès 20 [cm] quel que soit le type d'isolant²⁴.

²⁴ Dans la pratique, les épaisseurs d'isolants peuvent être doublées bien avant l'épaisseur maximale commercialisée, cette façon de faire permettant de diminuer au maximum les ponts thermiques dus à des imprécisions de pose et de découpe sur le chantier. Par exemple, si 16 cm

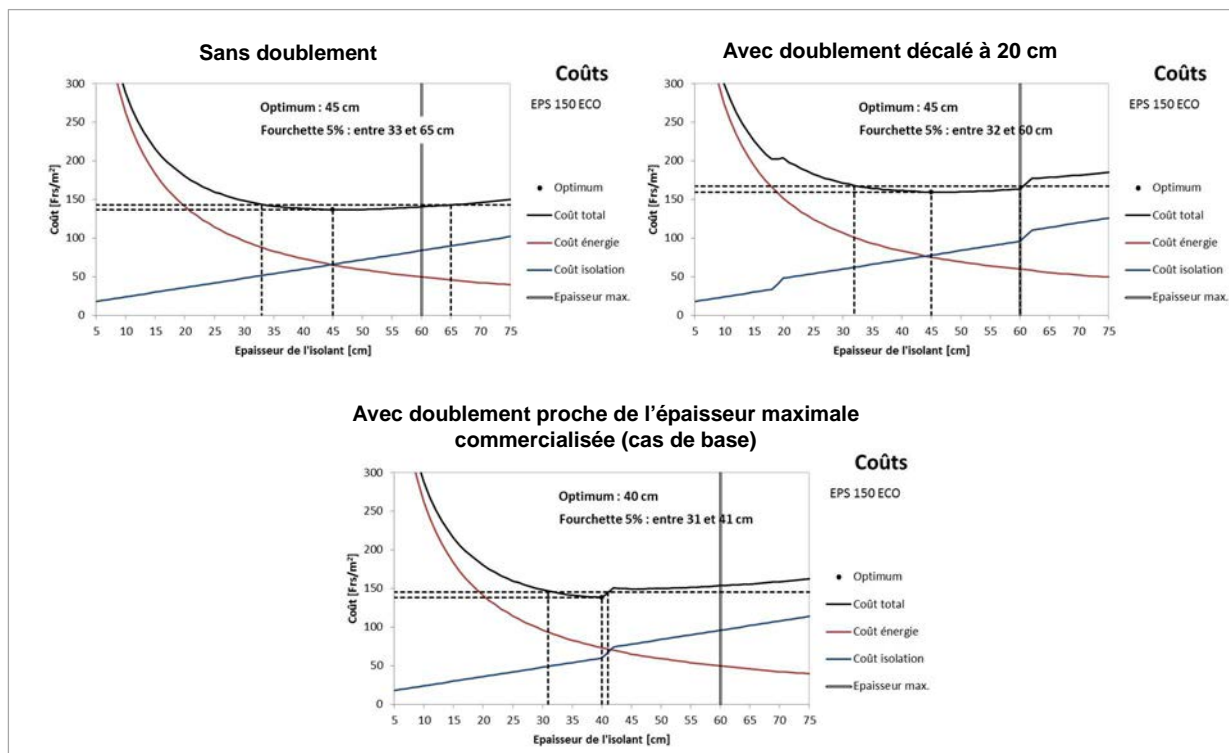


Figure 52: Représentation graphique des EOI financières pour une toiture inclinée isolée avec de l'EPS 150 ECO avec un chauffage à pellets. Les résultats sans doublage sont présentés en haut à gauche ; ceux avec doublage à 20 [cm] en haut à droite et ceux du cas de base en bas

Les résultats montrent que les cas de figure "sans doublage" et "avec doublage décalé à 20 [cm]" conduisent à des valeurs d'EOI identiques (45 [cm]). Ces résultats se distinguent de ceux du cas de base (EOI égale à 40 [cm]). Dans l'hypothèse d'un doublage à 20 [cm], l'EOI se trouve suffisamment éloignée des épaisseurs de doublage pour ne pas être influencée. Cette situation ne se retrouve pas dans le cas de base où l'EOI est "bloquée" à l'épaisseur de doublage (40 [cm]). Cet exemple montre que les EOI peuvent varier de plusieurs centimètres entre notre étude et les valeurs de la littérature (cas "sans doublage"). Il dépend également des couples *isolant/système de chauffage*. Dans certains cas, l'EOI peut ne pas varier.

9.1.4 Subventions allouées aux travaux de rénovations

Lors de travaux de rénovation énergétique, il existe de nombreuses mesures incitatives comme les subventions accordées par la Confédération via le programme Bâtiments [1]. Ces subventions permettent d'alléger le coût financier de la rénovation énergétique et peuvent modifier les valeurs des épaisseurs optimales d'isolation. Par exemple, lorsque la rénovation permet d'atteindre une valeur U d'un élément en contact avec l'extérieur inférieure ou égale à 0.20 [W/m².K], 30 francs suisse sont accordés par m² d'élément de construction.

En complément à cette subvention fédérale, des subventions cantonales existent mais ne sont pas toujours calculées par m² d'élément de construction. C'est notamment le cas du canton de Berne qui verse des subventions à l'échelle du bâtiment complet et par m² de SRE (surface de référence

de laine de bois doit être posée, il peut arriver qu'elle soit posée en deux couches de 8 cm plutôt qu'en une couche de 16 cm. [Information recueillie auprès d'un expert du bâtiment (M. Pittet)]

énergétique) qui ne peuvent être transposables dans le modèle de calcul des EOI. Sur le plan romand, seuls les cantons de Vaud et de Fribourg proposent des subventions par m² de façade, celles-ci complétant les subventions du programme Bâtiment pour des valeurs $U \leq 0.15$ [W/m².K]. Pour mener à bien cette analyse de sensibilité, les subventions du canton de Vaud ont été considérées. Le tableau suivant présente les subventions correspondantes aux valeurs U cibles :

| Valeur U [W/m ² .K] | ≤ 0.2 | ≤ 0.15 | ≤ 0.11 |
|-----------------------------------|------------|-------------|-------------|
| Subventions [CHF/m ²] | 30.- | 50.- | 70.- |

Tableau 21: Subventions accordées par m² de façade par le canton de Vaud (VD) et le programme Bâtiments

L'influence des subventions est illustrée dans le cas d'un chauffage par PAC AE identifié comme solution optimale dans les résultats de la partie 8. Le climat de référence reste celui de Berne étant donné qu'il est représentatif de l'ensemble du plateau Suisse (bassin lémanique compris)²⁵. Sans surprise, la subvention permet de réduire le coût de la rénovation comme le montre la figure 53. La valeur de la subvention étant la même pour chaque isolant, cela signifie que les EOI ont des coefficients U compris dans la même plage de valeur ($U \approx 0.12$ [W/m².K]). Les coûts totaux à l'optimum d'isolation baissent d'environ 40 à 70%. Dans le cas du PUR Premium, de l'EPS 150 ECO et de l'EPS graphité la subvention permet même de rembourser intégralement le coût des isolants.

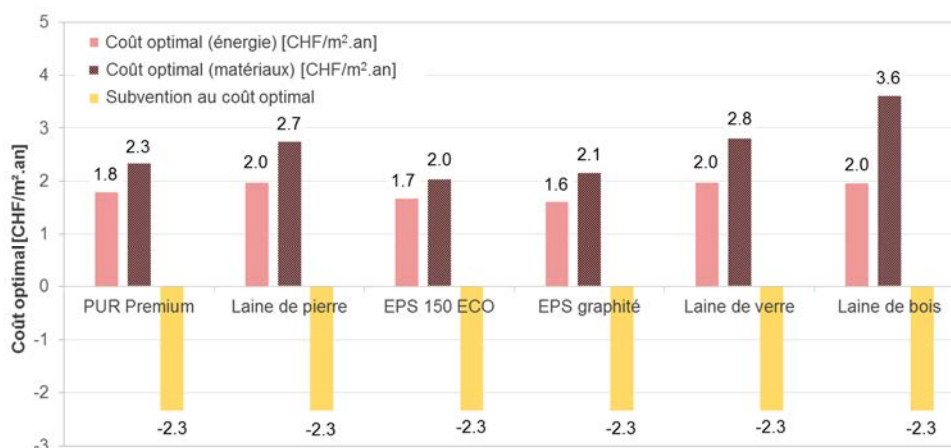


Figure 53: Coûts liés à l'énergie de chauffage, à l'isolation et aux subventions aux EOI pour les différents couples isolants – PAC AE pour la toiture inclinée (climat Berne, subventions VD)

La figure 54 présente les modifications d'EOI financières pour les isolants de la toiture inclinée avec et sans subvention. L'EOI environnementale (CED_{NRE}) est également reportée à titre de comparaison.

²⁵ Un travail de diplôme de la HEIG-VD [34] montre que la modification du climat entre les différentes stations météorologiques du plateau Suisse ne modifie pas les EOI.

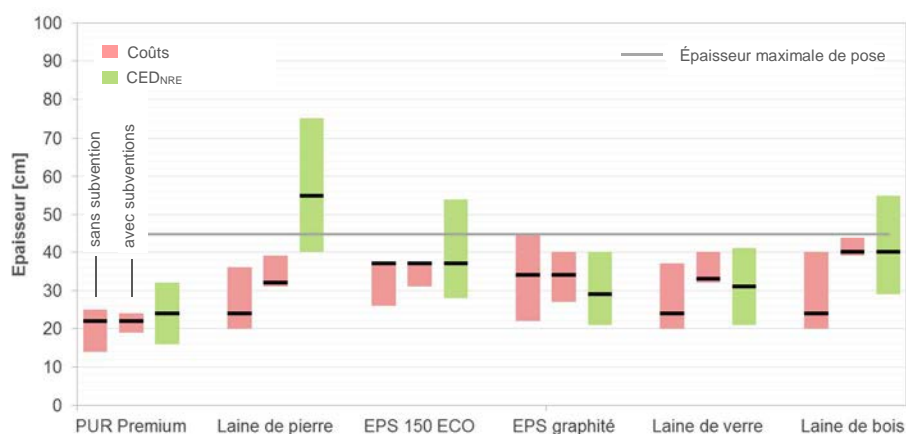


Figure 54: EOI financières sans subvention, avec subventions et EOI environnementales (CED_{NRE}) pour une toiture inclinée et un chauffage par PAC AE

Comme indiqué plus haut, les subventions interviennent selon la valeur U de l'élément de construction. Si l'épaisseur d'isolation optimale obtenue sans subvention permet de satisfaire un $U \leq 0.11$ [W/m².K], l'octroi d'une subvention n'aura pas (ou peu) d'influence sur la valeur de l'EOI (trait noir horizontal), comme ici pour le cas du PUR Premium, de l'EPS 150 ECO et de l'EPS graphité mais entraînera une diminution du coût à l'optimum. Pour les autres isolants, un saut relativement important d'EOI est observé. Ce saut est directement lié à la baisse de la valeur U jusqu'à une valeur en dessous de 0.11 [W/m².K]. Cela permet aux EOI financières de la laine de pierre et de la laine de bois de se rapprocher de leurs EOI environnementales tout en restant sur des épaisseurs de pose "réalistes" selon les techniques actuelles.

La figure 55 permet d'illustrer ces deux phénomènes différents en prenant deux isolants représentatifs : l'EPS 150 ECO et la laine de bois. Le mode de représentation n°1 présenté dans la partie 8.1.1 permet de visualiser à la fois la position de l'EOI et l'influence de la subvention sur la courbe noire des coûts financiers totaux.

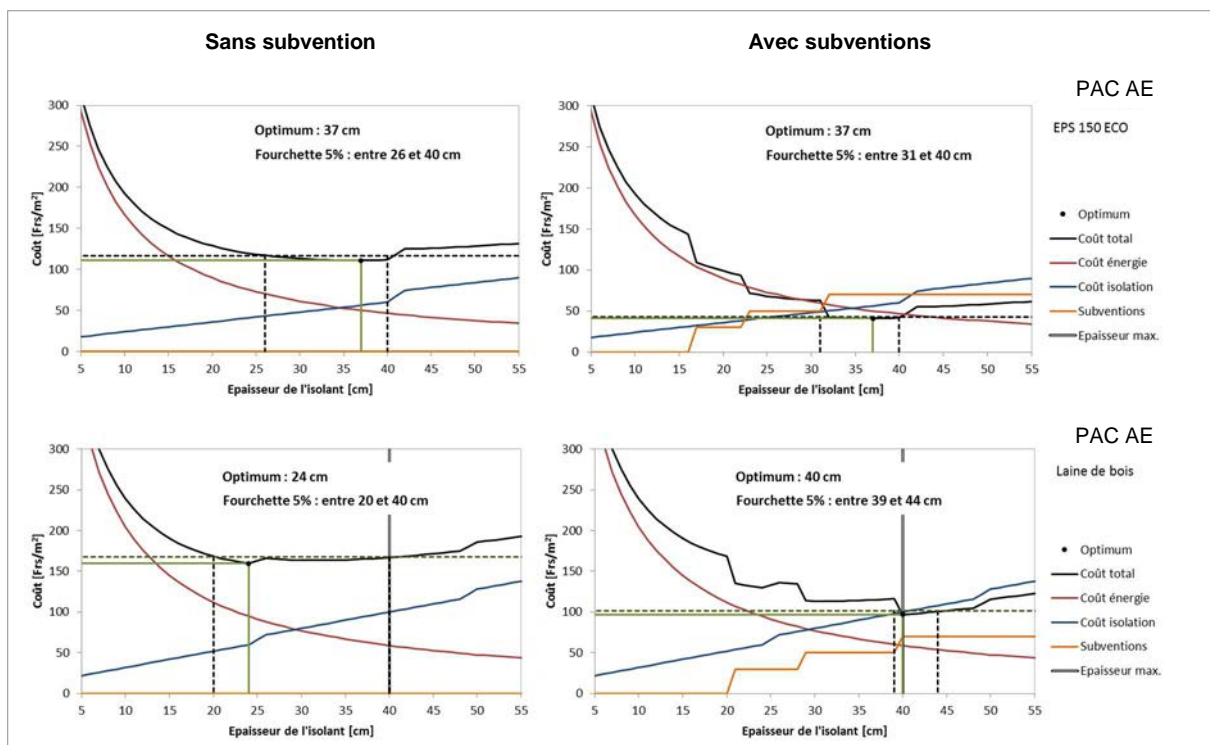


Figure 55: Représentation graphique des EOI financières pour une toiture inclinée isolée avec de l'EPS 150 ECO (en haut) et de la laine de bois (en bas), avec un chauffage par PAC AE dans les deux cas. Les résultats sans subvention sont présentés à gauche ; ceux avec subventions (VD) sont présentés à droite

La figure 55 montre, par exemple, que l'effet de la subvention (courbe orange) se produit jusqu'à une épaisseur de 32 [cm] pour l'EPS 150 ECO, valeur très proche de l'EOI sans subvention. La prise en compte de la subvention, dans ce cas précis, ne modifie donc pas l'EOI.

En ce qui concerne les autres isolants (laine de pierre, laine de verre et laine de bois), les EOI sans subvention sont bloqués à l'épaisseur de doublement à savoir 24 [cm] (cf. figure 54).

Pour ces trois laines, la prise en compte des subventions conduit à réduire les coûts financiers totaux d'une telle façon que la nouvelle EOI dépasse l'EOI sans subvention. Dans le cas de la laine de bois, la représentation graphique de la figure 55 montre une réduction des coûts financiers grâce à la subvention jusqu'à 40 [cm], valeur pour laquelle la valeur U de la paroi est désormais inférieure ou égale à $0.11 \text{ [W/m}^2\text{.K]}$. L'EOI passe alors, pour le couple *laine de bois*/PAC AE, de 24 [cm] à 40 [cm]. Les fiches de synthèse en annexe 4 présentent l'ensemble des résultats avec subventions.

9.1.5 Autres analyses de sensibilité

D'autres analyses de sensibilité peuvent être réalisées sur certains paramètres du modèle comme par exemple l'influence des fixations (prises en compte dans le modèle simplifié de calcul des EOI) ou l'influence des prix des isolants. Un travail de diplôme de la HEIG-VD [34] a, par exemple, montré que la non prise en compte des fixations dans le calcul des déperditions des éléments ne modifiait pas le classement des EOI, ni celui des impacts optimaux.

De manière analogue, une augmentation du prix des isolants (p. ex. +20 [%]) conduit à diminuer les EOI [34]. A l'inverse, lors que l'évolution des coûts de l'énergie est augmentée de +1 ou +2 [%] par rapport à l'évolution des coûts de l'énergie de la norme SIA 480, les EOI ont tendance à augmenter. A nouveau, ces paramètres ne modifient pas le classement des couples optimaux, tous les couples étant augmentés du même facteur.

9.1.6 Synthèse de l'influence des paramètres du modèle sur les EOI

Ces analyses de sensibilité ont permis de montrer l'influence des paramètres de calcul. Le tableau 20 récapitule les paramètres du modèle et précise, en fonction de son évolution, l'évolution conjointe de l'EOI. Choisir un climat plus froid, augmenter les durées de vie, la résistance thermique de l'isolant ou les coûts/impacts des systèmes de chauffage conduit à augmenter l'EOI. A l'inverse l'augmentation du coût ou de l'impact du matériau conduit plutôt à diminuer l'EOI

| Paramètre | Evolution du paramètre | Evolution de l'EOI |
|-----------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Climat | plus le climat est rude... | ...plus l'EOI ↗ |
| Durée de vie | ↗ | ↗ |
| Conductibilité thermique de l'isolant | ↗ | ↗ |
| Coût ou impacts de l'énergie | ↗ | ↗ |
| Coût ou impacts de l'isolant | ↗ | ↘ |
| Coefficient κ "apports solaires" | ↘ | ↘ |

Tableau 22: Bilan de l'évolution de l'épaisseur optimale d'isolation selon différents paramètres

En complément, les analyses de sensibilité ont montré que les doublements d'épaisseur et les subventions peuvent modifier certaines EOI en fonction du positionnement de celui-ci par rapport aux épaisseurs de doublement et en fonction de la valeur U de l'élément à l'EOI.

9.2 Robustesse des couples optimaux

9.2.1 Evolution des coûts de l'énergie et des performances des systèmes de chauffage

Les résultats de la partie 8 interrogent quant à la robustesse des couples optimaux obtenus aux EOI lorsque les valeurs des paramètres n'évoluent pas dans le même sens entre les systèmes de chauffage. Par exemple, les coûts de l'énergie sont des données très sensibles au contexte et peuvent évoluer en dehors des scénarios d'évolution de la norme SIA 480.

Les résultats de couples optimaux par indicateur sont d'autant plus robustes que l'écart relatif entre le couple optimal et le suivant est élevé. Sinon, en tenant compte d'une marge d'erreur de 10 à 20 [%], des inversions sont possibles lorsque les couples ont des coûts ou des impacts distants de quelques [%].

Comme il existe une relation linéaire entre le coût ou l'impact du système de chauffage et les EOI et leurs optimums correspondants, la robustesse des couples optimaux dépend alors de l'indicateur et des écarts de coûts ou d'impacts entre les systèmes de chauffage étudiés. Il suffit alors que le prix ou la performance (p. ex. valeur du COP de la PAC) évolue de quelques pourcents pour inverser les tendances.

Par exemple, le couple optimal *laine de pierre/PAC AE* de la toiture inclinée pour le GWP ayant un écart de moins de 10 [%] avec le couple *laine de pierre/pellets*, le choix n'est, en l'état, pas robuste. Outre la possible évolution des prix de l'énergie des pellets et de l'électricité, la valeur du COP est également une donnée variable. Un COP de 3.3 a été considéré dans le cas de base mais dans la réalité, le COP peut varier entre 2 et 5 selon les contraintes climatiques ou les performances de la PAC installée. Ainsi, plus le COP est élevé, plus l'impact GWP devient faible, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'écart entre le couple optimal *laine de pierre/PAC AE* et le couple *laine de pierre/pellets*.

A titre d'illustration, la figure 56 présente la relation linéaire entre le COP et les impacts GWP du couple *laine de pierre/PAC AE* de la toiture inclinée. En partant de l'impact GWP du couple *laine de pierre/pellets* (1.28 [kg eq-CO₂/kWh_{utile}]), il est possible de déterminer la valeur du COP limite en dessous de laquelle le couple optimal pour le GWP deviendrait le couple *laine de pierre/pellets*. Dans cet exemple, le COP limite est égal à 3.1 environ.

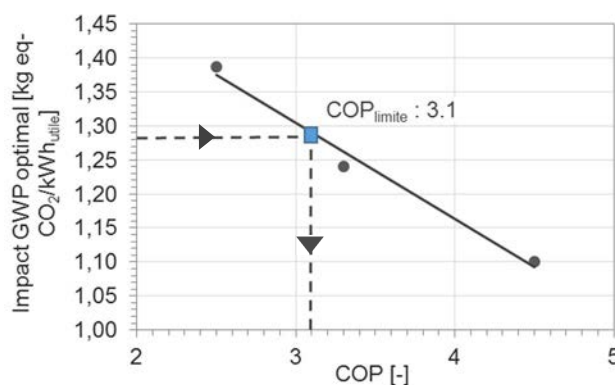


Figure 56: Impact GWP en fonction du COP de la PAC pour le couple laine de pierre/PAC AE de la toiture inclinée

Dans ce contexte, les écarts relatifs entre les coûts et les impacts unitaires par [kWh_{utile}] des systèmes de chauffage restent des points clés dans ce type d'analyse.

9.2.2 Coûts de l'énergie en fonction du type de rénovation

Une deuxième limite de l'étude concerne les coûts de l'énergie selon le type de rénovation. Comme mentionné dans les hypothèses sur les coûts des systèmes de chauffage (cf. chapitre 7.1.3.1, page 35), il est possible d'avoir de fortes différences sur le prix du kWh_{utile} considéré selon qu'il faille, ou non, créer une distribution de chaleur, ajouter un silo ou une citerne de stockage, modifier (ou créer) un local technique ou autre et ceci selon le choix énergétique effectué.

Ainsi, sur la base du bâtiment étudié dans le WP3 du projet ECO-Réno [36], il est possible de modifier les coûts énergétiques du cas de base en y ajoutant la distribution de chaleur (cas de rénovation de bâtiments avec remplacement du chauffage électrique direct), ceci pour tous les systèmes de chauffage sauf pour l'électrique. Le tableau 23 montre les nouveaux coûts par système de chauffage et les écarts relatifs par rapport aux coûts considérés dans le cas de base.

| Système de production de chaleur | Electricité | Gaz | Mazout | PAC air/eau | Pellets |
|--------------------------------------------------------------|-------------|-------|--------|-------------|---------|
| Prix en [Frs/kWh _{utile}] avec la distribution | 0.22 | 0.64 | 0.72 | 0.46 | 0.57 |
| Ecart relatif [%] par rapport aux coûts sans la distribution | 0% | +120% | +95% | +119% | +72% |

Tableau 23: Coût du kilowattheure utile pour les cinq systèmes de chauffage avec et sans distribution

La figure 57 présente les résultats comparatifs des couples *EPS 150 ECO/système de chauffage* pour une toiture inclinée, le couple *EPS 150 ECO/PAC AE* représentant le couple optimal dans le cas de base.

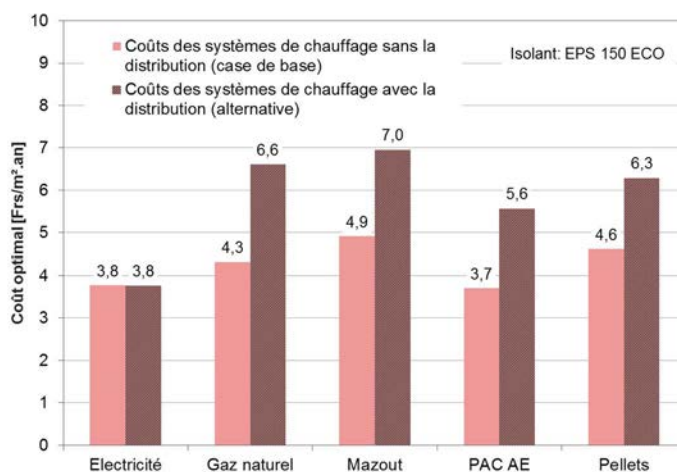


Figure 57: Présentation des coûts optimaux pour les couples *EPS 150 ECO/système de chauffage* avec et sans la distribution

Les résultats montrent qu'en cas de rénovation d'un système électrique par un autre vecteur utilisant une distribution hydraulique, le coût lié à cette distribution devient important. La solution de rénovation par un nouveau système électrique devient la plus économique, son coût restant stable. Le classement des autres systèmes de chauffage reste le même et ne change pas les tendances déjà observés dans le cas de base. Ce résultat se retrouve pour tous les éléments de construction.

Cependant, le contexte politique actuel tend à supprimer, voire à interdire le chauffage électrique direct. En écartant cette solution, le couple optimal resterait donc le couple *EPS 150 ECO/PAC AE*.

9.2.3 Evolution des valeurs d'impacts environnementaux de la base KBOB

Les données d'impacts environnementaux des matériaux et de l'énergie sont des paramètres plus stables que les coûts financiers. Toutefois, il peut exister, là aussi, des variabilités sur les données d'entrée du modèle de calcul des EOI. Les données d'écobilans de cette étude proviennent de la base de données KBOB 2009/1:2012. Une nouvelle version de cette base est disponible depuis peu (KBOB 2009/1:2014). Le tableau 24 présente les écarts relatifs sur les indicateurs CED_{NRE} et GWP pour les six isolants de la toiture plate²⁶.

| Isolants | CED _{NRE} | GWP |
|------------------|--------------------|------|
| PUR Premium | +1% | +6% |
| Laine de pierre | -2% | +6% |
| EPS graphité | 0% | +2% |
| Laine de verre | -62% | -44% |
| Laine de bois | +2% | +2% |
| Verre cellulaire | -1% | +1% |

Tableau 24: Ecart relatif sur les impacts des isolants entre les versions 2012 et 2014 de la base KBOB

Ce tableau montre que les valeurs d'impacts des isolants subissent de très faibles variations entre les deux versions de la base de données à l'exception de la laine de verre. Pour ce dernier isolant, la mise à jour des données conduit à une réduction des impacts de 62% pour l'indicateur CED_{NRE} et de 44% pour le GWP, diminution en grande partie liée aux impacts de la phase de production (amélioration du procédé). De manière analogue, le tableau 25 présente les écarts relatifs pour les systèmes de chauffage. Les écarts restent faibles (de l'ordre de +/- 10%). Seuls exceptions, le GWP du gaz naturel qui baisse de 22% et celui du mazout qui augmente de 23%.

| Systèmes de chauffage | CED _{NRE} | GWP |
|-----------------------|--------------------|------|
| Electricité | +2% | -7% |
| Gaz naturel | +11% | -22% |
| Mazout | +6% | +23% |
| PAC AE | +2% | -7% |
| Pellets | -6% | -6% |

Tableau 25: Ecart relatif sur les impacts des systèmes de chauffage entre les versions 2012 et 2014 de la base KBOB

La figure 58 présente une comparaison du couple optimal dans le cas de base (KBOB : 2012) pour les deux indicateurs CED_{NRE} et GWP.

²⁶ L'isolant EPS 150 ECO n'est pas reporté ici étant donné qu'il s'agit d'une donnée d'écobilan d'un fabricant, non-intégré à la base KBOB

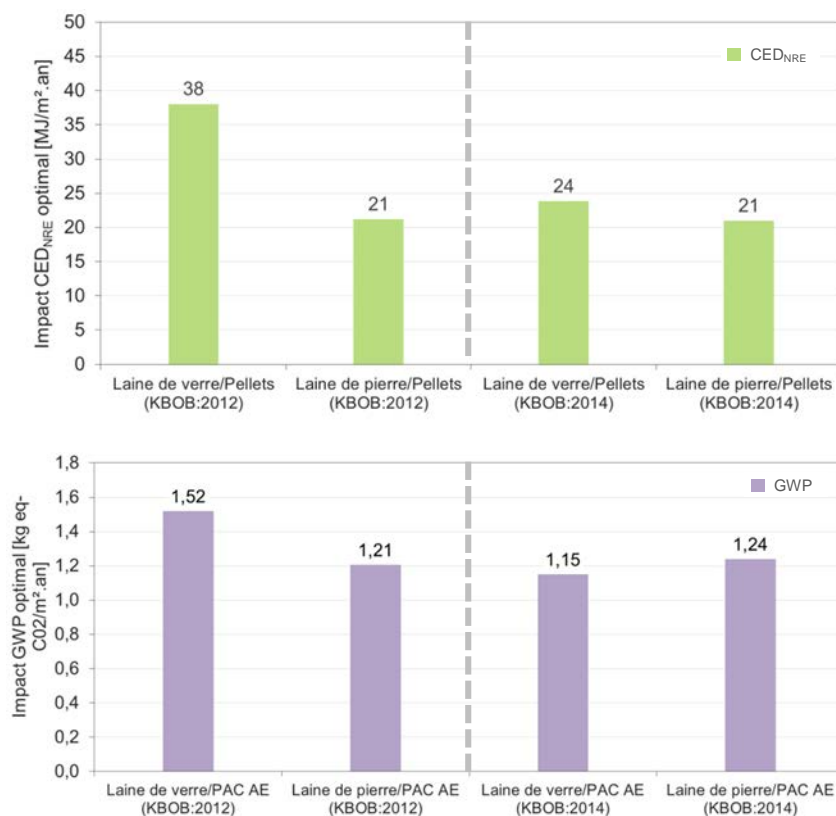


Figure 58: Comparaison des impacts optimaux CED_{NRE} (à gauche) et GWP (à droite) selon la version de la base KBOB pour les couples laine de verre/PAC AE, laine de pierre/PAC AE (couple optimal avec la KBOB: 2012) pour une toiture inclinée

Ces résultats montrent que la mise à jour de la base de données d'impacts ne change pas les classements des couples optimaux pour le CED_{NRE} ; le couple *laine de pierre/chauffage à pellets* restant la meilleure solution avec 21 [MJ/m².an] contre 24 [MJ/m².an] désormais pour la laine de verre selon la modélisation KBOB:2014. En revanche, la mise à jour des impacts GWP des isolants modifie le classement des couples optimaux ; désormais, le couple *laine de verre/pellets* représente le couple optimal avec 1.15 [kg eq-CO₂/m².an], le couple *laine de pierre/pellets* ayant un impact GWP en très légère hausse, et atteignant 1.24 [kg eq-CO₂/m².an]. Cet exemple rappelle qu'en plus des coûts des matériaux et des systèmes de chauffage, il est également important de tenir à jour les bases de données d'impacts lorsque des EOI et couples optimaux doivent être déterminés.

9.2.4 Précision des données de durée de vie par isolant

Même si la norme SIA 2032 précise que les durées de vie des isolants sont conventionnellement égales à 30 [ans], certaines études, dans le domaine de l'évaluation des durées de vie des isolants, montrent que les isolants ont rarement la même valeur de durée de vie [45]. C'est notamment le cas du verre cellulaire qui se distingue des autres isolants. Des travaux montrent qu'il peut durer plus longtemps que les isolants traditionnels²⁷. L'allongement de sa durée de vie par rapport aux autres isolants peut ainsi lui permettre d'amortir ses coûts et impacts. A titre d'illustration, la figure 59 présente les impacts CED_{NRE} optimaux et les EOI correspondants du couple *verre cellulaire/système de chauffage* pour deux durées de vie (30 [ans] et 60 [ans]). Les résultats sont comparés, dans ce tableau, aux couples optimaux identifiés pour la toiture plate dans le cas de base.

²⁷ Certains articles de la littérature montrent que le verre cellulaire a une durée de vie plus longue que les autres isolants thermiques : http://ch.foamglas.com/_/frontend/handler/document.php?id=900&type=42

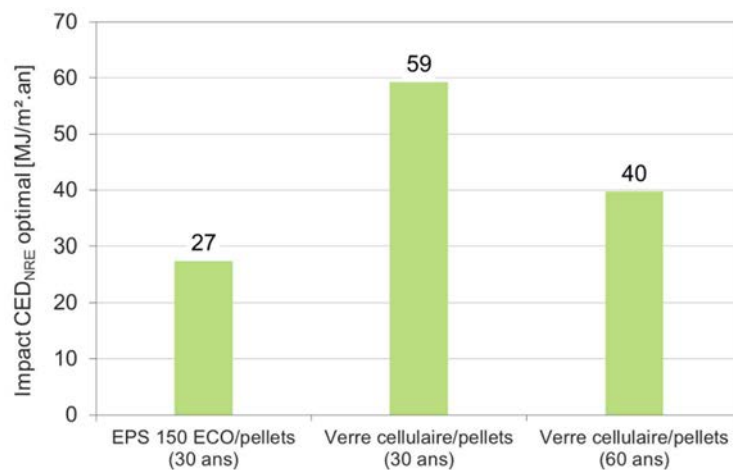


Figure 59: Impact CED_{NRE} du couple optimal (EPS 150 ECO/pellets) dans le cas de base comparé aux résultats du couple verre cellulaire/pellets pour une durée de vie de l'isolant de 30 ans et 60 ans pour la toiture plate

Même si l'allongement de la durée de vie de 30 [ans] à 60 [ans] conduit à une augmentation des EOI environnementales (cf. partie 0) et à un amortissement des impacts optimaux pour le verre cellulaire, le choix du couple optimal pour la toiture plate n'en serait pas modifié. Il s'agirait toujours de l'*EPS 150 ECO/Pellets* pour l'indicateur CED_{NRE} . Une démarche identique s'applique également pour le GWP, le CED_{TOT} , l'indicateur financier et ne montre aucune modification des couples optimaux.

9.3 Comparaison de l'approche par EOI par rapport aux normes et labels en vigueur

L'analyse principale présentée dans ce rapport a montré que les EOI financières sont, en général, plus faibles que les EOI environnementales pour les quatre éléments de construction étudiés. Des analyses de sensibilité ont ensuite montré l'influence de certains paramètres du modèle sur la sensibilité des résultats des EOI et sur la robustesse des couples optimaux *isolant/système de chauffage*. Cependant, les EOI n'ont pas encore été comparées, pour un système de chauffage donné, aux épaisseurs d'isolation habituellement calculées et installées selon les normes et les labels énergétiques en vigueur. L'objectif de cette partie est de positionner les épaisseurs optimales d'isolation par rapport à celles définies dans les normes et labels reconnus. De manière analogue, les coûts financiers et les impacts environnementaux à ces différentes épaisseurs d'isolation seront aussi comparés.

La norme SIA 380/1 offre deux possibilités pour effectuer un bilan thermique. La première consiste à faire un bilan global prenant en compte les ponts thermiques et la seconde en un bilan ponctuel avec des exigences par éléments (valeurs U limites). Cette approche s'applique quel que soit la cible (bâtiment neuf ou rénovation) ; seule les valeurs U limites changent.

Au niveau des labels, Minergie® propose des valeurs U limites pour des éléments en contact avec l'extérieur uniquement pour le neuf ; les valeurs cibles pour la rénovation correspondent aux exigences de la norme SIA 380/1. Enfin, Minergie-P® recommande des valeurs U pour les bâtiments neufs inférieures ou égales à 0.10 [W/m².K]. Les valeurs U limites pour le label Minergie-P® rénovation ont été calculées en considérant 80% de la valeur limite du besoin de chaleur pour le chauffage selon la norme SIA 380/1 ($Q_{h,li}$) pour la rénovation. Le tableau 26 résume les exigences sur les valeurs U ponctuelles dans le cas d'un bâtiment neuf et d'une rénovation pour la norme SIA 380/1, le label Minergie® et le label Minergie-P®.

| Référentiels | Exigences minimales sur les valeurs U [W/m².K] selon... | |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------|
| | Neuf | Rénovation |
| Norme SIA 380/1 | 0.20 | 0.25 |
| Label Minergie® | 0.15 | 0.25 |
| Programme Bâtiments (mesure incitative fédérale) | - | 0.20 |
| Label Minergie-P® | 0.10 | 0.135 |

Tableau 26: Valeurs U ponctuelles maximales admises pour des éléments de construction en contact avec l'extérieur selon différents référentiels

La comparaison des résultats des EOI et des couples optimaux avec les exigences des normes et labels est disponible dans les fiches de synthèse en annexe 3 pour tous les couples *isolant/système de chauffage* de chaque élément de construction.

A titre d'exemple, la figure 60 présente le positionnement des EOI financière et environnementales (CED_{NRE} , CED_{TOT} , et GWP) par rapport aux exigences de la norme SIA 380/1 neuf (correspondant à celles du Programme Bâtiments en rénovation) et rénovation et pour le label Minergie-P® (neuf ou rénovation) pour une toiture en pente et un chauffage par PAC AE. Pour ne pas alourdir le graphique, les épaisseurs correspondantes au label Minergie® ne sont pas représentées ; l'exigence pour une rénovation étant par ailleurs la même que celle de la norme SIA 380/1 (cf. tableau 26), alors que la figure 61 montre les coûts et impacts correspondant aux différents référentiels.

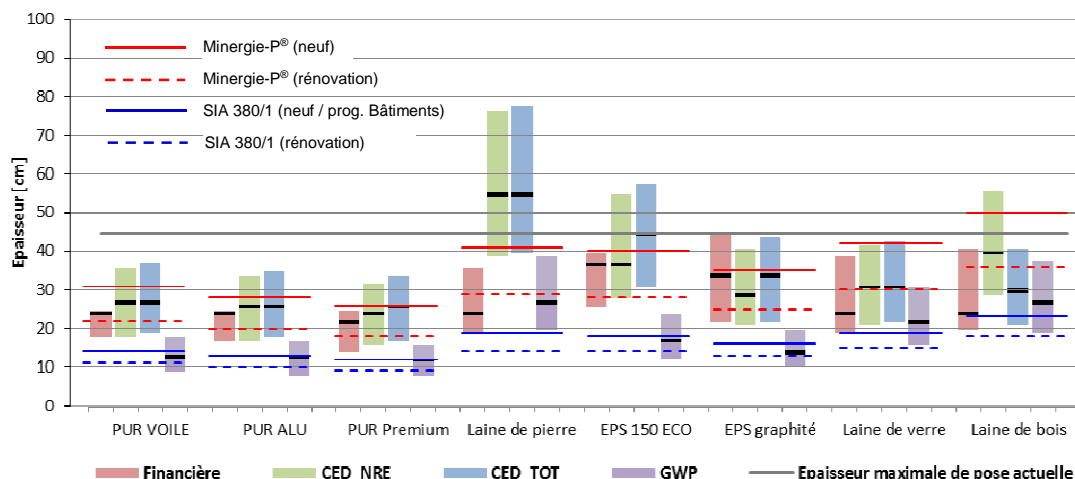


Figure 60: EOI financière et environnementale (CED_{TOT} , CED_{NRE} , GWP) avec les épaisseurs selon les exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour chaque isolant de la toiture inclinée et un système de chauffage par PAC AE

Les résultats montrent que toutes les EOI se situent au-delà des épaisseurs d'isolations respectant les exigences de la norme SIA 380/1 (neuf ou rénovation). L'EOI financière se situe généralement entre l'épaisseur selon SIA 380/1 neuf (ou Programme Bâtiments) et l'épaisseur selon Minergie-P® rénovation. Elle se situe même au-delà pour les variantes avec EPS (150 ECO ou graphité). Dans cet exemple, les limites Minergie-P® neuf permettent de se rapprocher remarquablement des EOI environnementales.

La comparaison des coûts et impacts totaux (figure 61) montre que la méthode "EOI" permet de minimiser les coûts financiers ou impacts environnementaux selon CED_{NRE} pour chaque couple *isolant/PAC AE*. Les normes et/ou les labels sont systématiquement supérieurs ou égaux.

Ainsi, et il est important de le relever, le respect des normes en vigueur sur les valeurs U ponctuelles selon SIA rénovation, SIA construction neuve ou le programme Bâtiments entraînent, pour la toiture inclinée, à la fois des surcoûts financiers de l'ordre de 0.5 à 1 [CHF/m².an] et des impacts environnementaux majorés de 20 à 50%.

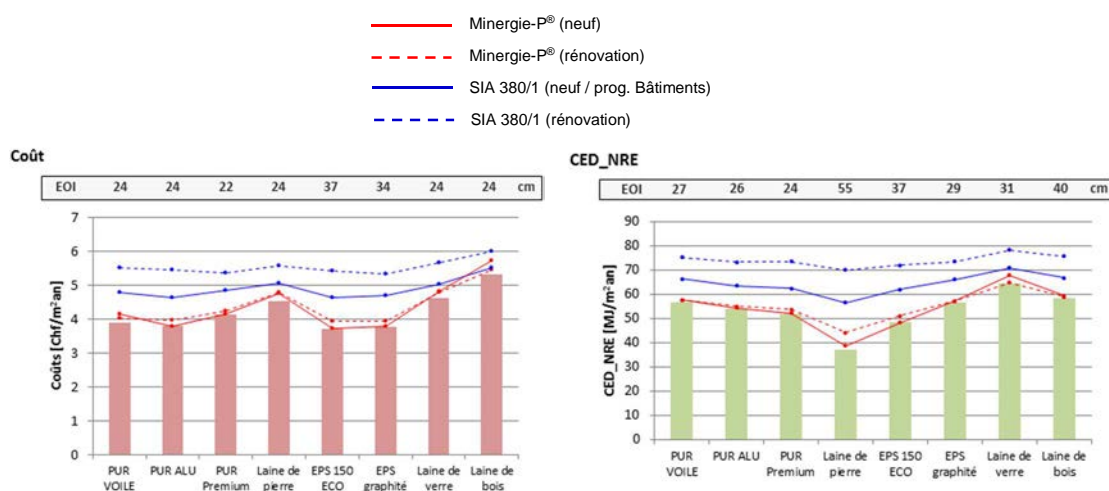


Figure 61: Coûts financiers et impacts environnementaux (CED_{NRE}) aux EOI pour les différentes exigences SIA avec coûts et impacts correspondant aux exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour chaque isolant de la toiture inclinée et un système de chauffage par PAC AE

Lorsque les subventions sont prises en compte (cf. ch. 9.1.4), l'écart s'accroît beaucoup plus entre les coûts selon la SIA 380/1 (rénovation), SIA 380/1 (neuf), Minergie-P® (rénovation) et les coûts aux EOI et selon Minergie-P® (neuf). A titre d'illustration, la figure 62 montre que les surcoûts financiers sont, désormais, de l'ordre de 300% pour le calcul selon SIA 380/1 (rénovation) par rapport à un calcul EOI. En effet, les méthodes de calculs EOI et Minergie-P® neuf, permettent d'atteindre de très bonnes valeurs U et donnent droit à la totalité des subventions dans le cas de travaux de rénovations.

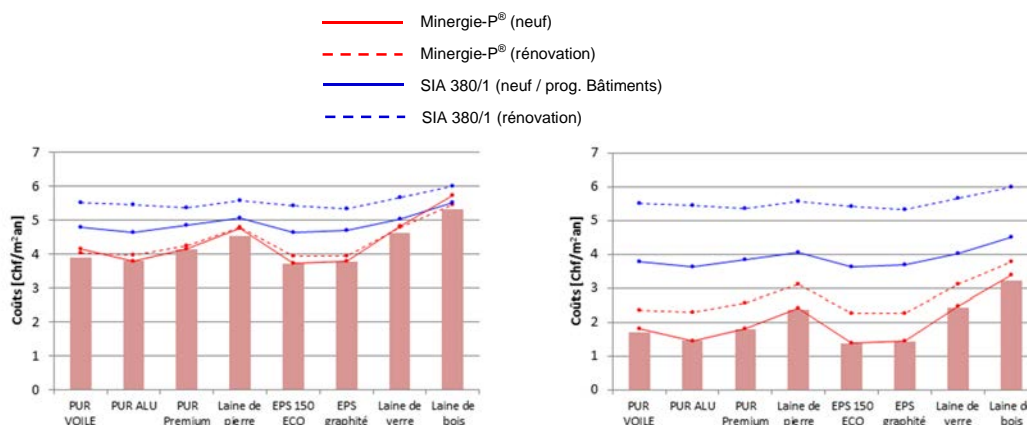


Figure 62: Coûts financiers aux EOI sans subvention (cas de base à gauche) et avec subventions (à droite) pour les différentes exigences SIA avec coûts correspondant aux exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour chaque isolant de la toiture inclinée et un système de chauffage par PAC AE

La mise en parallèle des résultats de la méthode EOI et des épaisseurs d'isolation permettant d'atteindre les labels permet également de montrer les différences entre l'optimisation du coût et de la performance thermique. Par exemple, dans certains cas, lorsque le coût de l'isolant et/ou de sa mise en œuvre se révèle trop élevé, la méthode EOI va minimiser l'épaisseur d'isolant quitte à diminuer la performance thermique. Il est alors intéressant de noter l'évolution du calcul selon Minergie-P® (traduisant un résultat thermiquement "bon" indépendamment du prix des matériaux) sur la figure 61. Tandis qu'un calcul selon Minergie-P® neuf permet de systématiquement se rapprocher de l'EOI pour la plupart des isolants, nous observons pour le couple *laine de bois*/PAC AE une tendance légèrement différente. Le calcul selon Minergie-P® devient moins économique qu'un calcul selon la norme SIA 380/1 ou selon la méthode EOI. Ce résultat s'explique notamment par le coût plus élevé de la laine de bois par rapport aux autres isolants.

De manière beaucoup plus nette, si les coûts d'un même isolant diffèrent selon la mise en œuvre (par exemple façade ou toiture), la méthode EOI cherchera à diminuer l'épaisseur pour l'élément qui a le coût le plus élevé. A titre d'illustration, la figure 63 présente les EOI et les coûts optimaux pour la laine de pierre et l'EPS mis en œuvre en façade et en toiture inclinée. Le graphique de droite montre les résultats de la figure 62 pour les deux isolants mis à l'échelle des résultats obtenus sur la façade compacte.

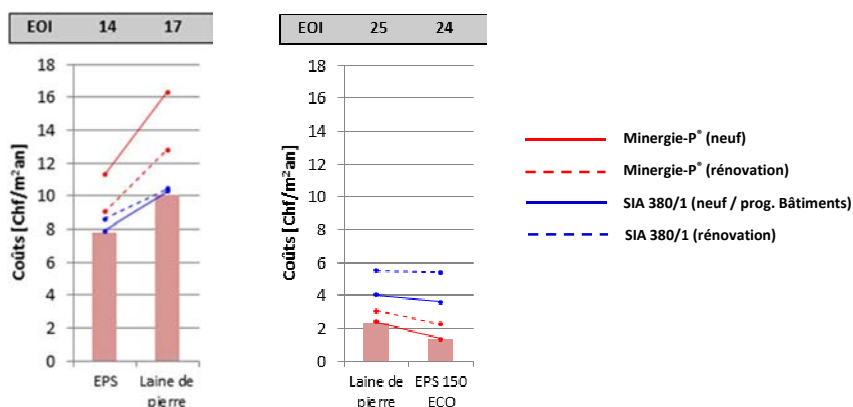


Figure 63: Coûts financiers aux EOI et pour les différentes exigences SIA avec coûts correspondant aux exigences des normes SIA 380/1 neuf et rénovation et du label Minergie-P® pour les isolants laine de pierre et EPS de la toiture inclinée (à gauche) et de la façade compacte (à droite) pour un système de chauffage par PAC AE (avec subventions)

Les EOI varient de 24 à 14 pour l'EPS et de 25 à 17 pour la laine de pierre entre la toiture inclinée et la façade compacte. Dans le même temps, les coûts optimaux pour la façade compacte augmentent d'un facteur 4 à 5 selon les isolants par rapport à la toiture inclinée. Ils sont finalement très proches des coûts selon les normes SIA (neuf ou rénovation) à la différence des résultats obtenus pour la toiture inclinée.

10 Conclusions et perspectives

10.1 Conclusions

Des épaisseurs optimales d'isolation pour différents systèmes de chauffage ont été déterminées en tenant compte des contraintes liées au domaine du bâtiment (mise en œuvre sur chantier pouvant nécessiter des doublages d'épaisseurs) mais également en évaluant l'influence de paramètres propres à la rénovation (subventions, coûts unitaires des systèmes de chauffage dépendant du bâtiment existant).

Afin de s'affranchir de logiciels de simulation thermique, une méthode simplifiée de calcul des EOI a été mise au point pour déterminer des EOI par mètre carré d'élément d'enveloppe opaque. Une validation de cet outil a été réalisée à l'aide du logiciel *Lesosai* permettant de montrer qu'un calcul élément par élément était aussi précis qu'un calcul global bâtiment pour un climat suisse. Les résultats d'un cas d'application sur quatre éléments de façades et de toitures ont montré que les EOI financières sont généralement plus faibles que les EOI environnementales.

Des couples *isolant/système de chauffage* aux EOI correspondants ont pu être déterminés par éléments de construction. Les résultats ont montré que ces couples diffèrent selon l'indicateur évalué. Les systèmes de chauffage utilisant l'électricité (PAC AE et électricité directe) semblent être les systèmes les plus économiques financièrement tandis que le chauffage à pellets est le système le moins consommateur d'énergie non renouvelable. La PAC AE et le chauffage à pellets sont les moins émetteurs de gaz à effet de serre alors que la PAC AE se détache selon l'indicateur de l'énergie primaire totale (CED_{TOT}). Ces systèmes sont associés à différents isolants.

Des analyses de sensibilité ont ensuite permis de montrer l'influence de nombreux paramètres sur les valeurs des EOI comme le climat, les subventions ou l'évolution des coûts de l'énergie sur le plan financier. Ainsi, l'intégration des subventions a permis de tenir compte du contexte spécifique des rénovations de bâtiments. Ces subventions réduisent le coût total et annule parfois le coût de l'isolant. Elle contribue à rapprocher les EOI financière des EOI environnementales dans certains cas.

Finalement, une comparaison des résultats de cette étude avec des calculs d'épaisseurs d'isolants selon les normes et les labels actuels a montré la pertinence de l'approche par EOI pour déterminer des solutions à moindre coût et à moindre impact. Dans certains cas (p.ex. pour la toiture inclinée), les normes conduisent à des surcoûts sur 30 [ans] tandis que le label Minergie-P® semble bien placé par rapport aux solutions optimales fournies par la méthode de calcul des EOI. Pour d'autres (p.ex. façade compacte), les coûts élevés de pose ont tendance à rapprocher les coûts aux EOI avec ceux des normes ; les coûts selon Minergie-P® étant les plus élevés.

10.2 Perspectives

Ce travail est le reflet des hypothèses utilisées en partenariat avec un fabricant de matériaux et à partir d'un cas d'étude de rénovation pour les coûts de l'énergie (WP3 ECO-Réno). Il est donc difficile de généraliser les résultats de cette étude. Il s'avère que beaucoup de paramètres entrent en compte dans la détermination de ces EOI. Or, une approche générique ne semble pas pertinente pour fournir des résultats adaptés au contexte local (au niveau des coûts de l'énergie, des matériaux et du climat par exemple). Ce dernier point rappelle le besoin de mise à jour des paramètres de calcul tant financiers qu'environnementaux et la nécessaire adaptation au contexte local (p. ex. climat, prix des matériaux et de la main-d'œuvre). Par conséquent, si ce type de calcul doit s'insérer dans les pratiques opérationnelles (p. ex. bureaux d'ingénieurs), il pourrait être utile de réfléchir au développement d'un outil permettant de paramétrer les calculs en fonction du contexte local et de l'évolution des coûts et des impacts environnementaux. Ce type d'outil pourrait également s'insérer dans les logiciels de simulation thermique existants afin d'éviter de créer un nouvel outil, avec l'avantage de considérer le bâtiment dans son ensemble, ceci d'un point de vue thermique. Ainsi, l'approximation faite par rapport à la considération des apports solaires (coefficient κ) serait supprimée. Dans les deux cas, un enrichissement et une mise à jour régulière des bases de données de coûts et d'impacts sur les matériaux et les systèmes de chauffage constituera un point clé afin de fournir des résultats les plus fiables et les plus représentatifs du contexte local.

11 Remerciements

Nous tenons à remercier particulièrement :

- L'Office Fédéral de l'Energie pour le financement de ce projet.
- Les professionnels du domaine des isolants pour leurs nombreux conseils lors de l'estimation des coûts des isolants.

12 Références

- [1] "<http://www.dasgebaeudeprogramm.ch/index.php/fr/le-programme-batiments/objectifs-du-programme-batiments>," 2015. .
- [2] "European Commission, 2010, Communication on Europe 2020: A strategy for competitive sustainable and secure energy."
- [3] "European Union, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). Official Journal of the European Union. 2010."
- [4] O. Kaynakli, "A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 415–425, Jan. 2012.
- [5] A. Bolattürk, "Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 6, pp. 1055–1064, Jun. 2008.
- [6] N. Sisman, E. Kahya, N. Aras, and H. Aras, "Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regions," *Energy Policy*, vol. 35, no. 10, pp. 5151–5155, Oct. 2007.
- [7] J. Yu, C. Yang, L. Tian, and D. Liao, "A study on optimum insulation thicknesses of external walls in hot summer and cold winter zone of China," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2520–2529, Nov. 2009.
- [8] C. K. Cheung, R. J. Fuller, and M. B. Luther, "Energy-efficient envelope design for high-rise apartments," *Energy Build.*, vol. 37, no. 1, pp. 37–48, Jan. 2005.
- [9] T. Boermans and C. Petersdorff, "U-values for better energy performance of buildings," *ECOFYS GmbH*, 2008.
- [10] M. J. Al-Khawaja, "Determination and selecting the optimum thickness of insulation for buildings in hot countries by accounting for solar radiation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 24, no. 17–18, pp. 2601–2610, Dec. 2004.
- [11] P. a. Fokaides and A. M. Papadopoulos, "Cost-optimal insulation thickness in dry and mesothermal climates: Existing models and their improvement," *Energy Build.*, vol. 68, pp. 203–212, Jan. 2014.
- [12] A. Yildiz, M. Erkek, Z. Faculty, M. Engineering, and K. Tarihi, "ECONOMICAL AND ENVIRONMENTAL ANALYSES OF THERMAL INSULATION," pp. 25–34, 2008.
- [13] N. Daouas, "A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 156–164, Jan. 2011.

- [14] I. Ballarini and V. Corrado, "Analysis of the building energy balance to investigate the effect of thermal insulation in summer conditions," *Energy Build.*, vol. 52, pp. 168–180, Sep. 2012.
- [15] Y. Goto, Y. Ostermeyer, K. Ghazi Wakili, and H. Wallbaum, "Economic, ecological and thermo-hygric optimization of a vapor-open envelope for subtropical climates," *Energy Build.*, vol. 55, pp. 799–809, Dec. 2012.
- [16] T. M. I. Mahlia and a. Iqbal, "Cost benefits analysis and emission reductions of optimum thickness and air gaps for selected insulation materials for building walls in Maldives," *Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 2242–2250, May 2010.
- [17] O. Kaynakli, "Parametric Investigation of Optimum Thermal Insulation Thickness for External Walls," *Energies*, vol. 4, no. 12, pp. 913–927, Jun. 2011.
- [18] W. Feist, "Life-cycle energy balances compared: low-energy house, passive house, self-sufficient house," in *Int. Symp. CIB*, 1997, p. 13.
- [19] C. Rudbeck, "Thermal insulation materials for sustainable built environment," in *IAQVEC 2007*, 2007.
- [20] Y. Ostermeyer, A. De Schryver, and H. Wallbaum, "Optimal insulation thicknesses according to different indicators for Germany."
- [21] W. Feist, "Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen. Protokollband Nr. 29, Passivhaus Institut, Darmstadt." 2005.
- [22] "Données des écobilans dans la construction, KBOB," 2012.
- [23] "SIA 180 - Isolation thermique et protection contre l'humidité dans les bâtiments," 1999.
- [24] "ISO 14683 - Ponts thermiques dans les bâtiments -- Coefficient linéique de transmission thermique -- Méthodes simplifiées et valeurs par défaut." 2012.
- [25] "ISO 10211-1 - Ponts thermiques dans le bâtiment - Flux de chaleur et température superficielles - Partie 1 - Méthode générales de calcul," vol. 1995. 1995.
- [26] "ISO 10211-2 - Ponts thermiques dans les bâtiments - Calcul des flux thermiques et des températures superficielles - Partie 2 - Ponts thermiques linéaires." 1999.
- [27] N. Dos Santos, "Rénovation énergétique d'une villa chauffée à l'électricité," 2013.
- [28] "LESOSAI 7, certifications et bilans écologiques et énergétiques de bâtiments." .
- [29] "SIA 380/1 - L'énergie thermique dans le bâtiment," 2009.
- [30] "Calcul du bilan thermique mensuel d'un bâtiment: LESOSAI; <http://moodlearchive.epfl.ch/>," *Enerbat 09*, 2009. [Online]. Available: <http://moodlearchive.epfl.ch/>.
- [31] S. Citherlet, J. Bony, and O. Georges, "Projet Reno-HP, Installation technique décentralisée pour la rénovation à haute performance de bâtiments." 2011.
- [32] P. Dind, *Physique et énergétique du bâtiment*. 1993.
- [33] "SIA 381/3 - Les degrés-jours en Suisse," 1982.
- [34] M. Wyss, "Optimum énergétique, financier et environnemental des isolants," HEIG-VD, 2014.
- [35] "Informations fournies par des professionnels du domaine des isolants." .

- [36] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - PARTIE F - WP3.3b : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique - Étude de cas : Habitat collectif," 2015.
- [37] "SIA 2040 - La voie SIA vers l'efficacité énergétique." 2011.
- [38] "SIA 2032 - L'énergie grise des bâtiments." 2010.
- [39] ISOVER, "Séminaire : Ponts thermiques," 2013.
- [40] "U-SAI 3.0, version en libre accès sur internet." .
- [41] M. Kurt, *Catalogue d'éléments de construction avec calcul de la valeur U - Construction neuve*. 2002.
- [42] "Rogger Fasteners SA - www.rogger-fasteners.ch." .
- [43] S. Citherlet and A. Kleijer, "Rapport d'étude, HEIG-VD - Analyse du cycle de vie de plaques d'isolation d'EPS 150 ECO et d'EPS recyclé," 2010.
- [44] "SIA 2028 - Données climatiques pour la physique du bâtiment, l'énergie et les installations du bâtiment." 2010.
- [45] E. Hoxha, G. Habert, J. Chevalier, M. Bazzana, and R. Le Roy, "Method to analyse the contribution of material's sensitivity in buildings' environmental impact," *J. Clean. Prod.*, vol. 66, pp. 54–64, Mar. 2014.

13 Annexes

Annexe 1: Analyse du facteur pour le bâtiment de Morges [31]

| Capacité thermique du bâtiment [kJ/m²K] | Surface de fenêtre [%] | Epaisseur isolation façade [cm] | Q _h [MJ/m²] | Q _T [MJ/m²] | Q _V [MJ/m²] | Q _i [MJ/m²] | Q _s [MJ/m²] | η _g [-] | γ [-] |
|-----------------------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------|
| 1'000 | 14.8 | 2 | 173.2 | 238.5 | 81.6 | 97.6 | 87.8 | 0.79 | 0.5792 |
| | | 50 | 46 | 83.8 | 81.6 | 97.6 | 87.8 | 0.64 | 1.1209 |
| 100 | | 2 | 183.7 | 238.5 | 81.6 | 97.6 | 87.8 | 0.74 | 0.5792 |
| | | 50 | 52.3 | 83.8 | 81.6 | 97.6 | 87.8 | 0.61 | 1.1209 |

Tableau 27: Analyse du taux d'utilisation des apports de chaleur dans le cas d'un bâtiment défini [31]

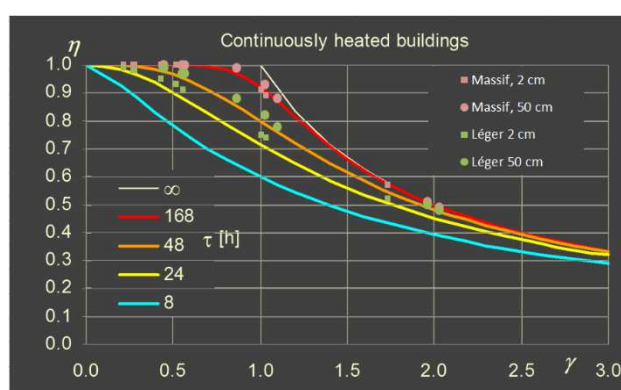


Figure 64: Evolution du facteur d'utilisation en fonction du rapport entre les apports de chaleur et les pertes pour le bâtiment analysé [31]

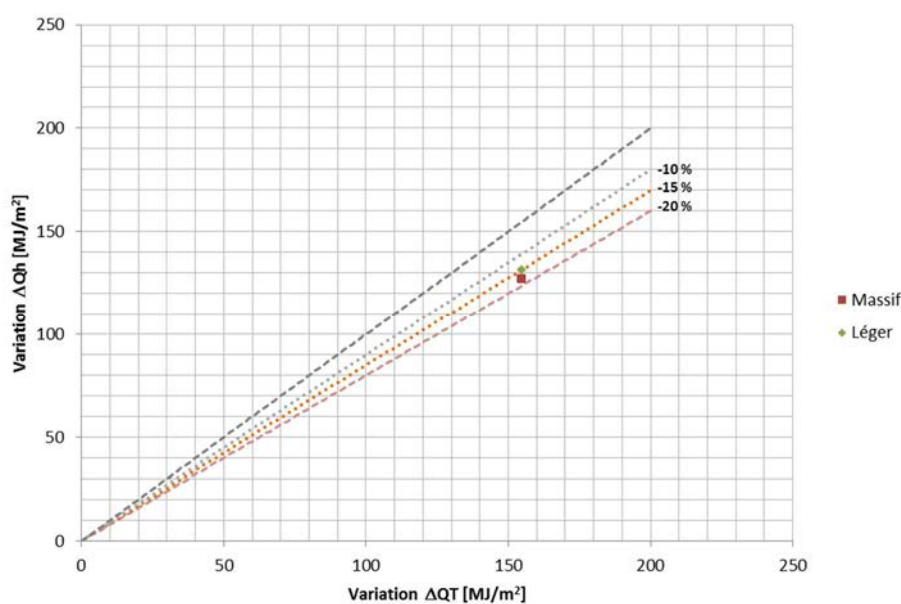
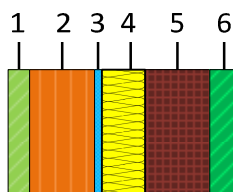


Figure 65: Variation d'énergie liée aux déperditions (Q_T) du bâtiment par rapport aux variations d'énergie de chauffage (Q_h) pour le bâtiment analysé [31] et entre une épaisseur d'isolation de 2 et 50 [cm]

Annexe 2: Élément considéré pour l'analyse SIA 380/1

L'élément considéré est un mur extérieur de construction homogène et tiré du bâtiment décrit dans [27] (mur existant avant rénovation). La composition de cet élément est montrée dans le TABLEAU 6: Description de la FAÇADE compacte



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | λ [W/(m·K)] | R [(m²·K)/W] |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|----------------|---------------------|------------------|
| | | | | $R_{si} = 0.130$ |
| 1 | Intérieur : Crépi synthétique | 1.00 | 0.990 | 0.010 |
| 2 | Brique terre cuite | 13.00 | 0.520 | 0.250 |
| 3 | Pare-vapeur | 0.02 | 0.200 | 0.001 |
| 4 | Isolation thermique : Panneau isolant minéral | 8.00 | 0.045 | 1.778 |
| 5 | Brique rapide ciment | 14.00 | 0.700 | 0.200 |
| 6 | Extérieur : Enduit ciment et sable | 2.00 | 1.000 | 0.020 |
| Epaisseur totale [cm] | | 38.02 | | $R_{se} = 0.040$ |
| Valeur U totale [W/(m²·K)] | | | | 0.412 |

Tableau 28: Description de l'élément considéré dans l'analyse (sans isolation extérieure)

A cet élément sera ajouté une isolation extérieure en EPS (panneaux en mousse rigide de polystyrène expansé) de marque *swisspor* et de type Lambda façade 0.031, isolation recouverte d'un crépis extérieur de 2 [cm]. Cette couche d'isolation est d'épaisseur variable.

Annexe 3: Fiches de synthèse par élément de construction et par système de chauffage (sans subventions)

Les fiches de synthèse sont présentées par élément de construction (façade compacte, façade ventilée, toiture plate et toiture inclinée) pour les cinq systèmes de chauffage étudiés : électricité, gaz, mazout, PAC AE, pellets. Elles présentent, à chaque fois, les résultats par système de chauffage pour tous les isolants.

Liste des fiches de synthèse par élément de construction avec entre parenthèse le système de chauffage :

- Façade compacte (électricité)
- Façade compacte (gaz naturel)
- Façade compacte (mazout)
- Façade compacte (PAC AE)
- Façade compacte (pellets)

- Façade ventilée (électricité)
- Façade ventilée (gaz naturel)
- Façade ventilée (mazout)
- Façade ventilée (PAC AE)
- Façade ventilée (pellets)

- Toiture plate (électricité)
- Toiture plate (gaz naturel)
- Toiture plate (mazout)
- Toiture plate (PAC AE)
- Toiture plate (pellets)

- Toiture inclinée (électricité)
- Toiture inclinée (gaz naturel)
- Toiture inclinée (mazout)
- Toiture inclinée (PAC AE)
- Toiture inclinée (pellets)

Fiche de résumé par élément

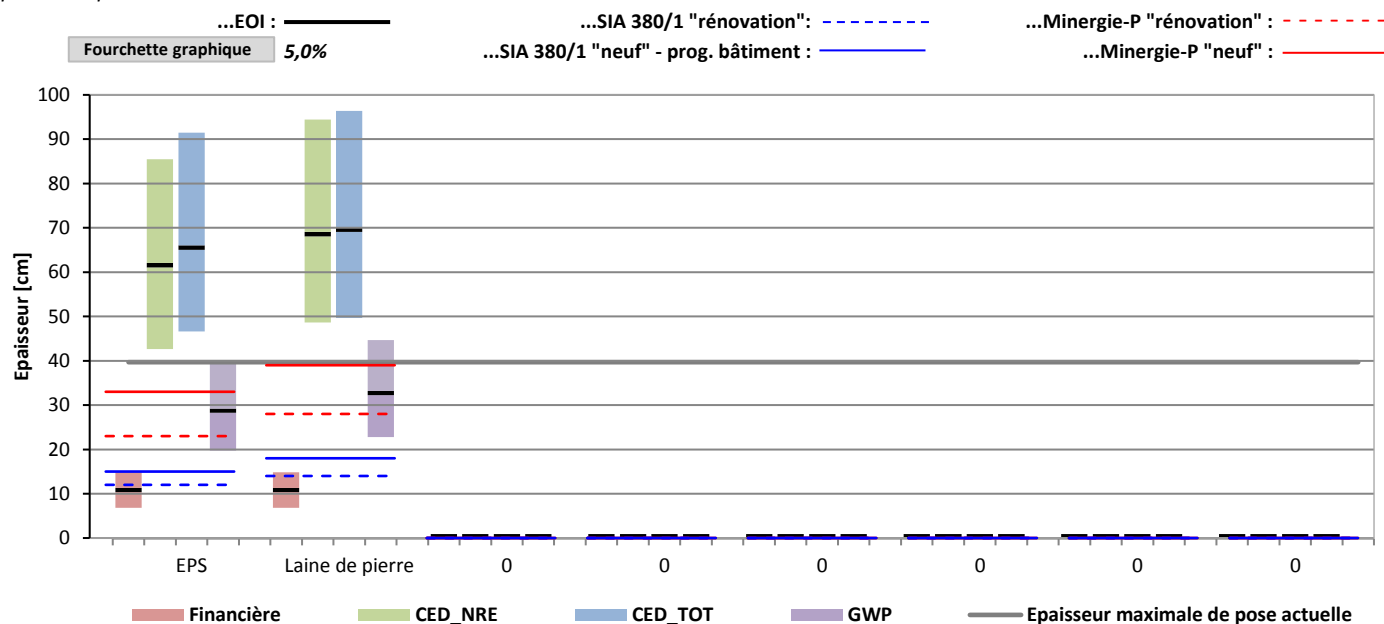
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

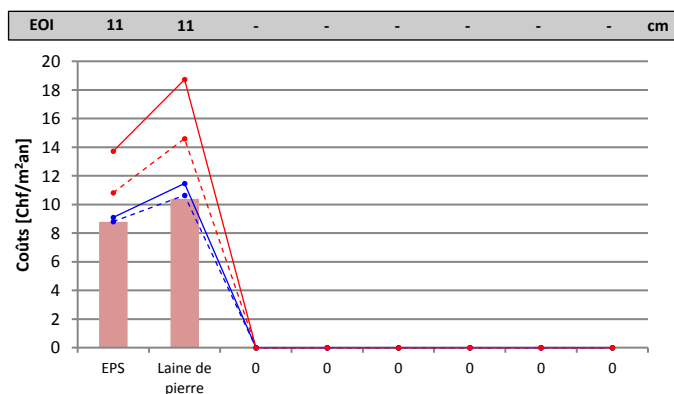
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

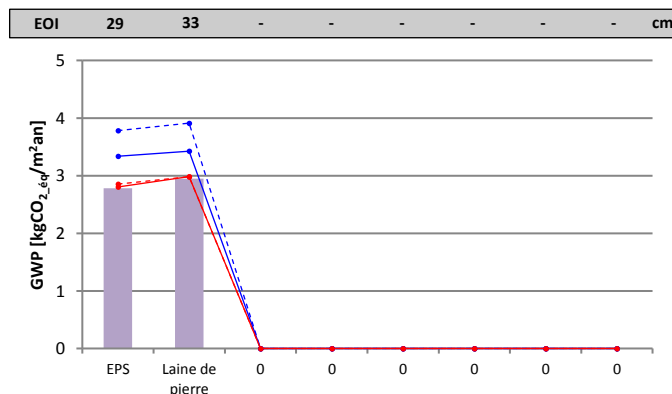
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "neuf" : ———

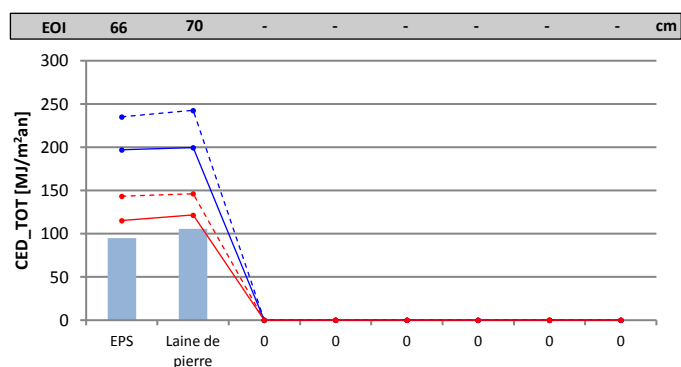
Coût



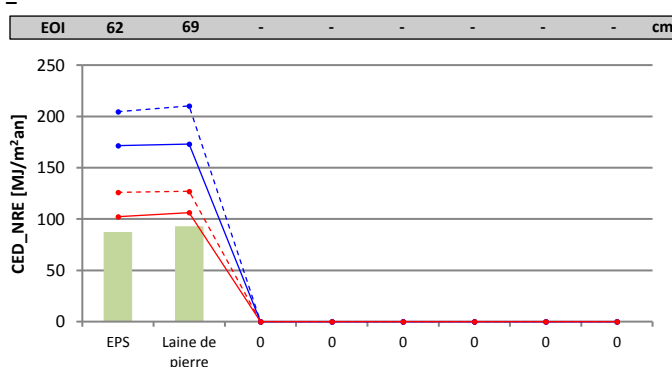
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

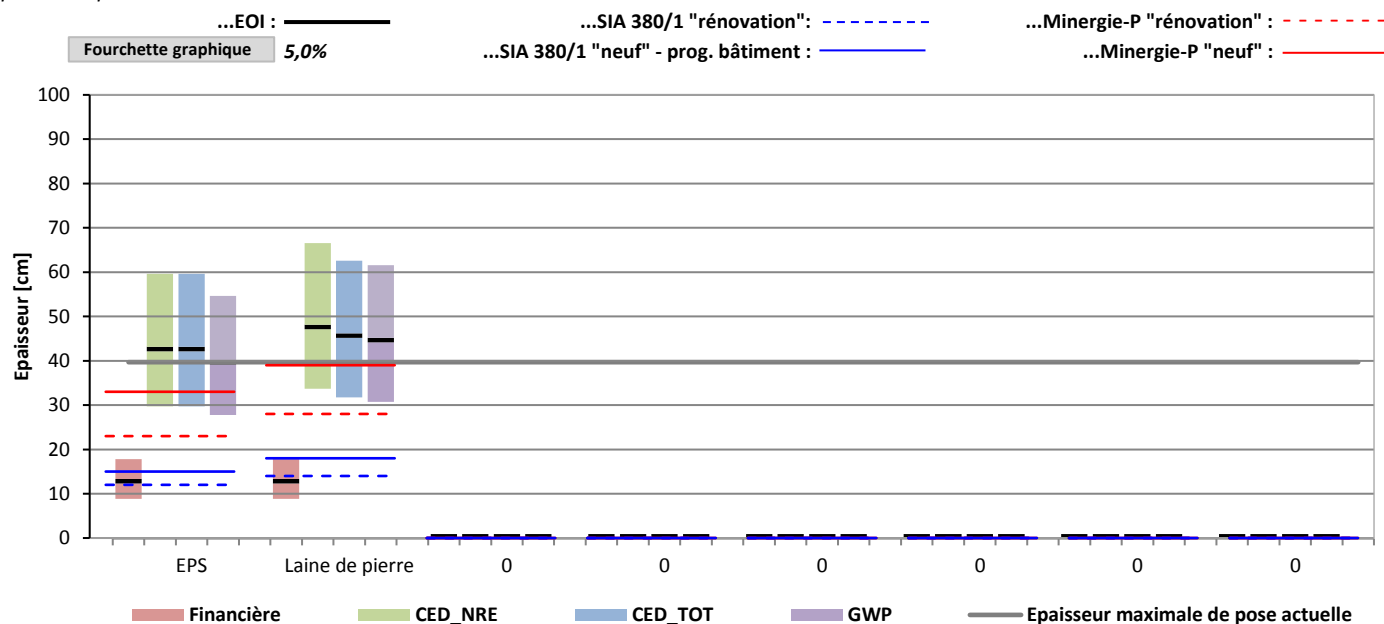
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

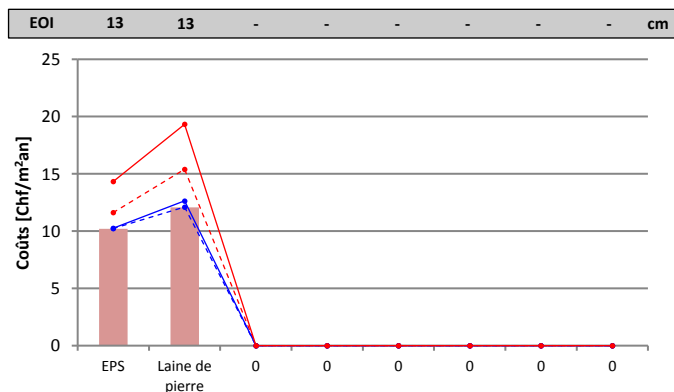
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

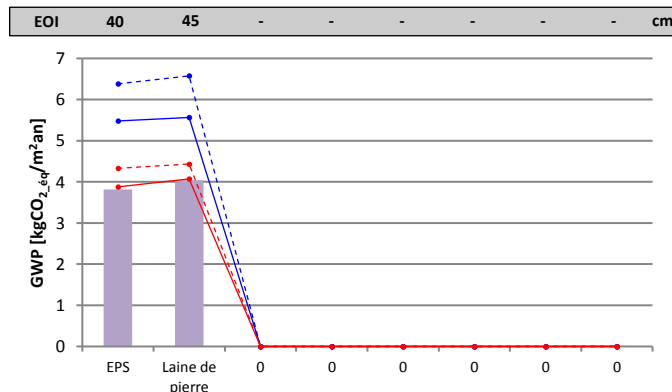
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "neuf" : ———

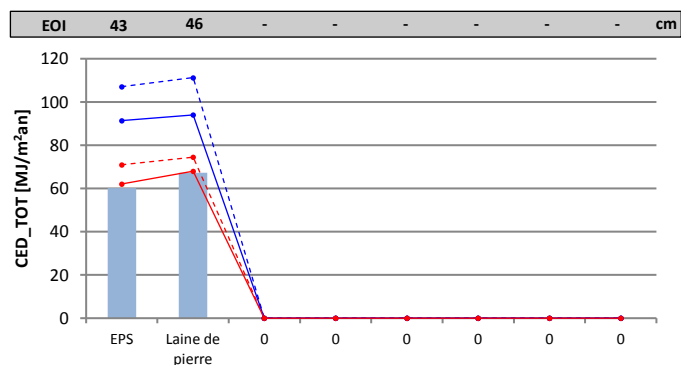
Coût



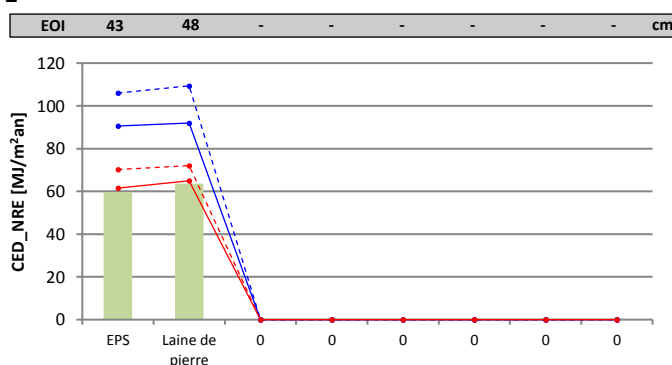
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

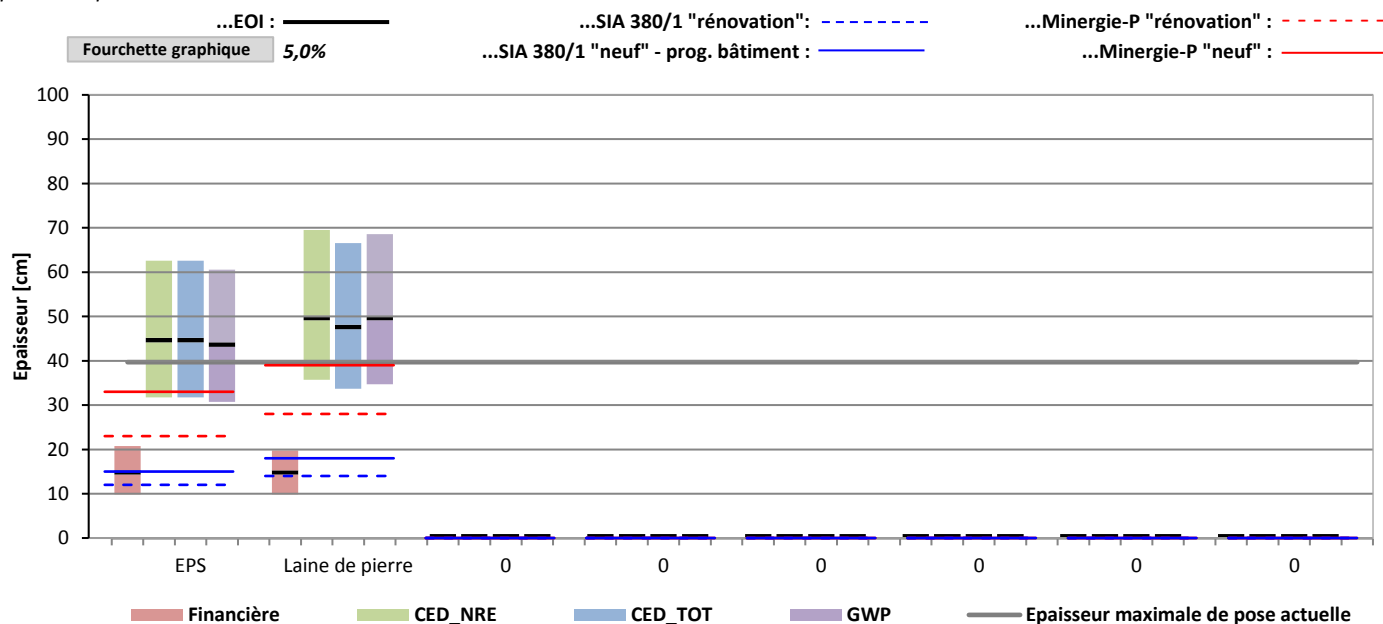
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : Mazout |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

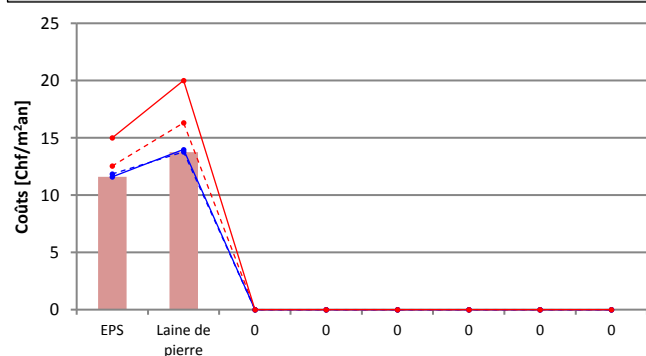
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "neuf" : ———

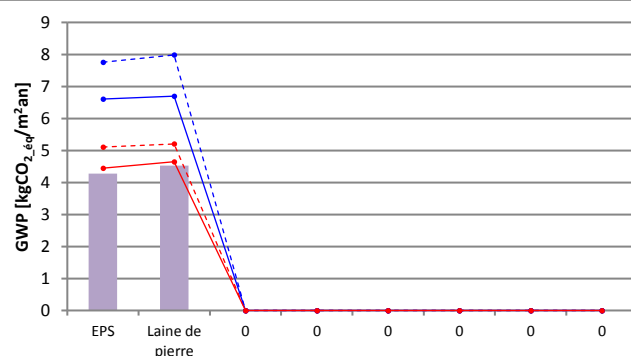
Coût

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 15 | 15 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



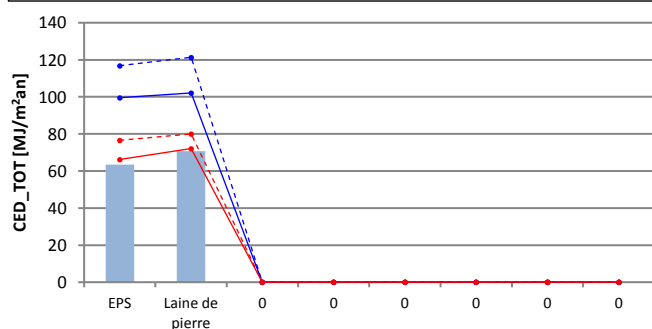
GWP

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 44 | 50 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



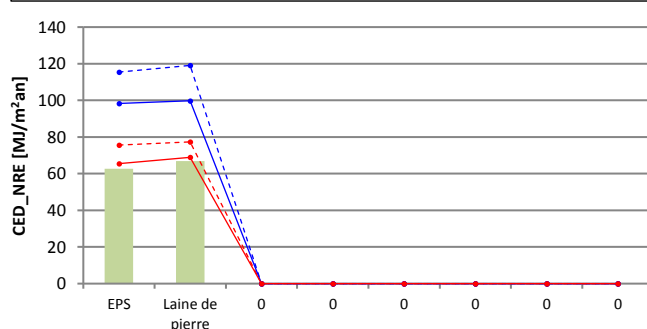
CED_TOT

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 45 | 48 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



CED_NRE

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 45 | 50 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



Fiche de résumé par élément

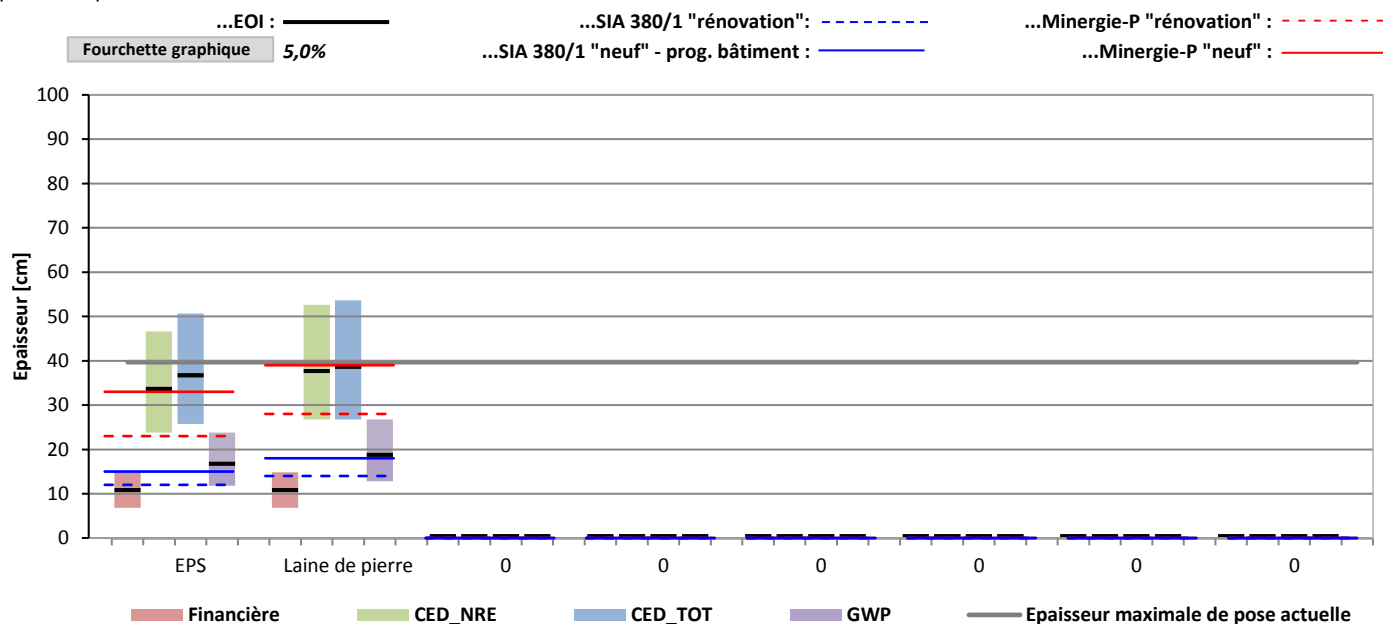
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

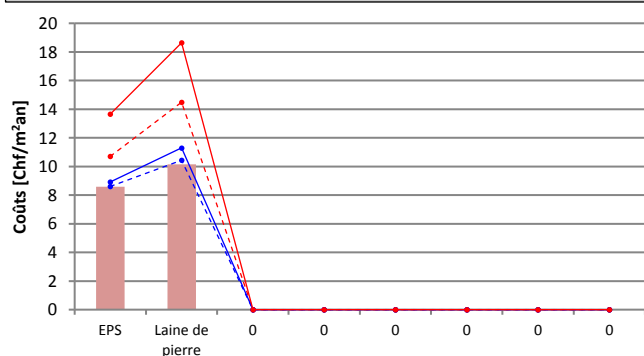
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

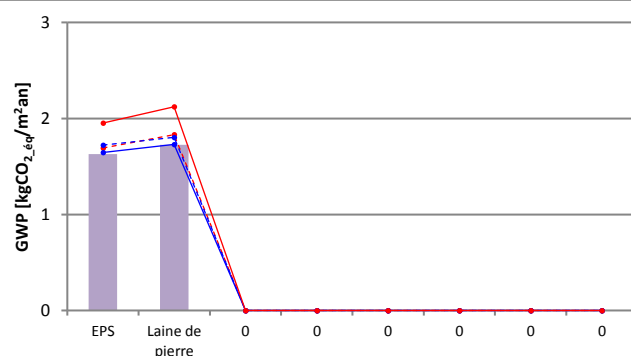
Coût

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 11 | 11 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



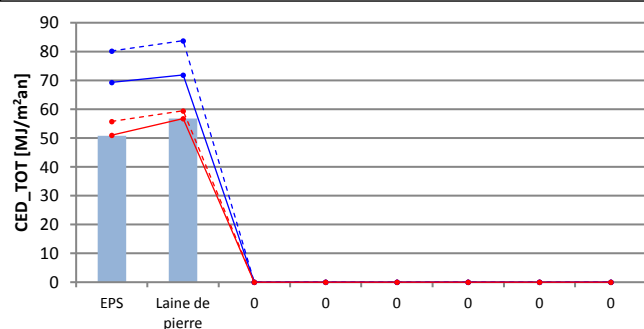
GWP

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 17 | 19 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



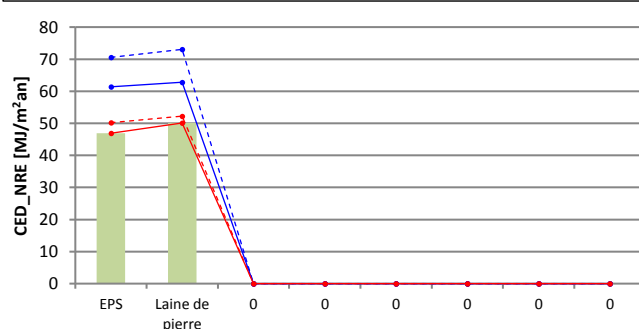
CED_TOT

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 37 | 39 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



CED_NRE

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 34 | 38 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



Fiche de résumé par élément

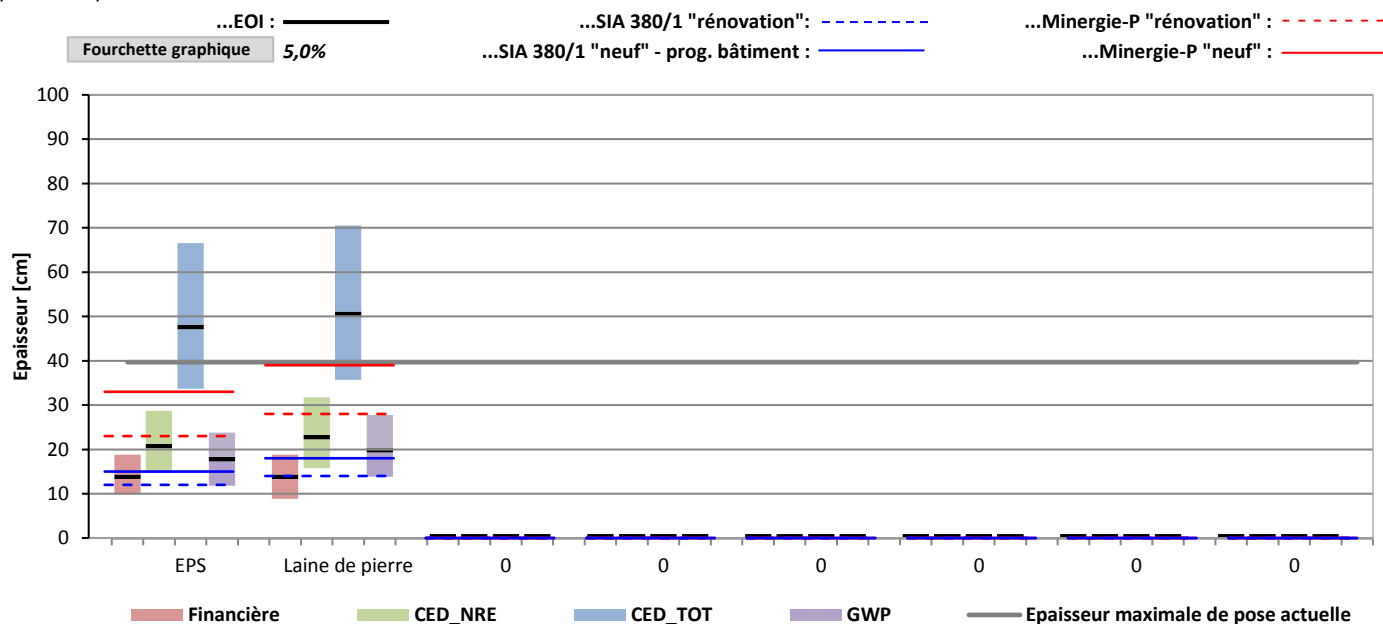
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

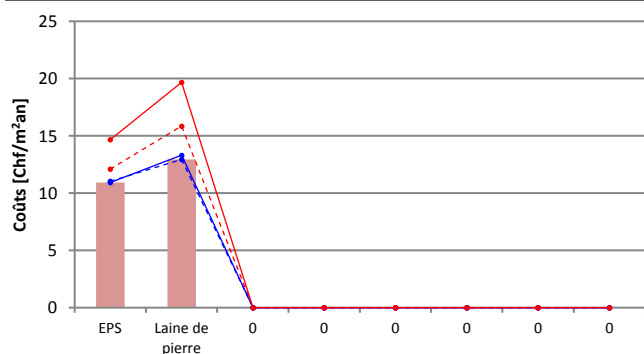
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

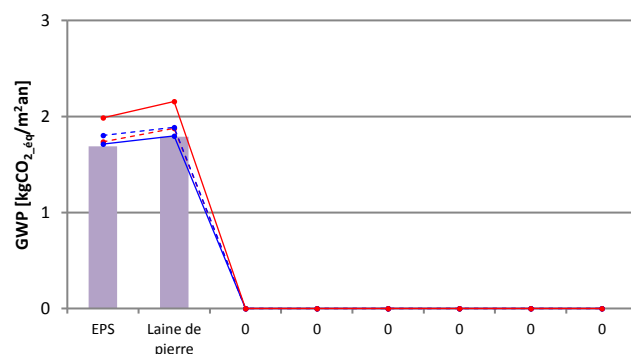
Coût

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 14 | 14 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



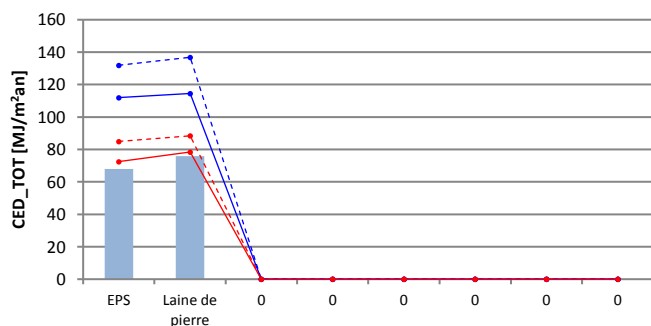
GWP

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 18 | 20 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



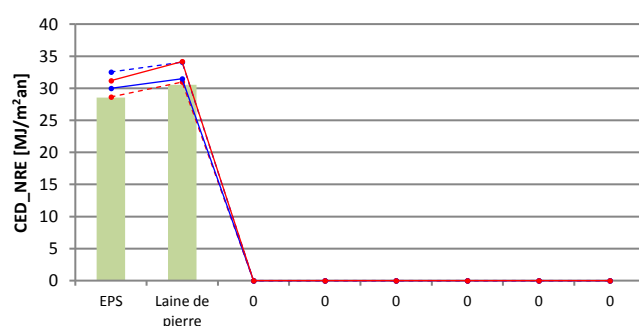
CED_TOT

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 48 | 51 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



CED_NRE

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 21 | 23 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



Fiche de résumé par élément

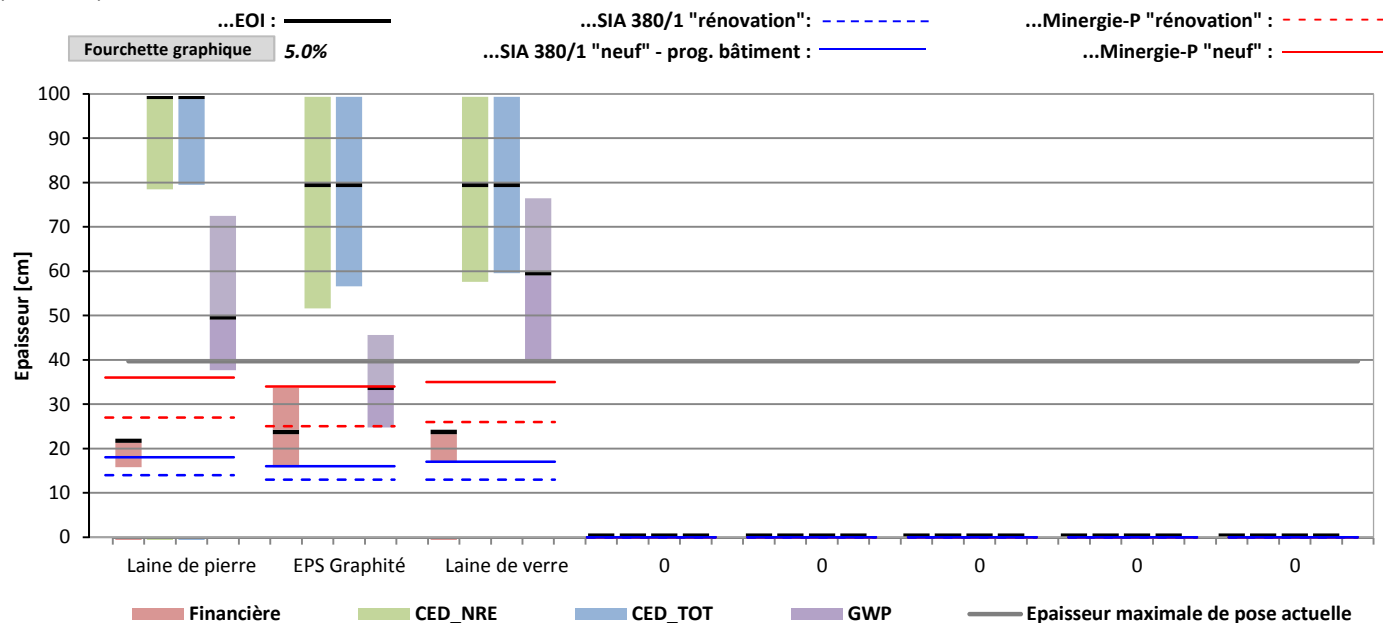
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

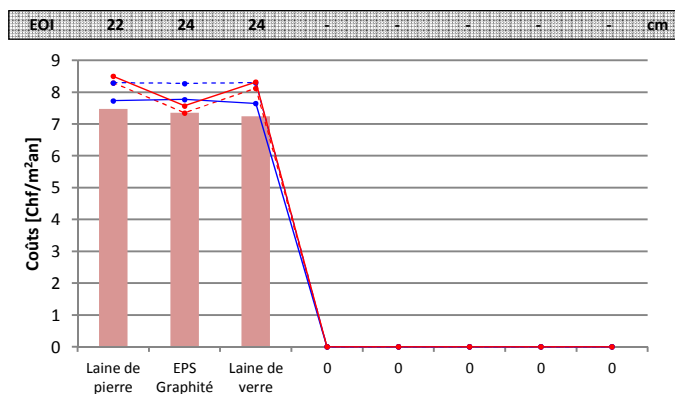
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

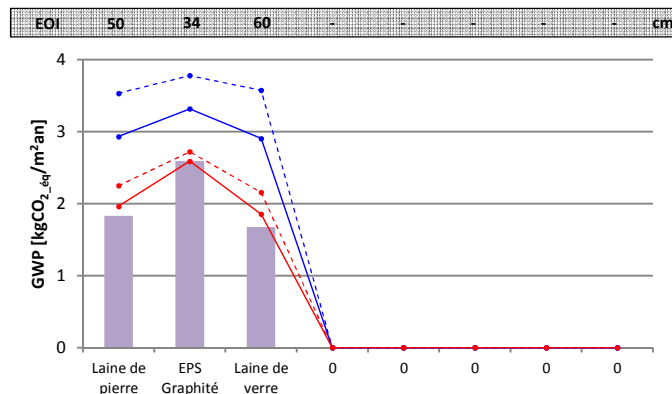
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "neuf" : ———

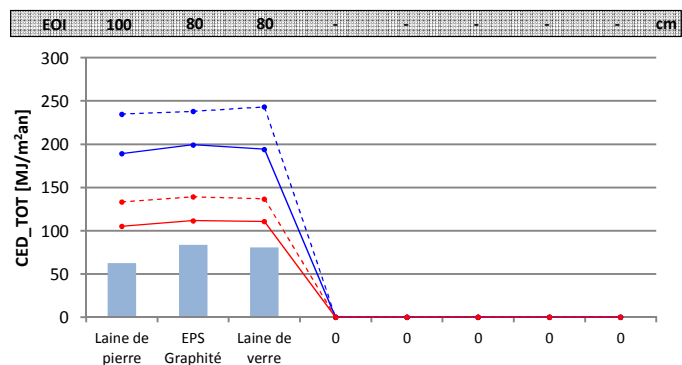
Coût



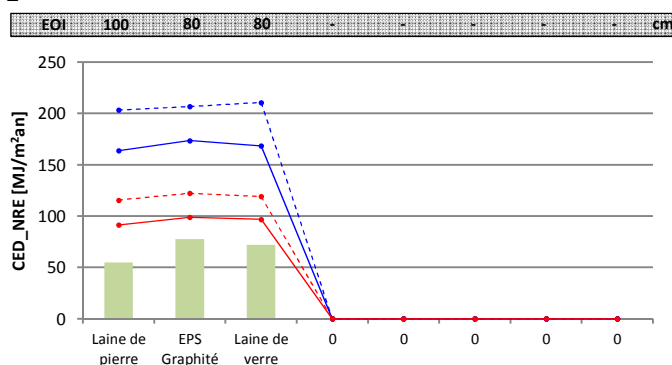
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

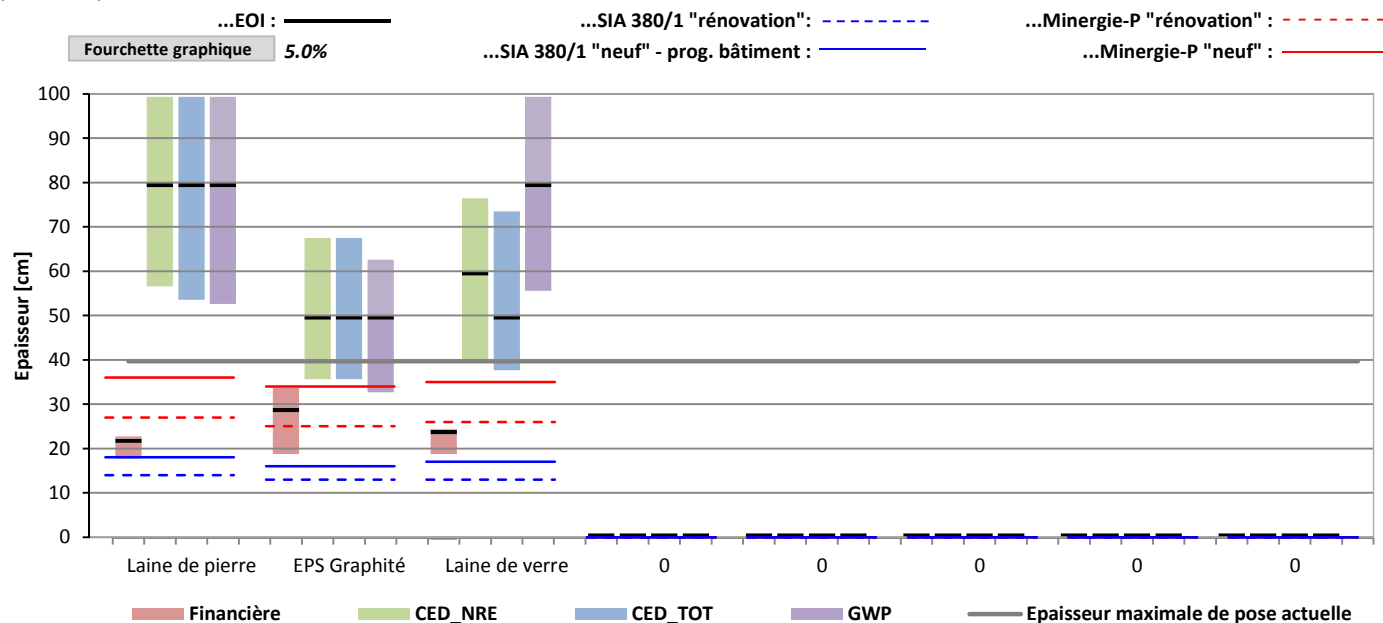
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

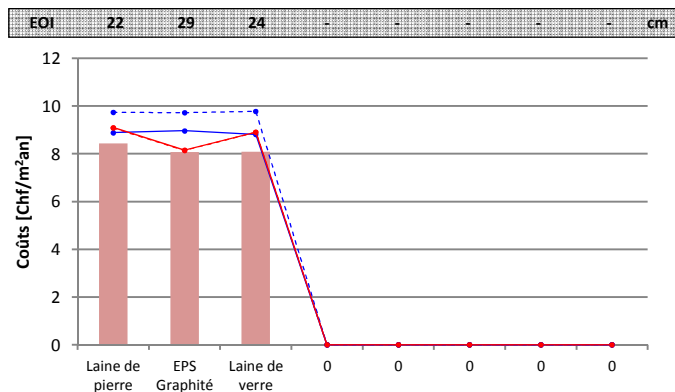
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

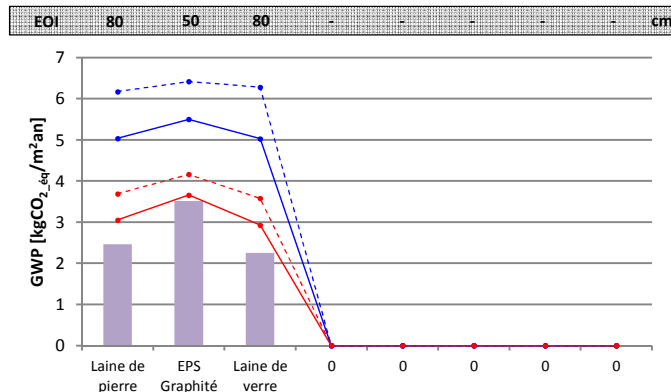
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

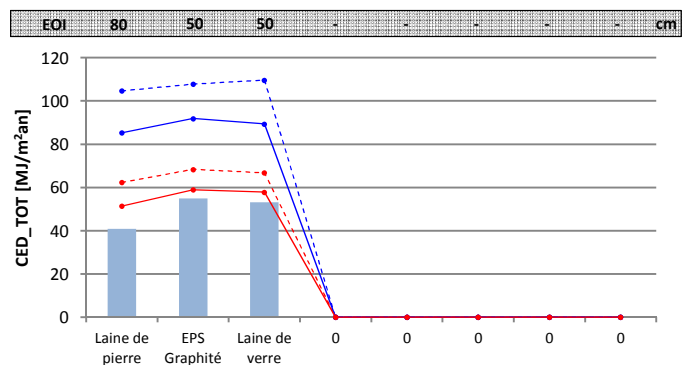
Coût



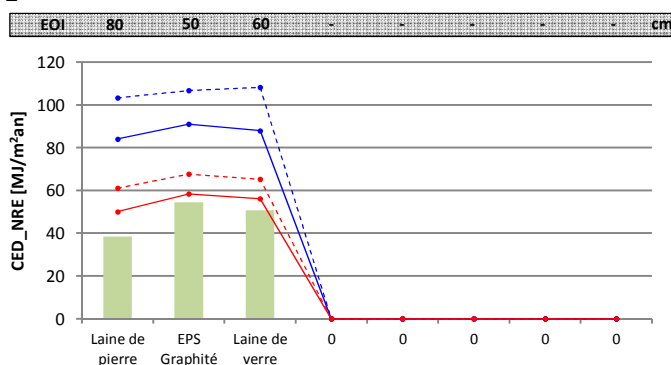
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

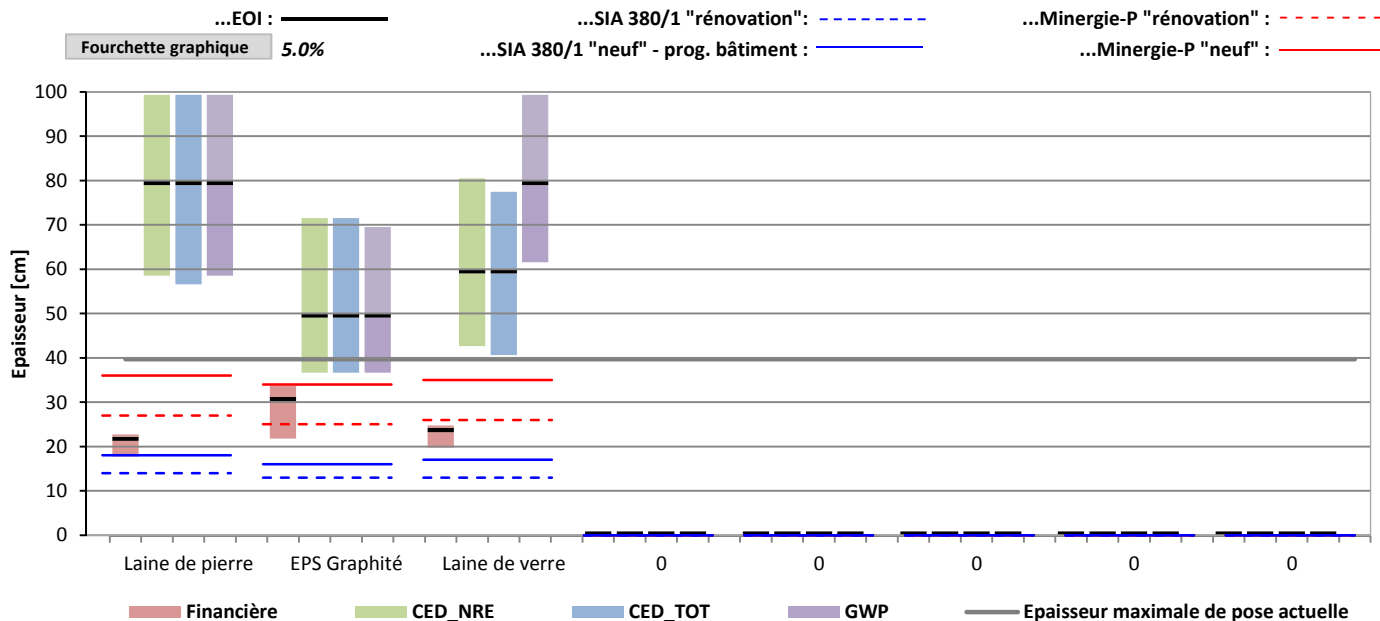
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Mazout</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

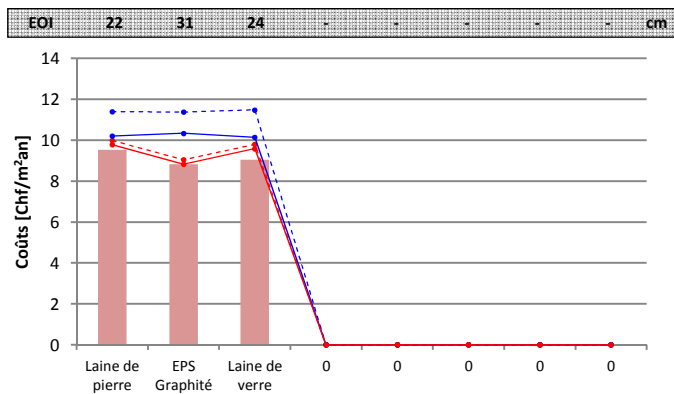
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

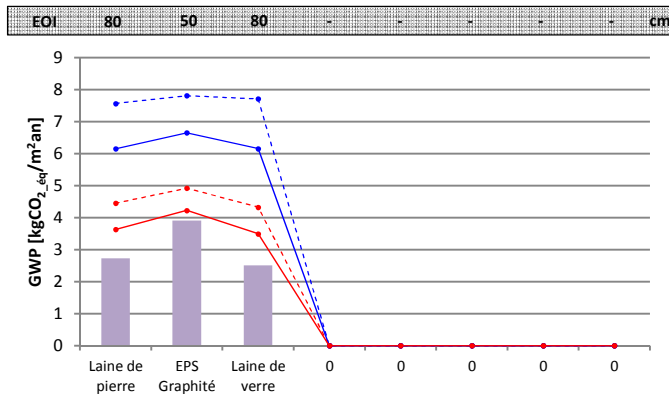
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "neuf" : ———

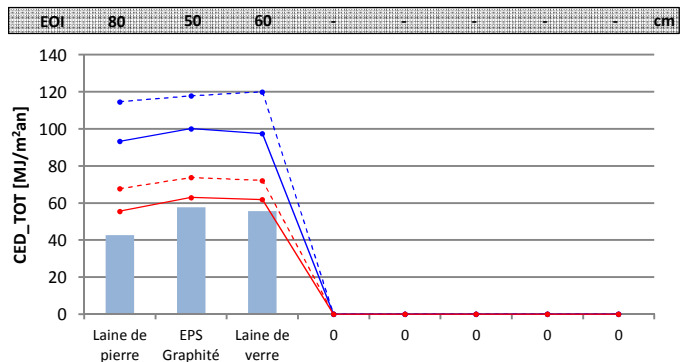
Coût



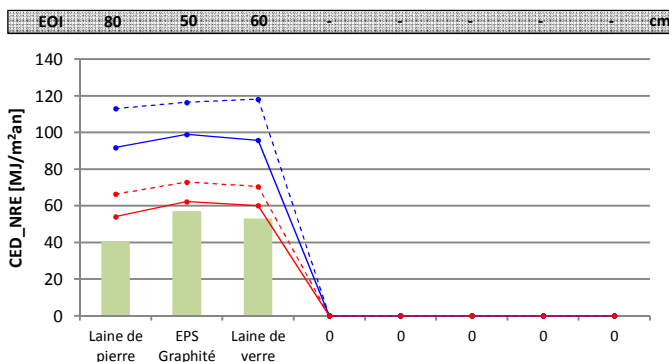
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

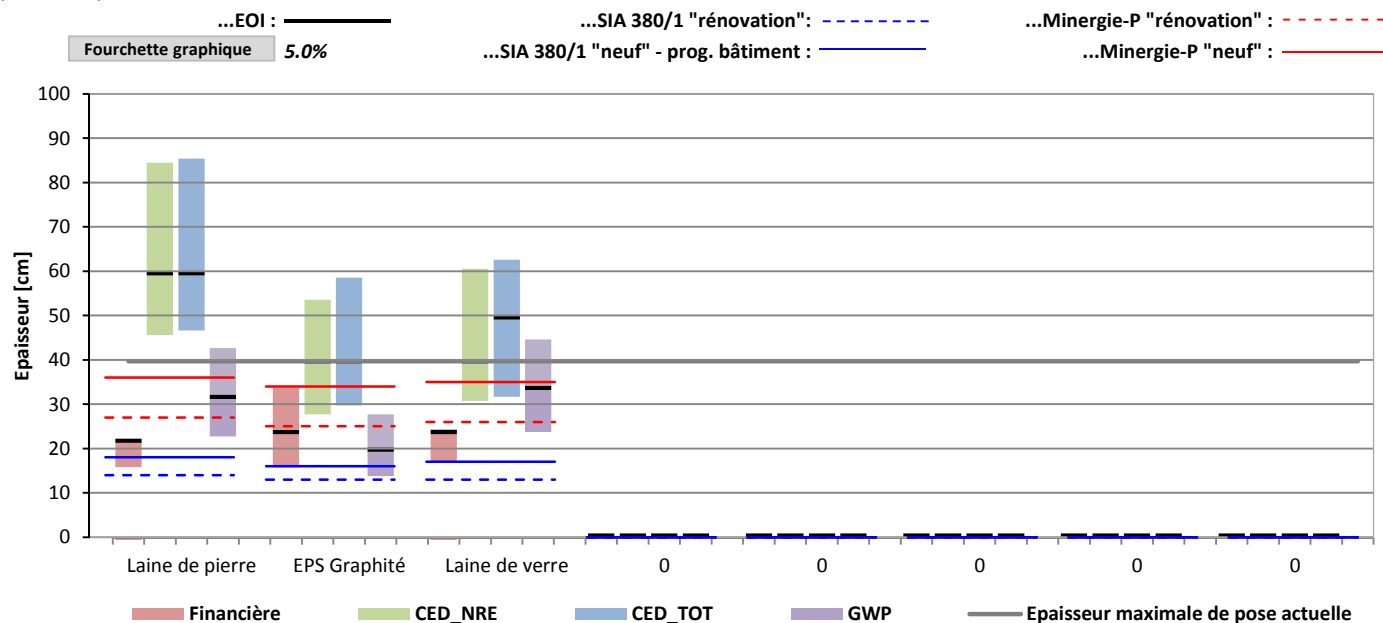
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

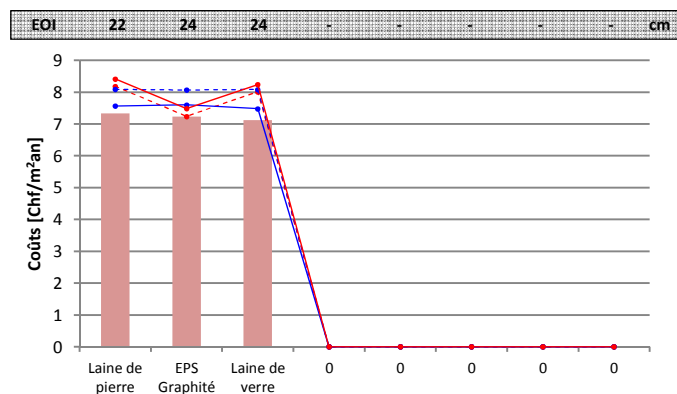
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

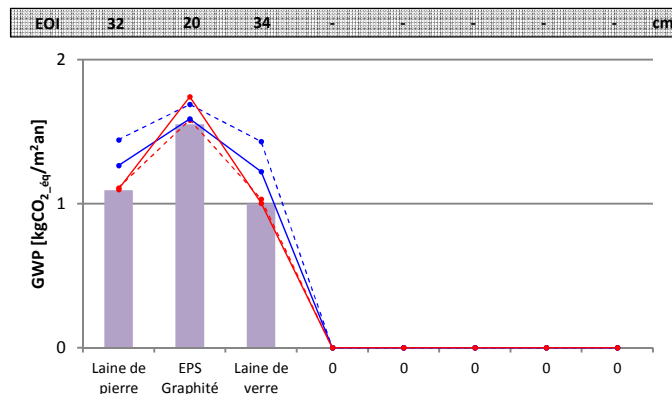
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

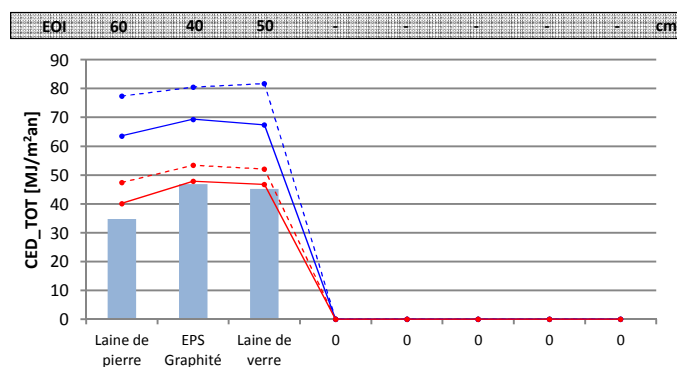
Coût



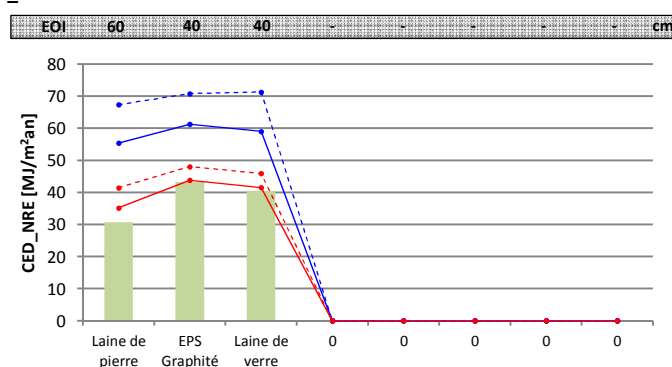
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

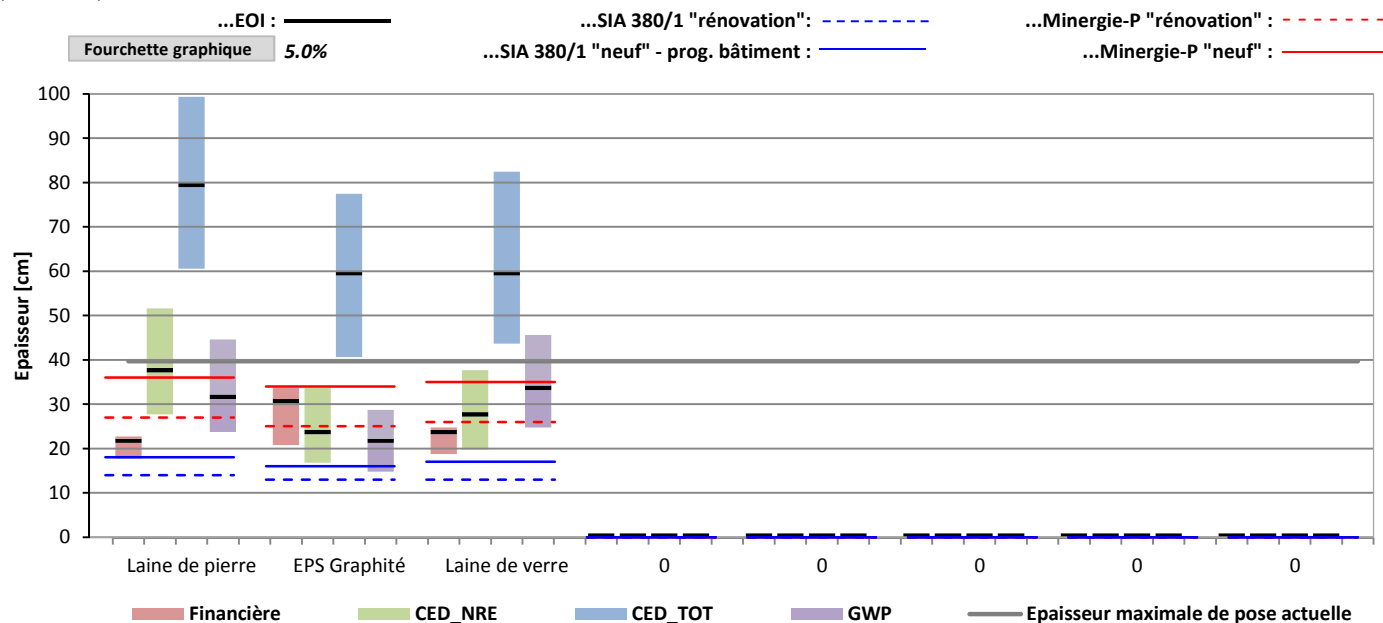
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

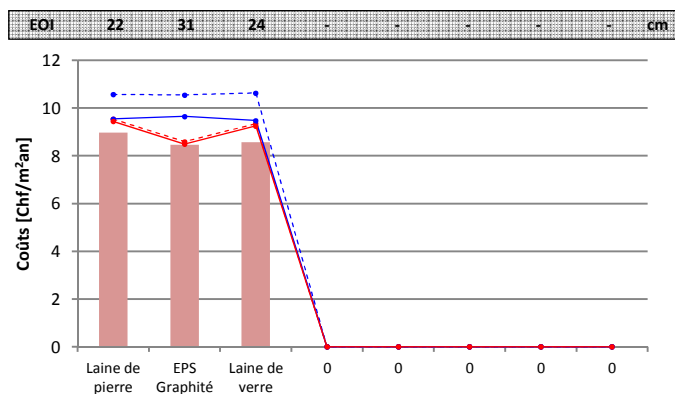
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

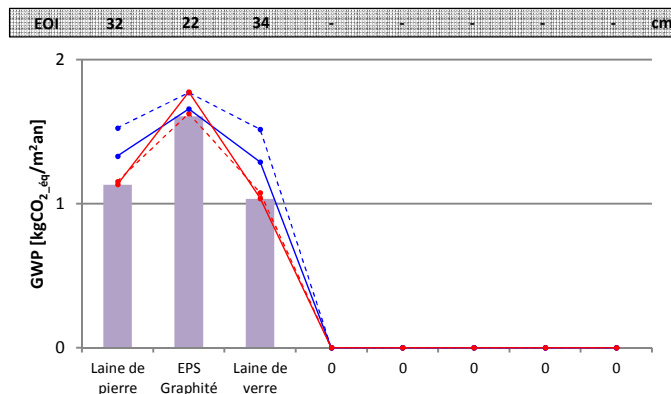
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

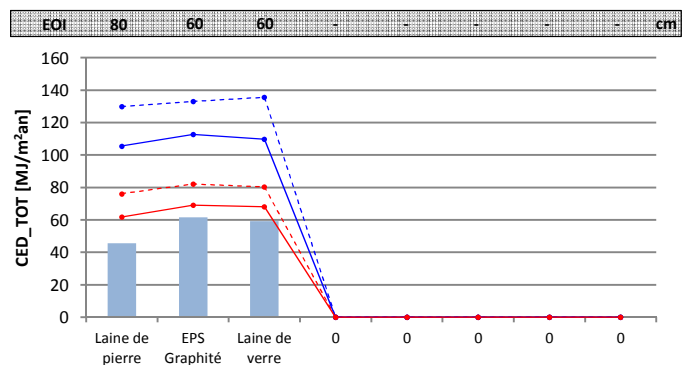
Coût



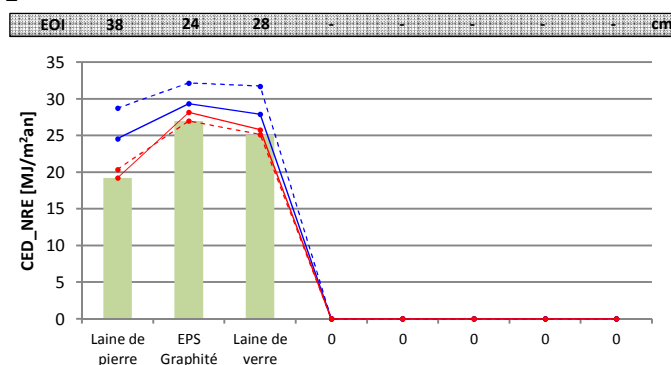
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

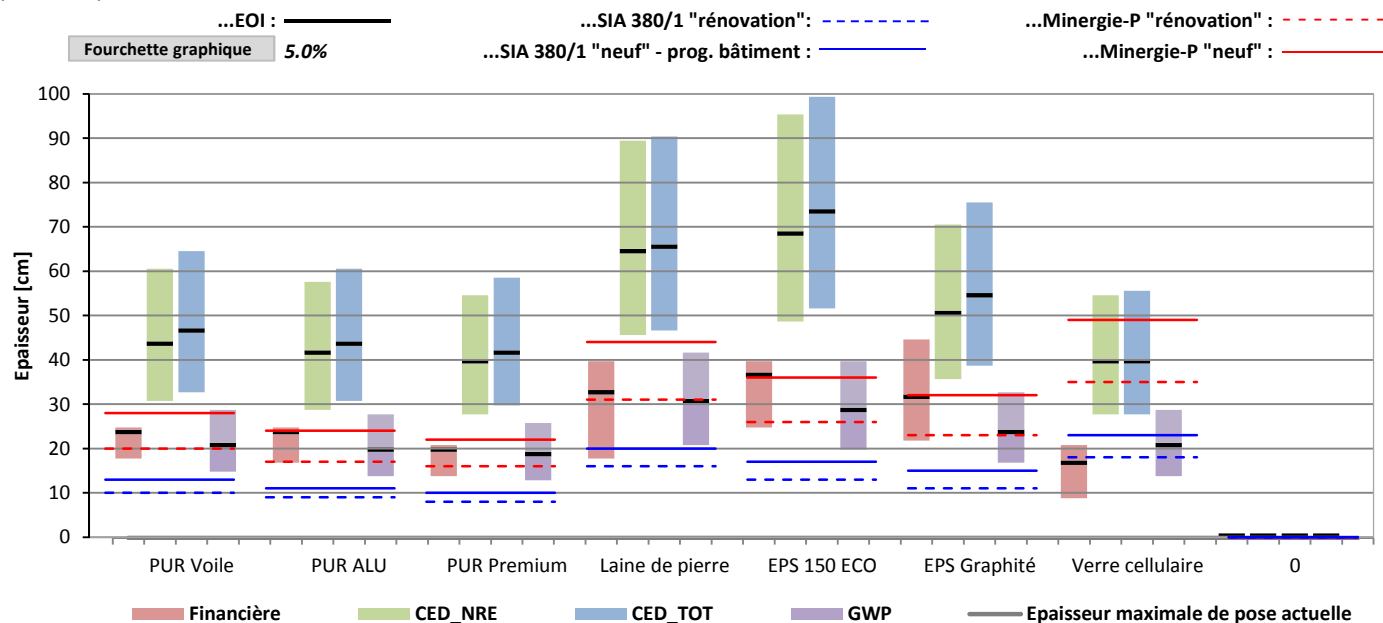
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

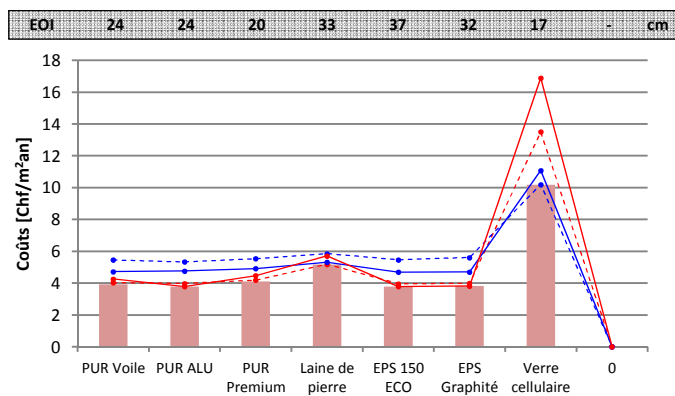
...SIA 380/1 "rénovation" : - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : —

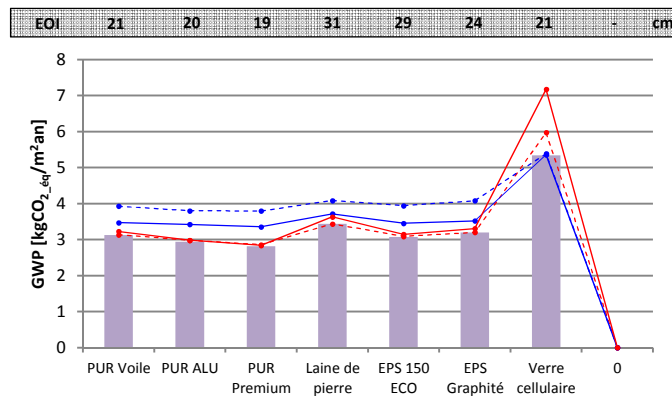
...Minergie-P "rénovation" : - - -

...Minergie-P "neuf" : —

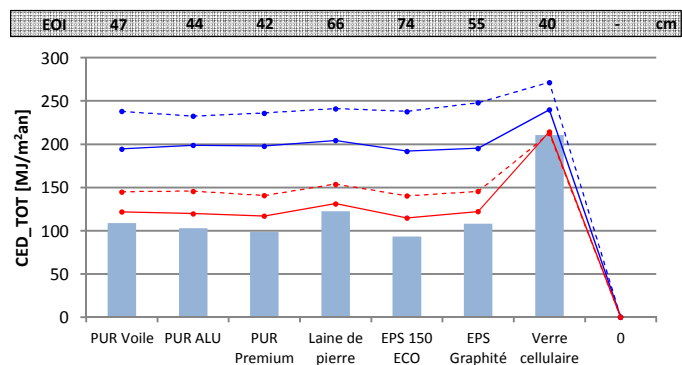
Coût



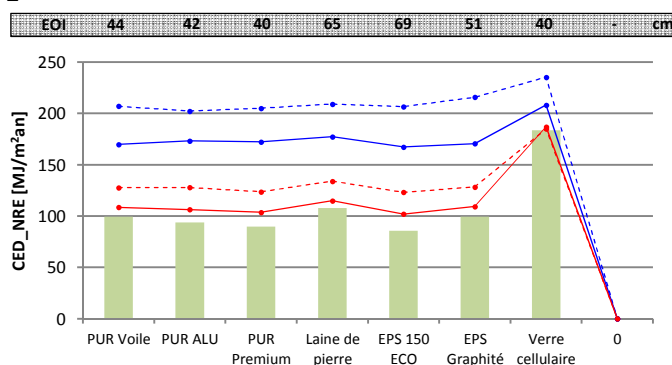
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

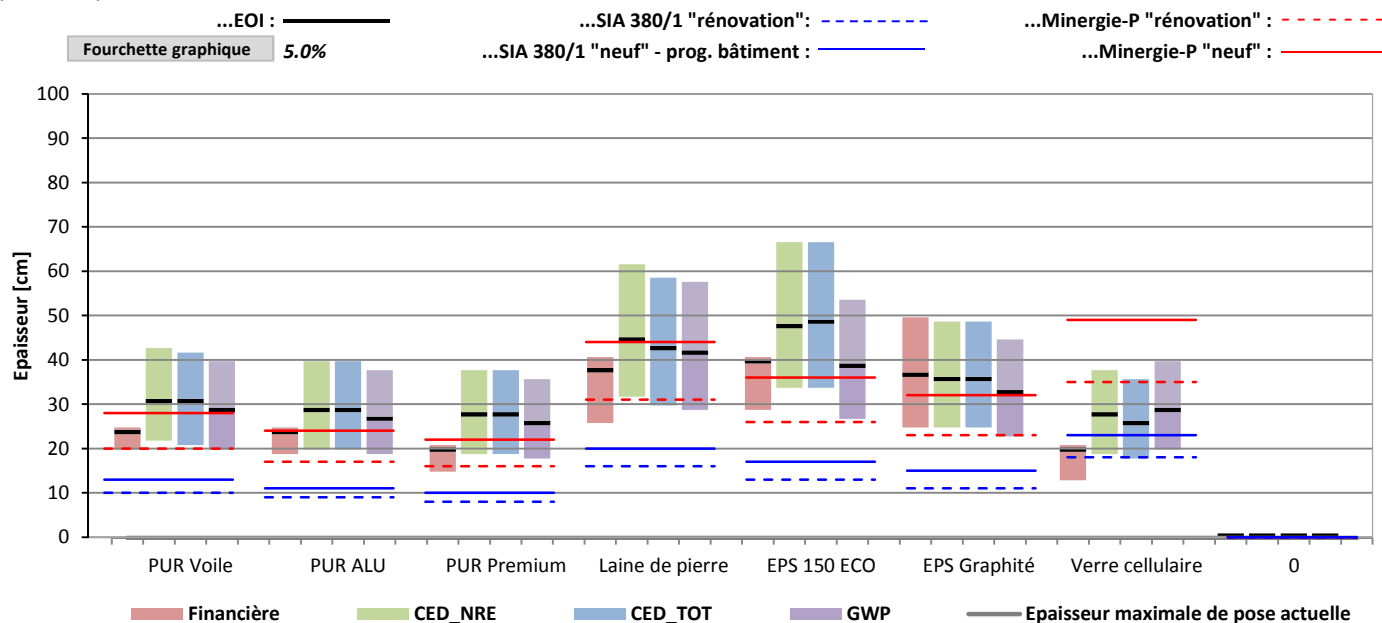
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

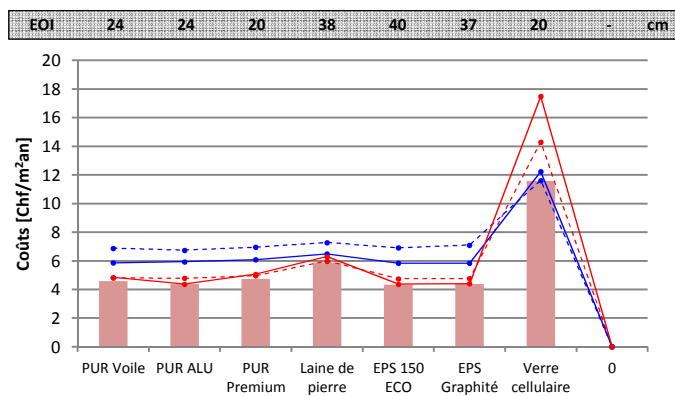
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

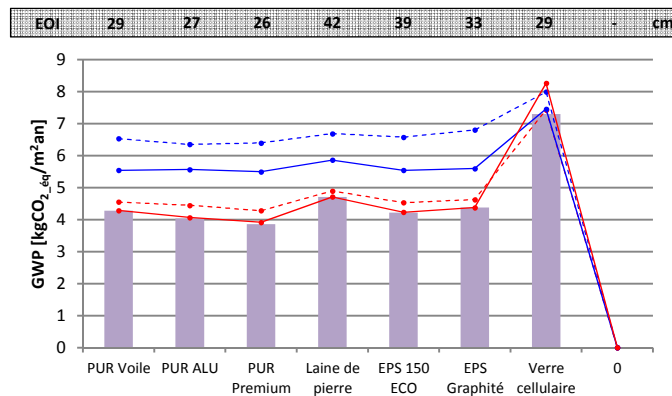
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

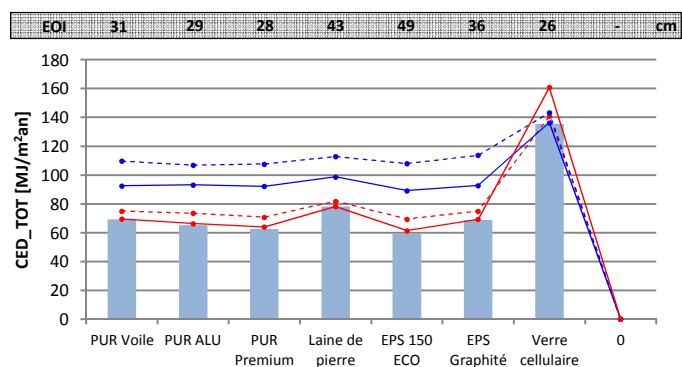
Coût



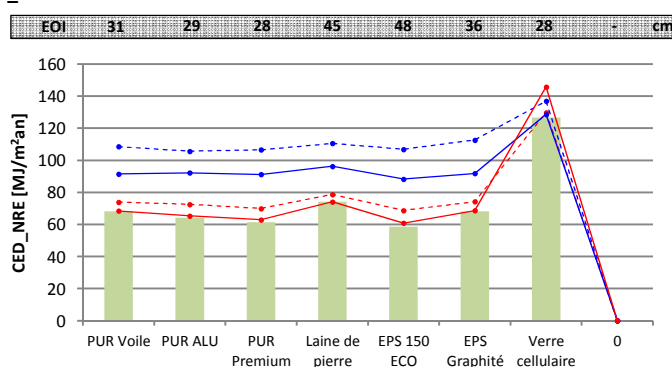
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

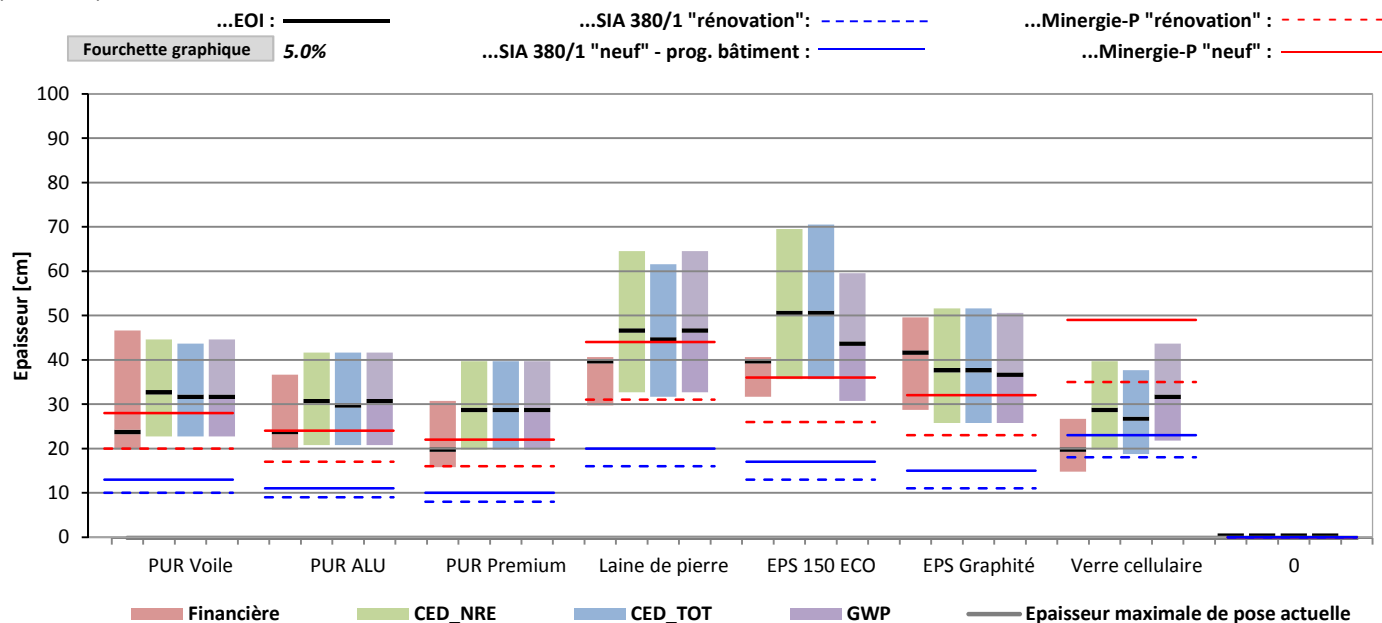
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Mazout</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

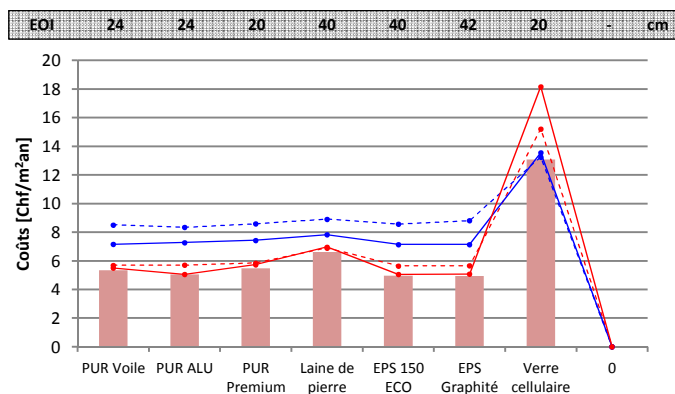
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

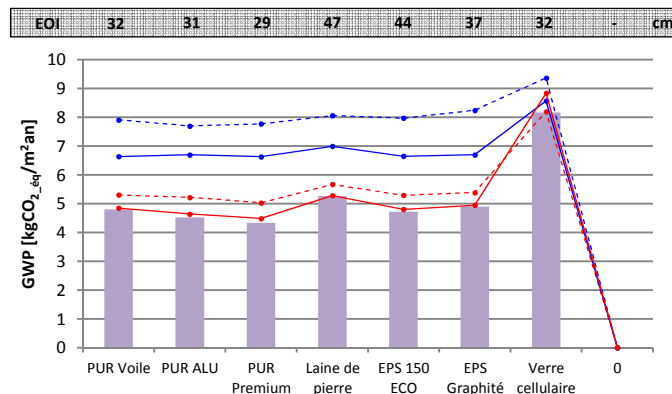
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

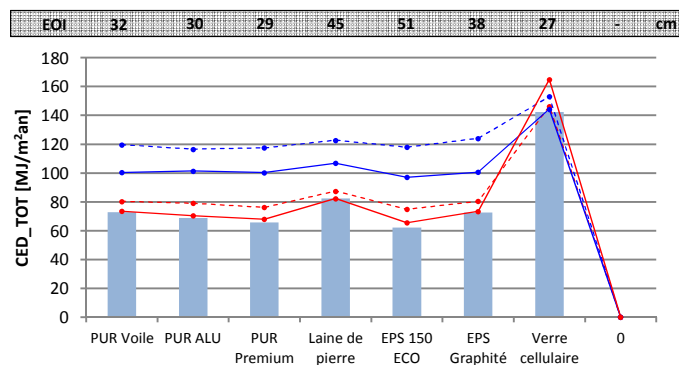
Coût



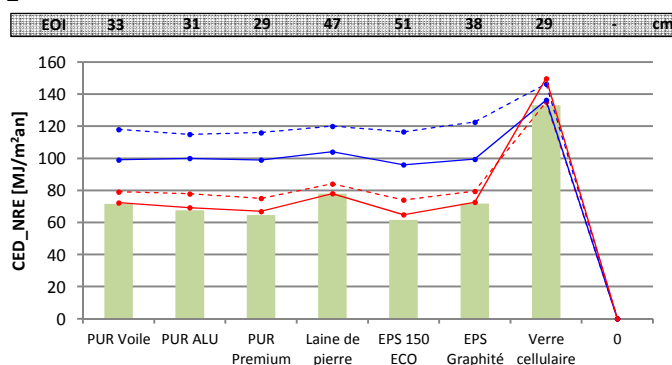
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

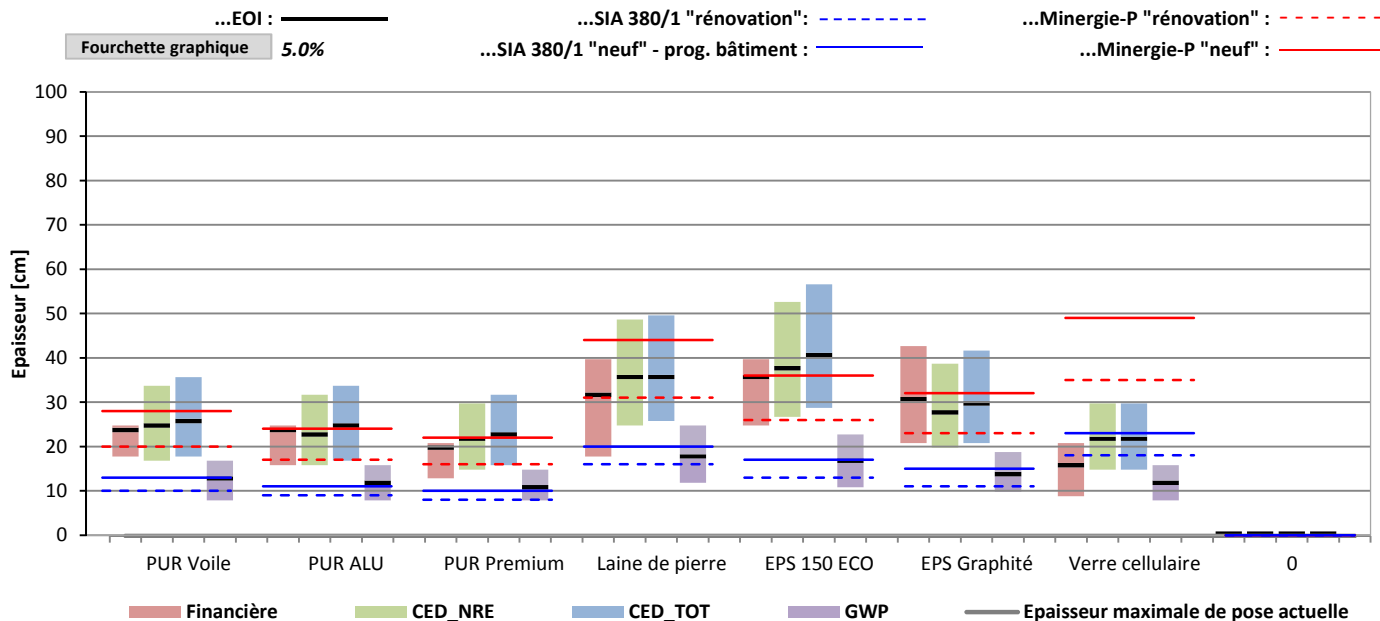
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

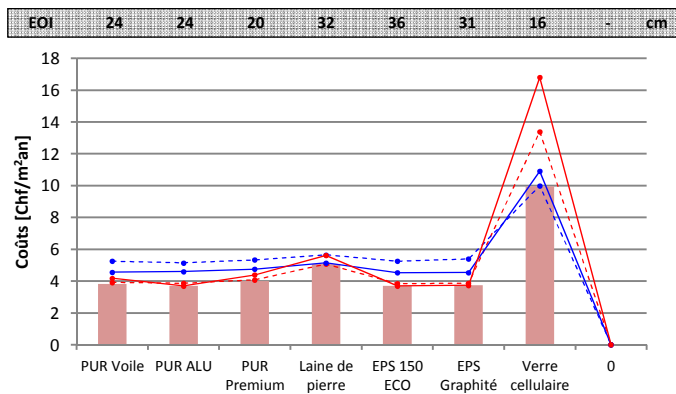
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

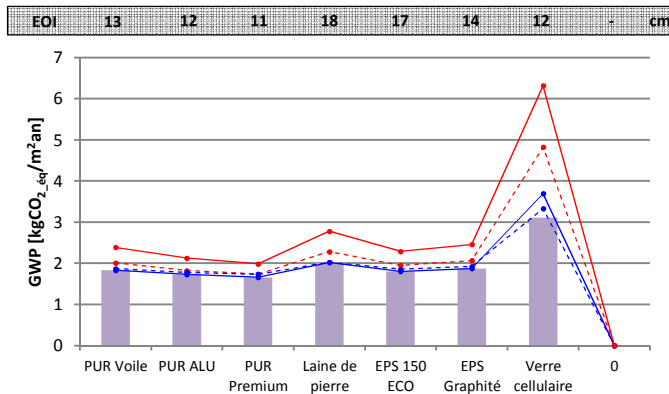
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

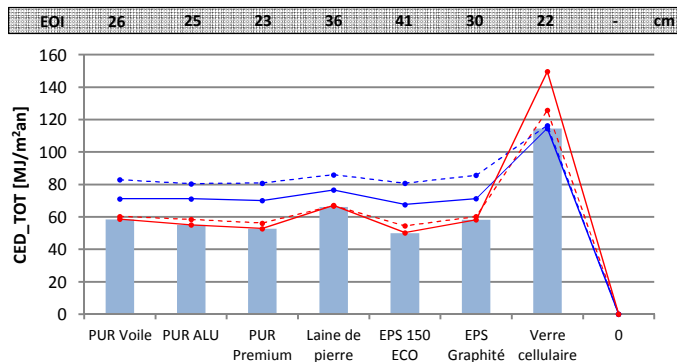
Coût



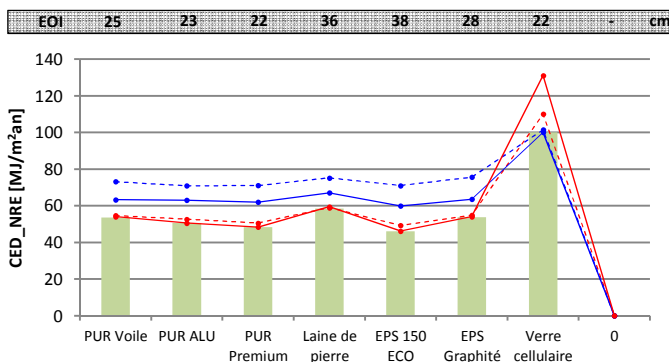
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

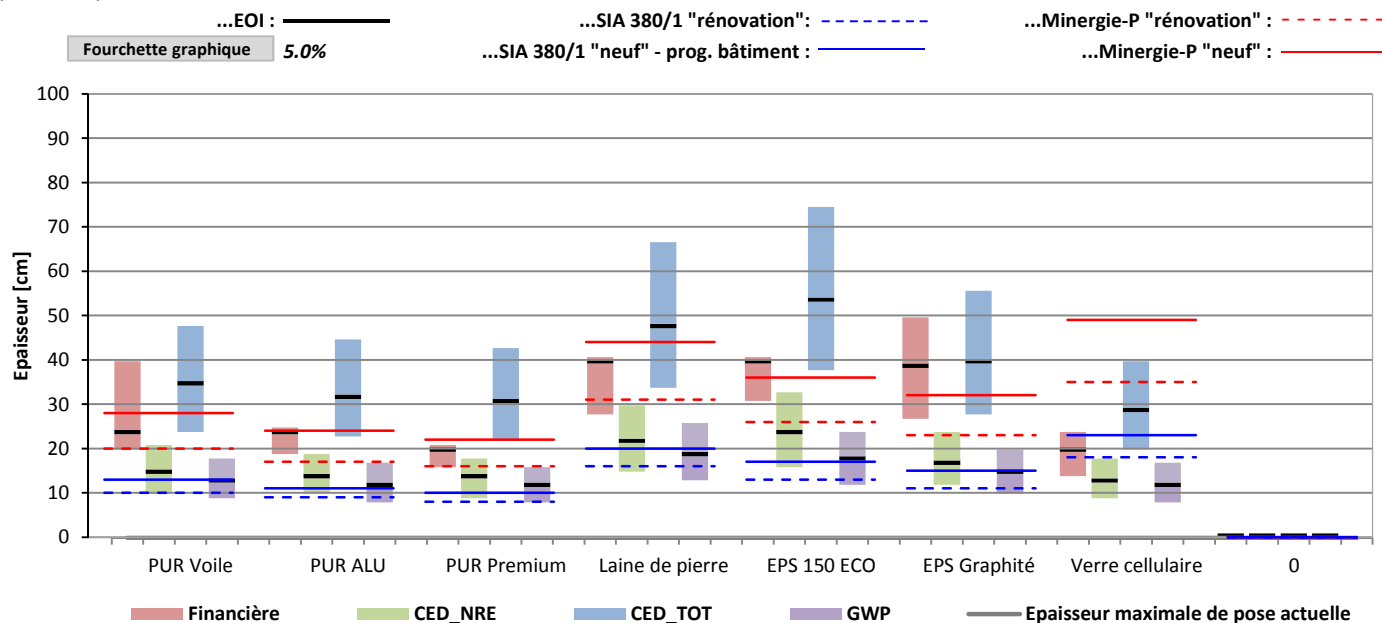
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

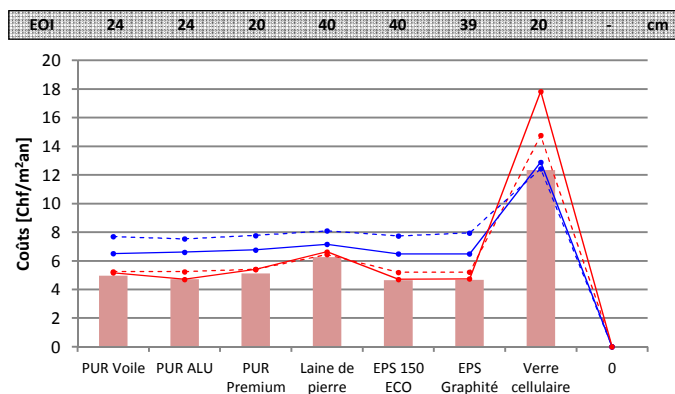
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

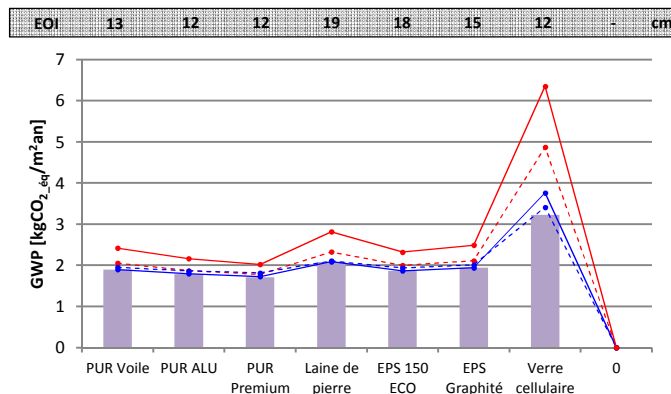
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

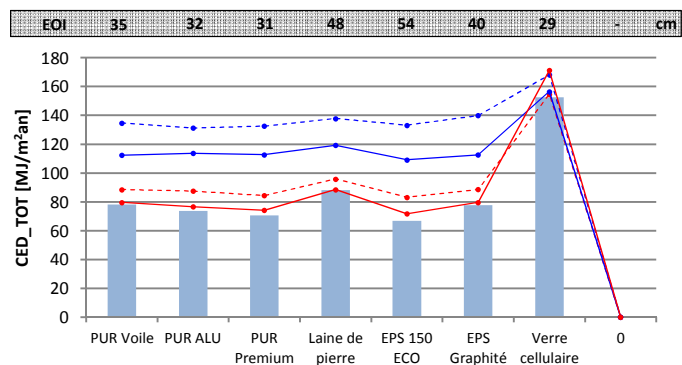
Coût



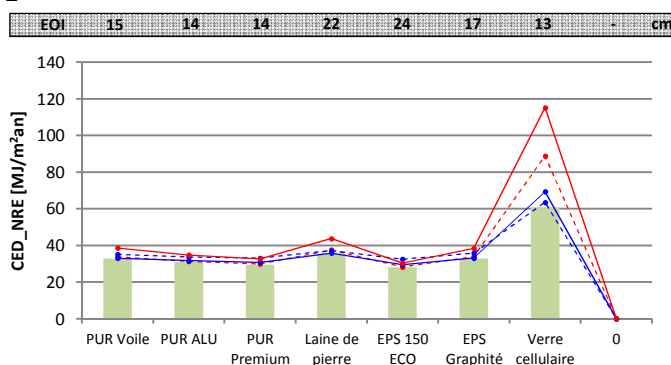
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

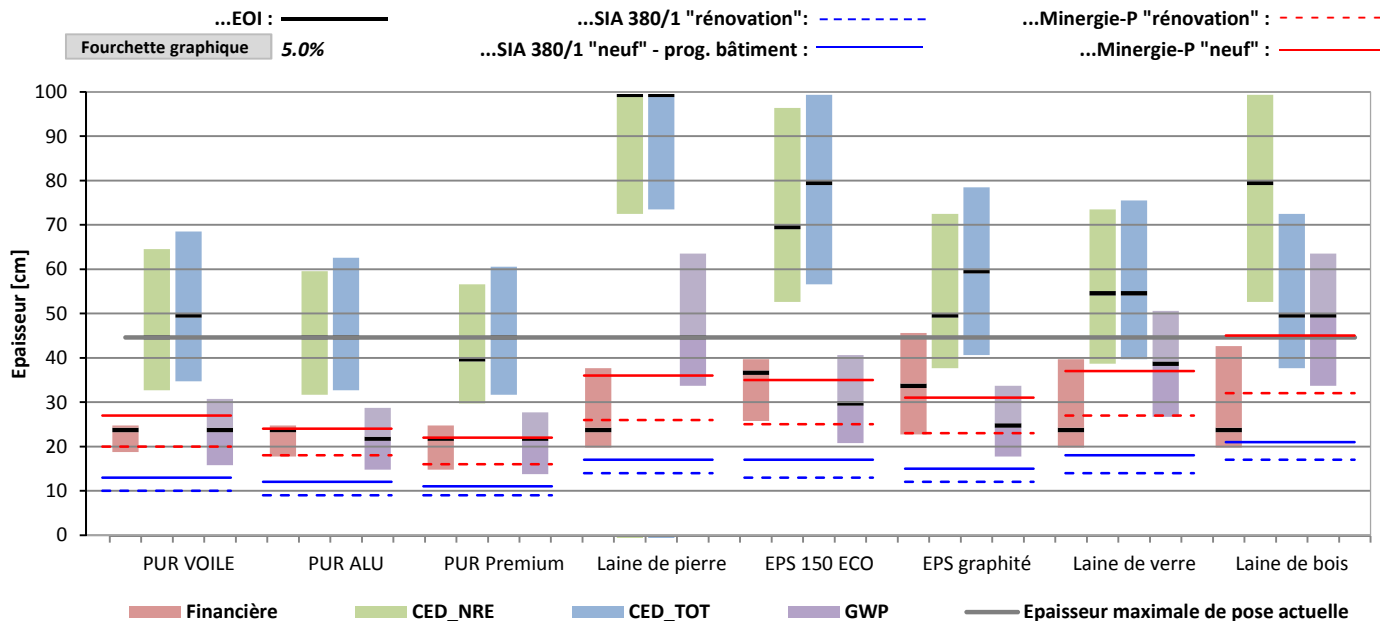
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

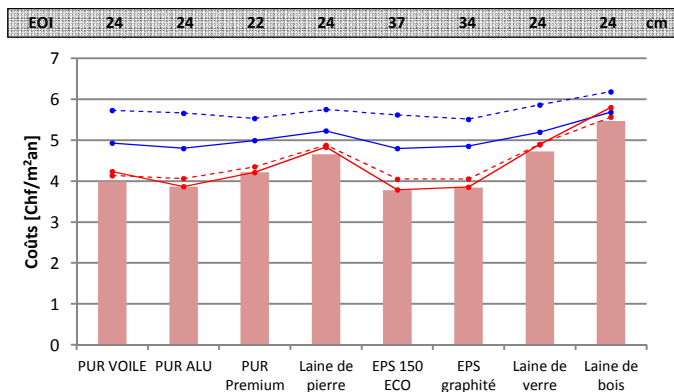
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

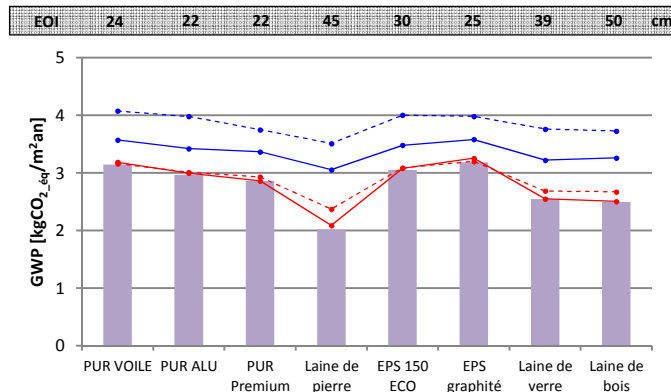
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

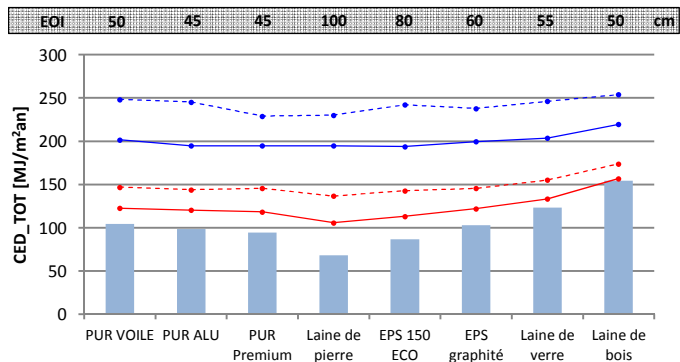
Coût



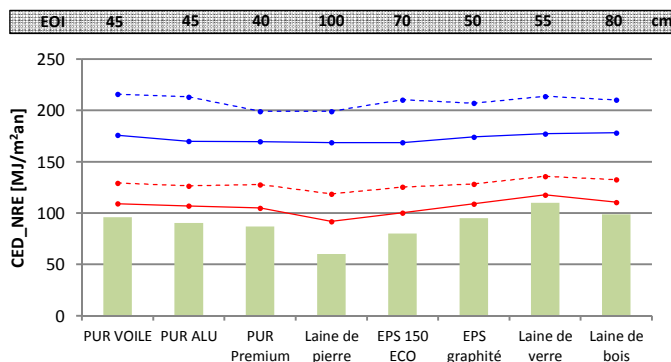
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

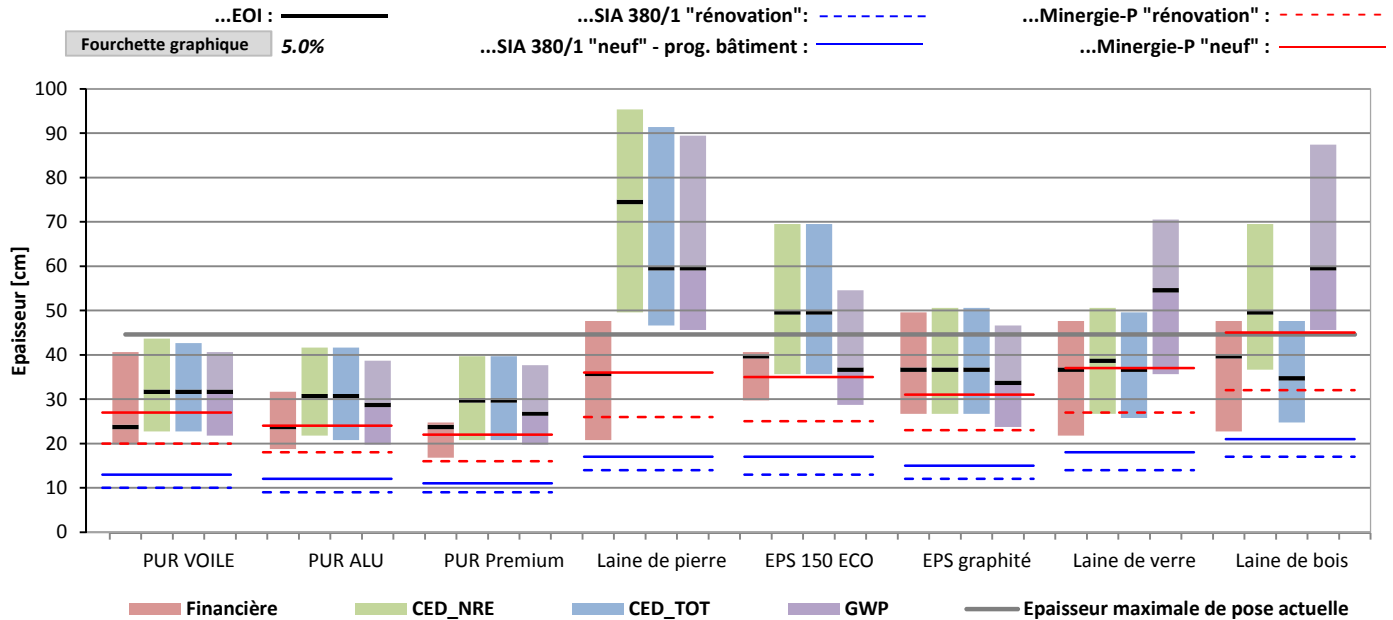
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

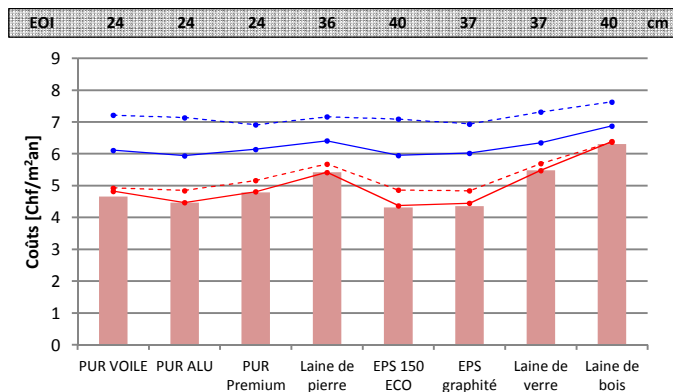
...SIA 380/1 "rénovation" : - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : —

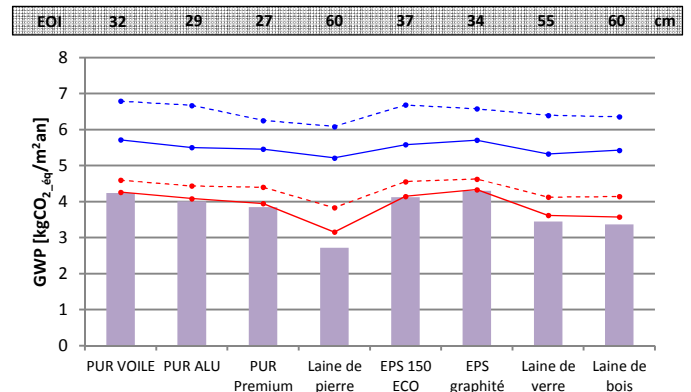
...Minergie-P "rénovation" : - - -

...Minergie-P "neuf" : —

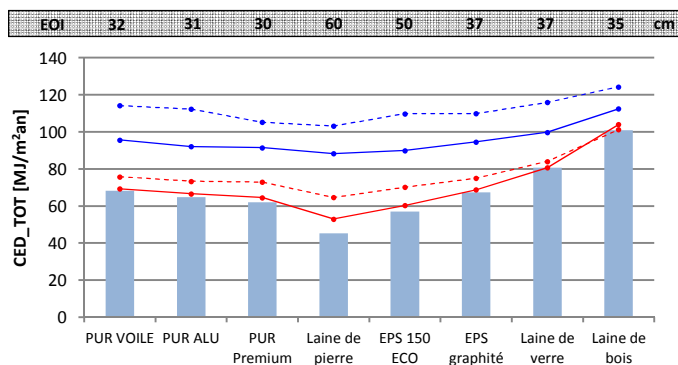
Coût



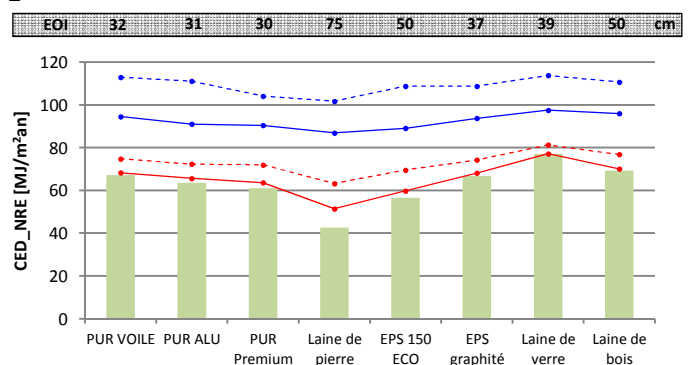
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

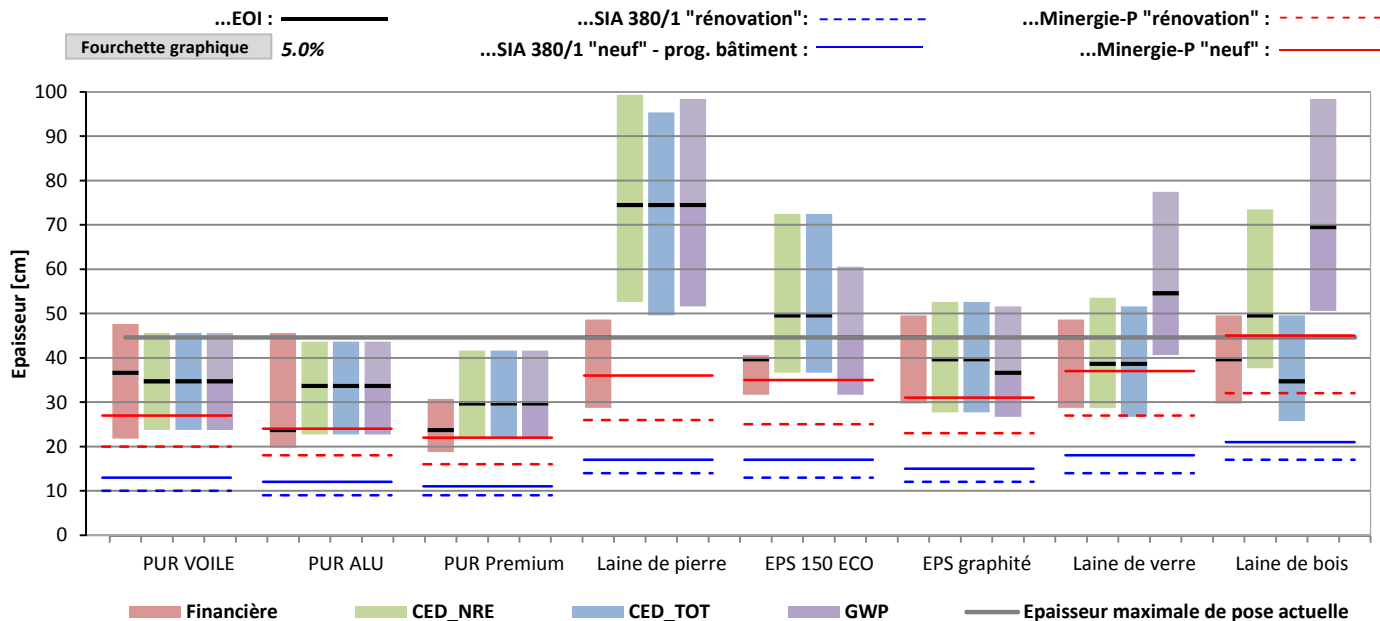
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Mazout</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

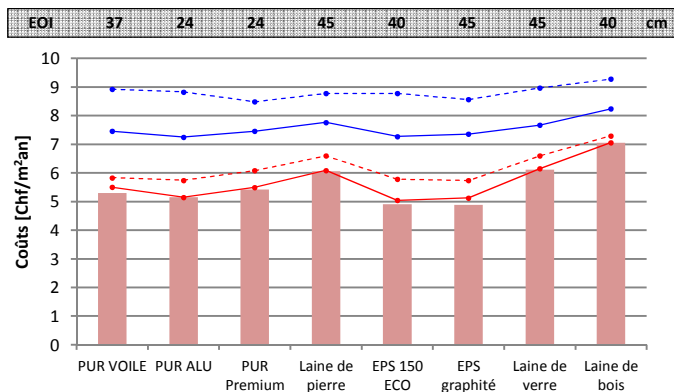
...SIA 380/1 "rénovation" : - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : —

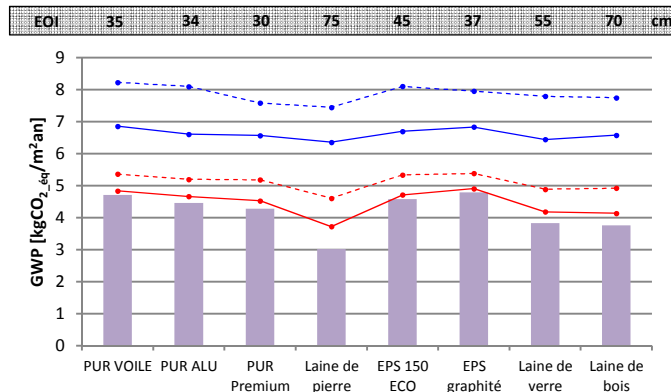
...Minergie-P "rénovation" : - - -

...Minergie-P "neuf" : —

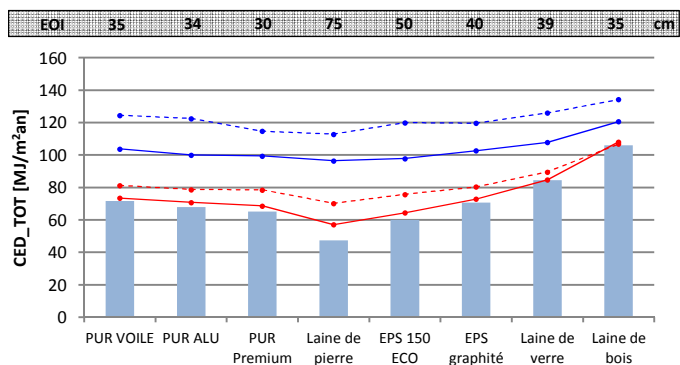
Coût



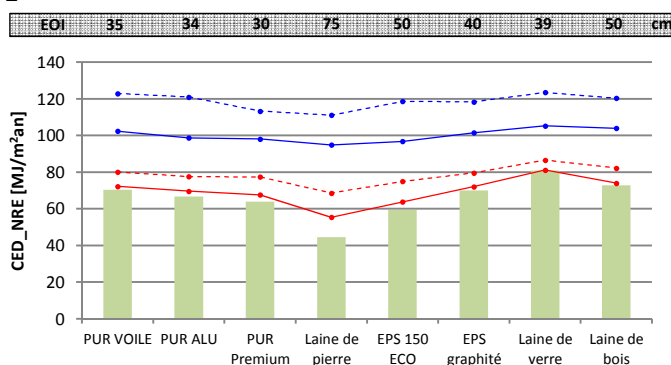
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

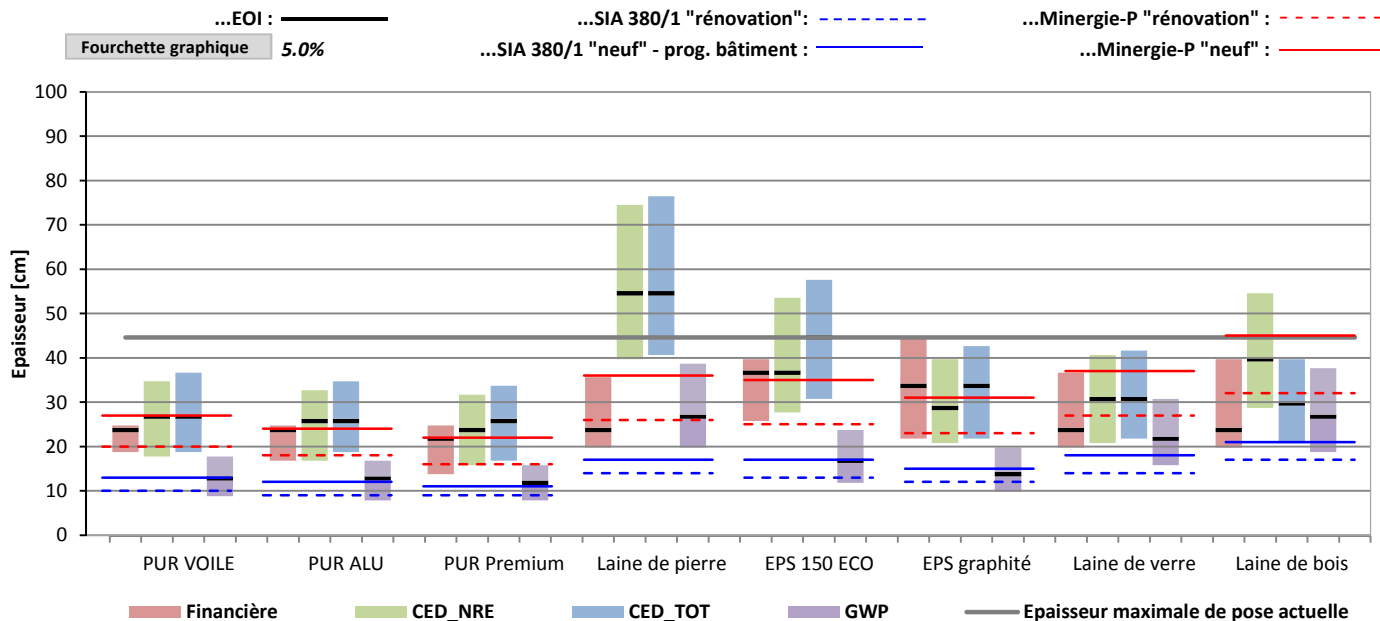
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

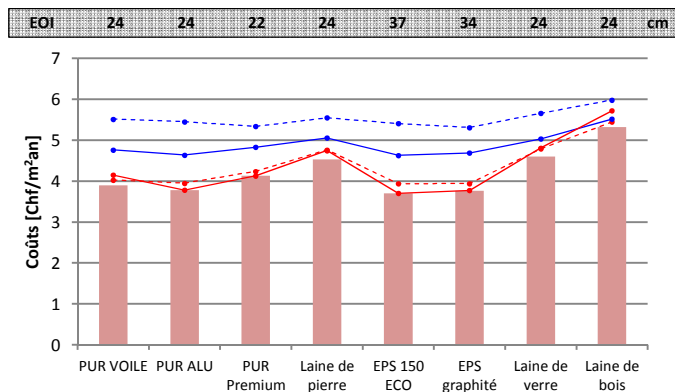
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

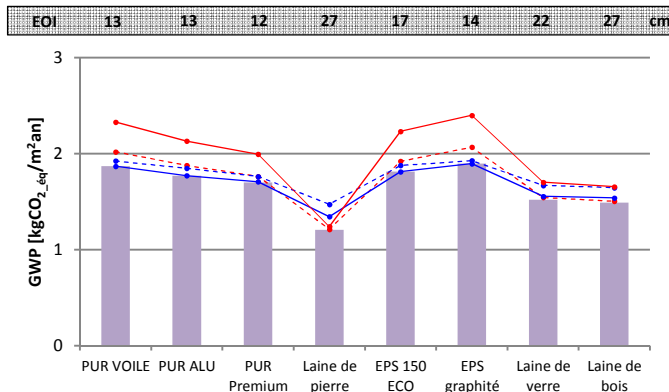
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

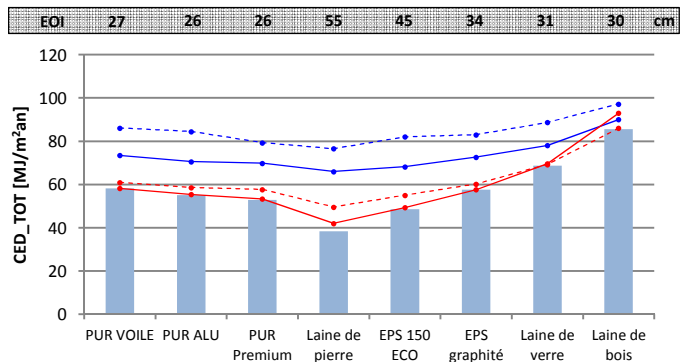
Coût



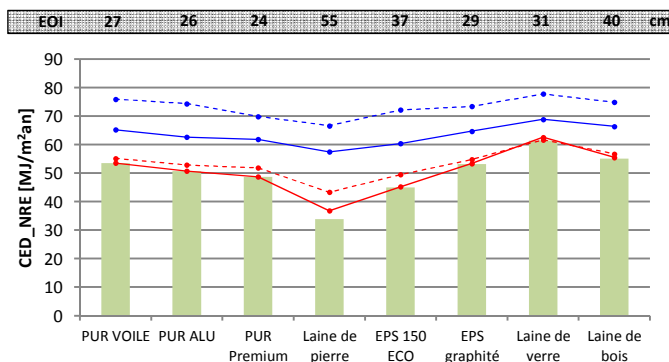
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

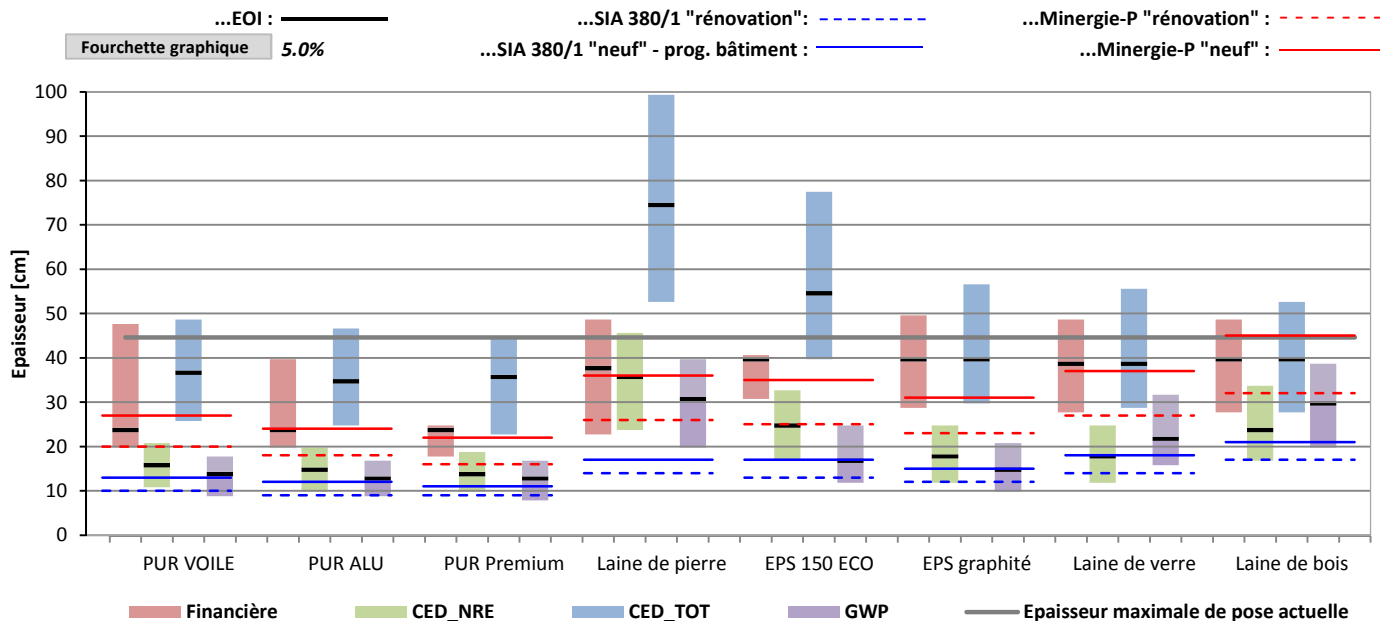
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>Non</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

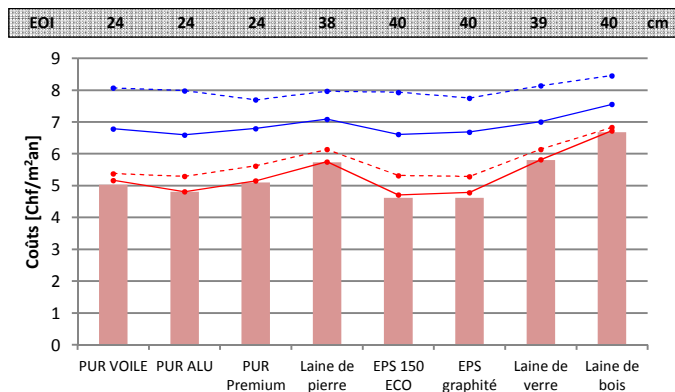
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

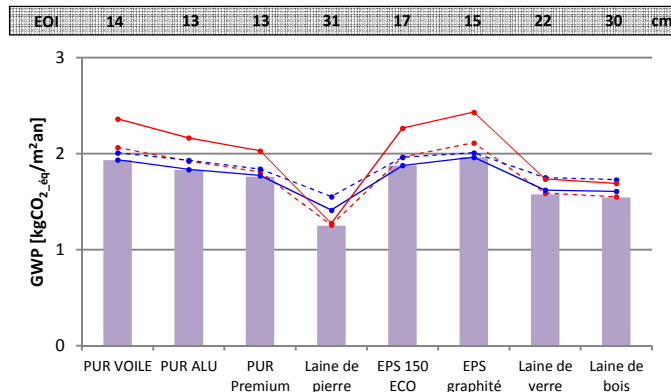
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

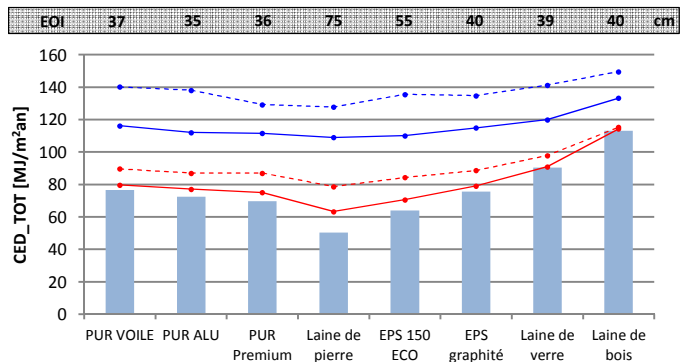
Coût



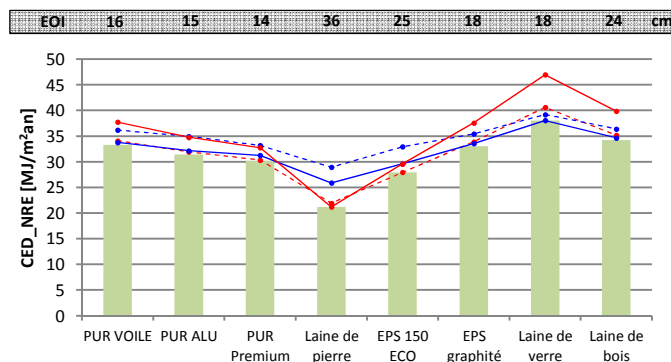
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Annexe 4: Fiches de synthèse par élément de construction et par système de chauffage (avec subventions, canton de Vaud)

Les fiches de synthèse avec subventions (VD) sont présentées par élément de construction (façade compacte, façade ventilée, toiture plate et toiture inclinée) pour les cinq systèmes de chauffage étudiés : électricité, gaz, mazout, PAC AE, pellets. Elles présentent, à chaque fois, les résultats par système de chauffage pour tous les isolants.

Liste des fiches de synthèse par élément de construction avec entre parenthèse le système de chauffage :

- Façade compacte (électricité)
- Façade compacte (gaz naturel)
- Façade compacte (mazout)
- Façade compacte (PAC AE)
- Façade compacte (pellets)

- Façade ventilée (électricité)
- Façade ventilée (gaz naturel)
- Façade ventilée (mazout)
- Façade ventilée (PAC AE)
- Façade ventilée (pellets)

- Toiture plate (électricité)
- Toiture plate (gaz naturel)
- Toiture plate (mazout)
- Toiture plate (PAC AE)
- Toiture plate (pellets)

- Toiture inclinée (électricité)
- Toiture inclinée (gaz naturel)
- Toiture inclinée (mazout)
- Toiture inclinée (PAC AE)
- Toiture inclinée (pellets)

Fiche de résumé par élément

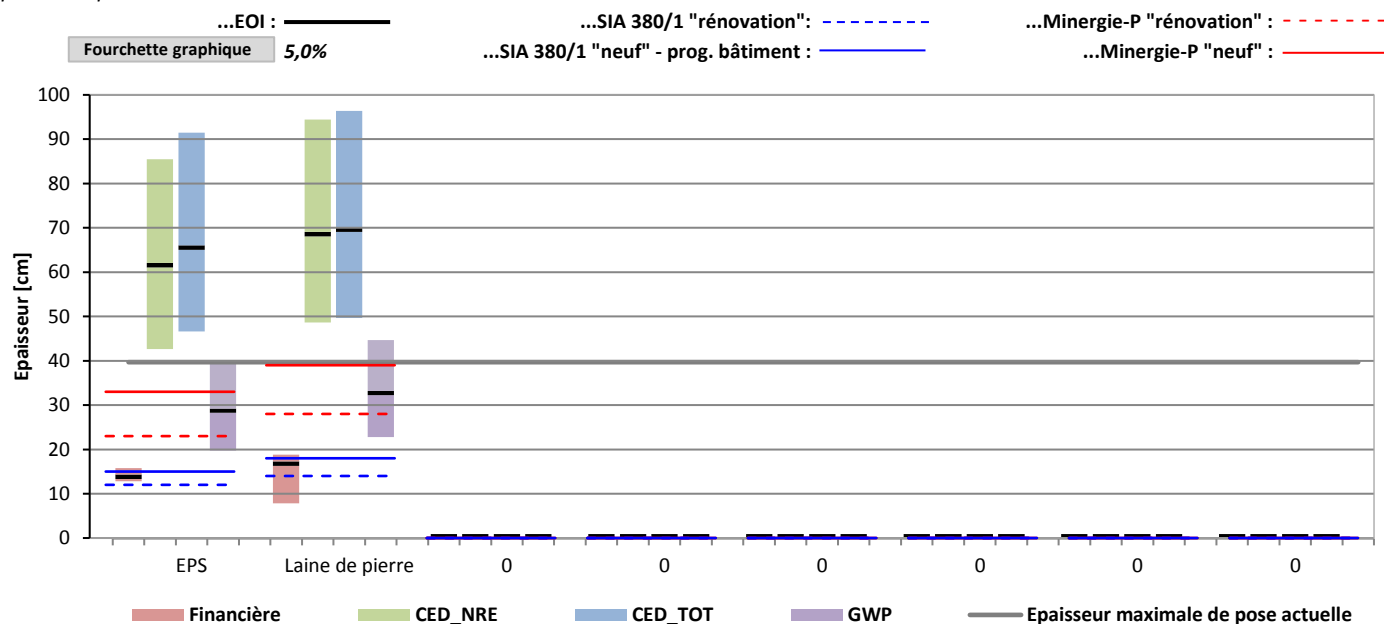
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

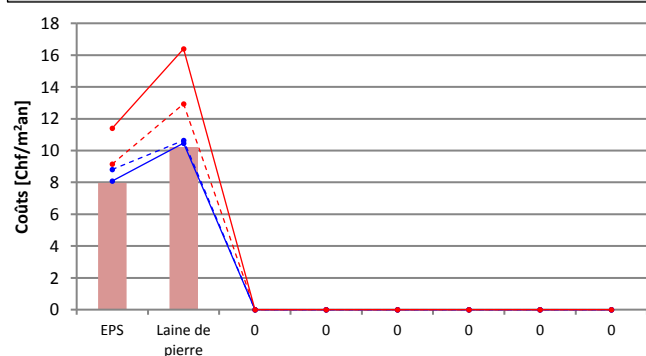
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "neuf" : ———

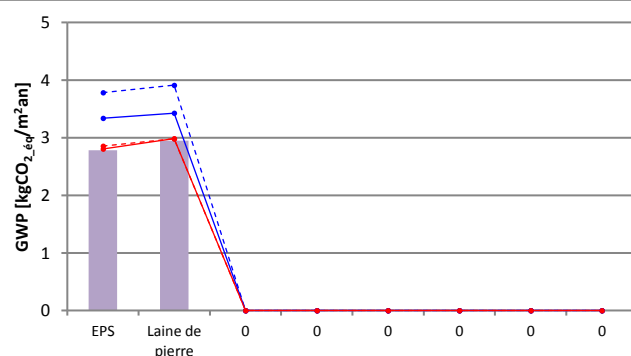
Coût

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 14 | 17 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



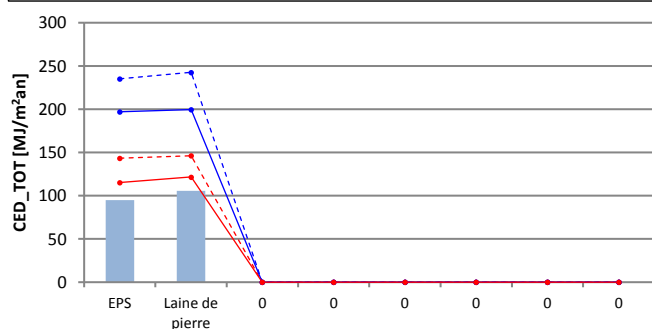
GWP

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 29 | 33 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



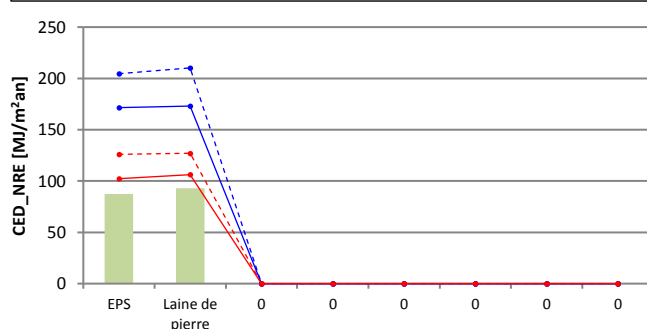
CED_TOT

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 66 | 70 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



CED_NRE

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 62 | 69 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



Fiche de résumé par élément

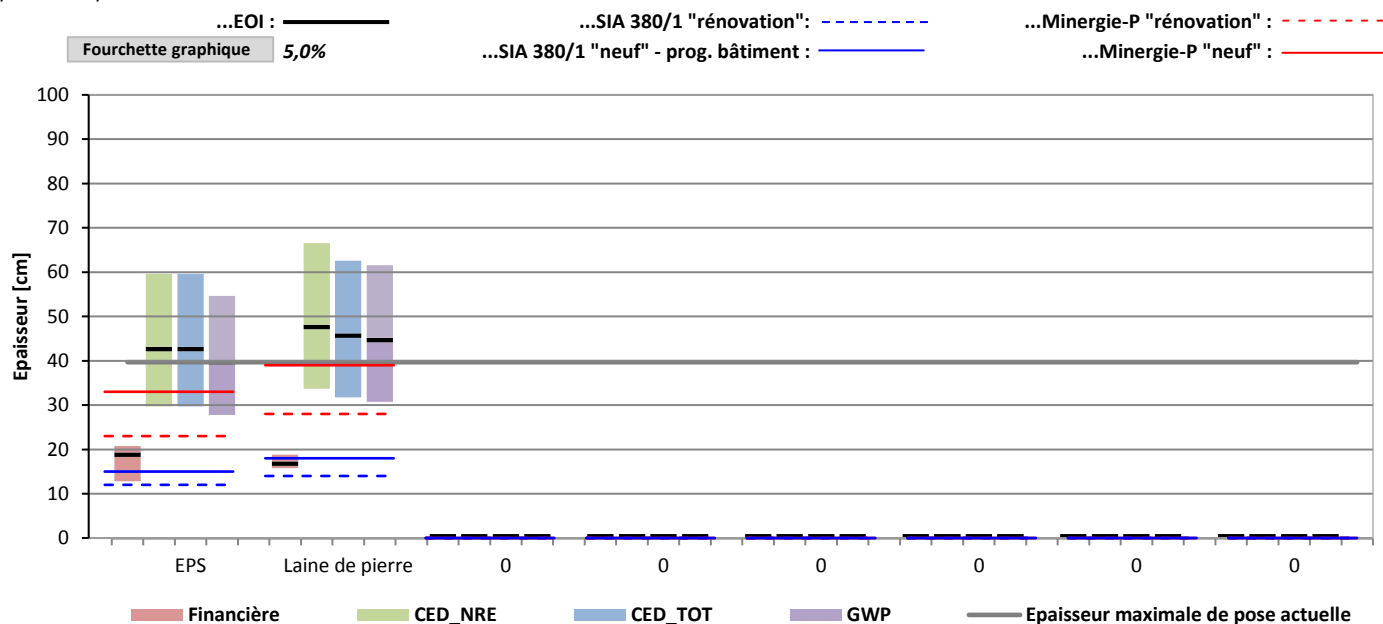
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

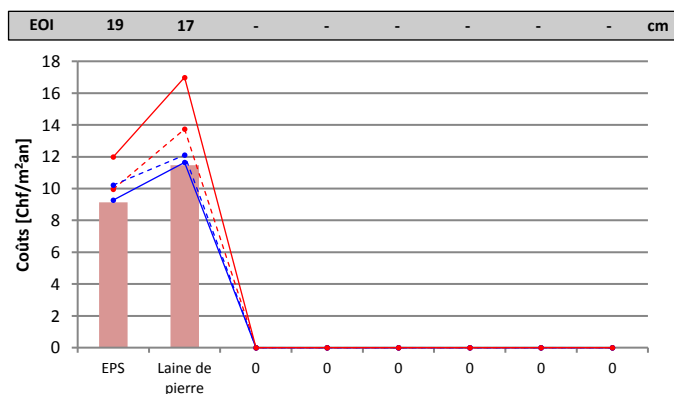
...SIA 380/1 "rénovation": - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

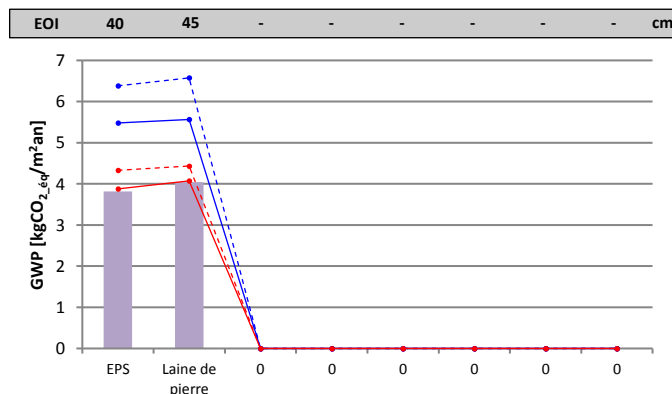
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

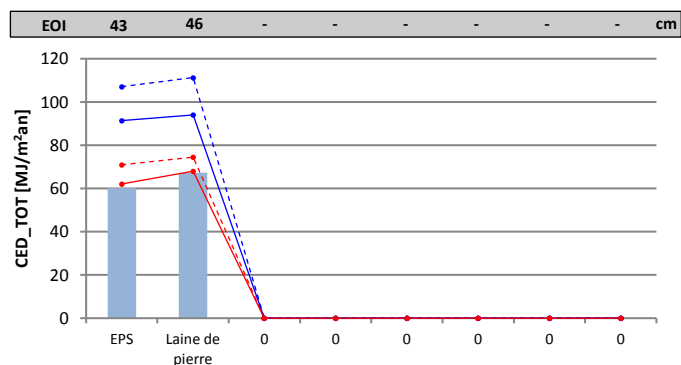
Coût



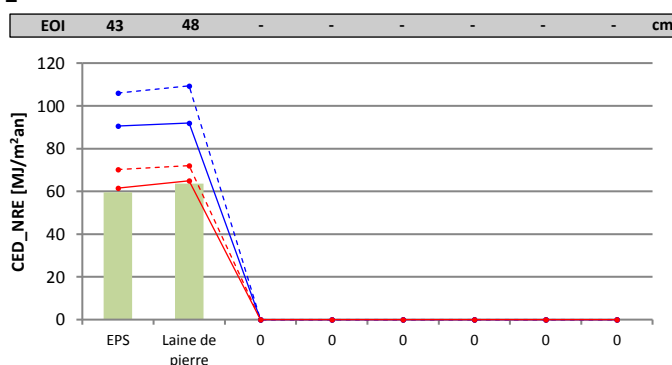
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

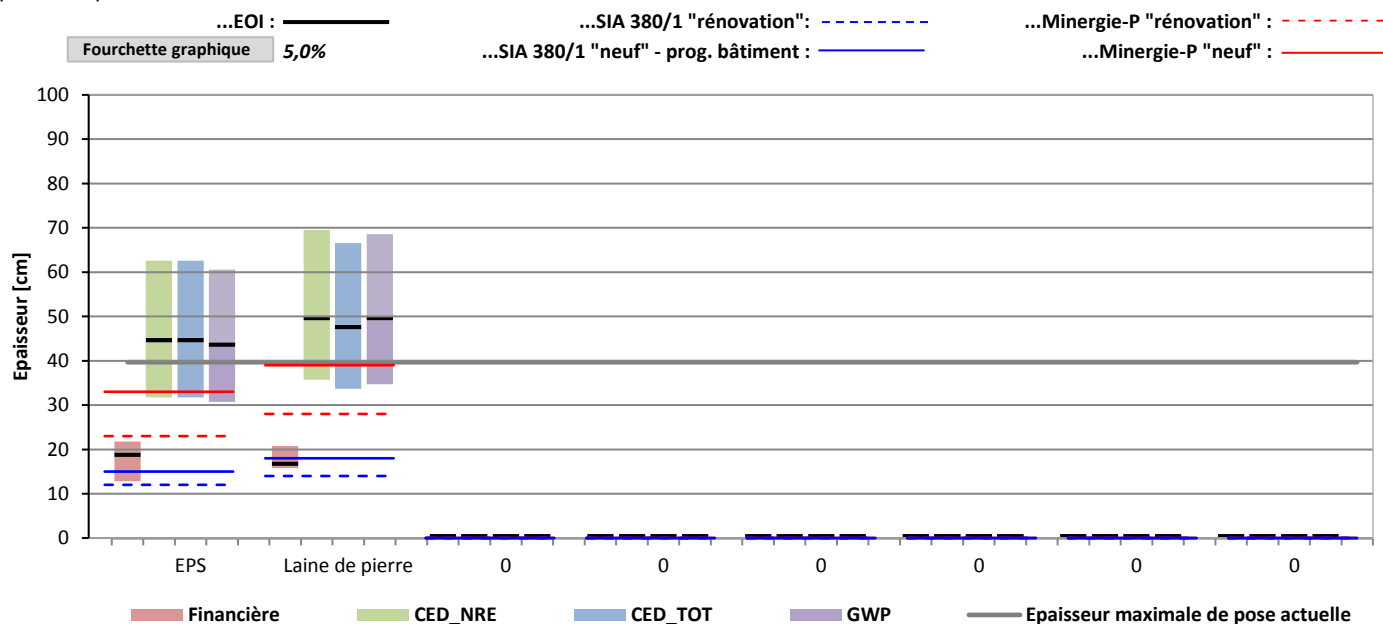
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : Mazout |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

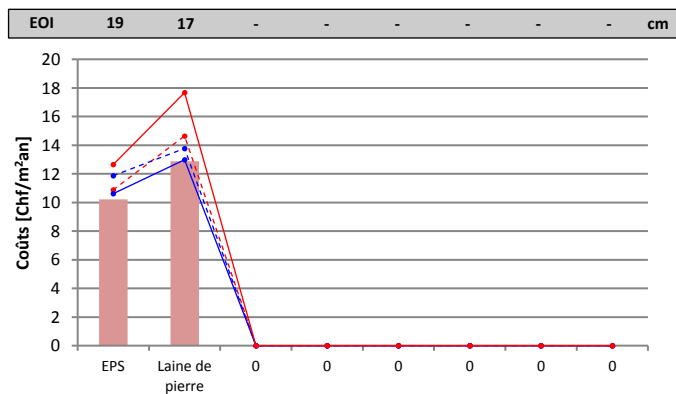
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

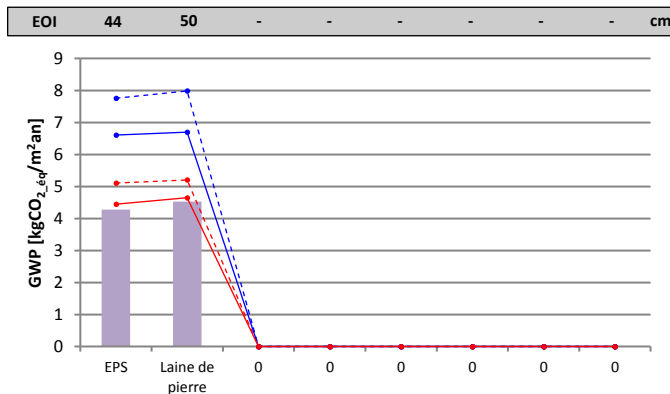
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

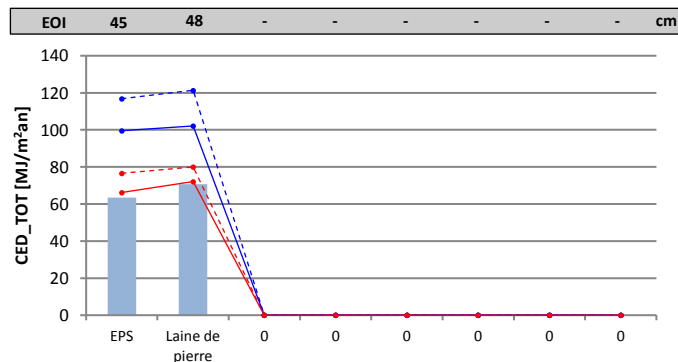
Coût



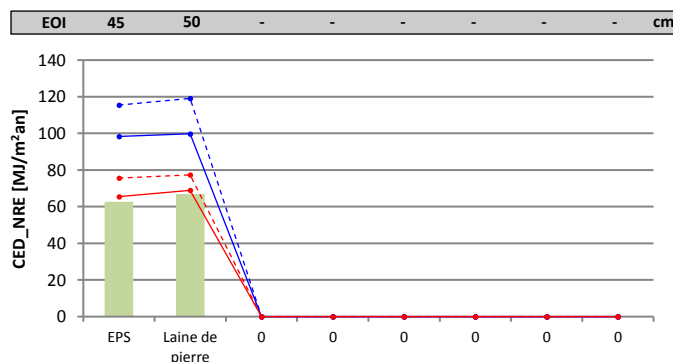
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

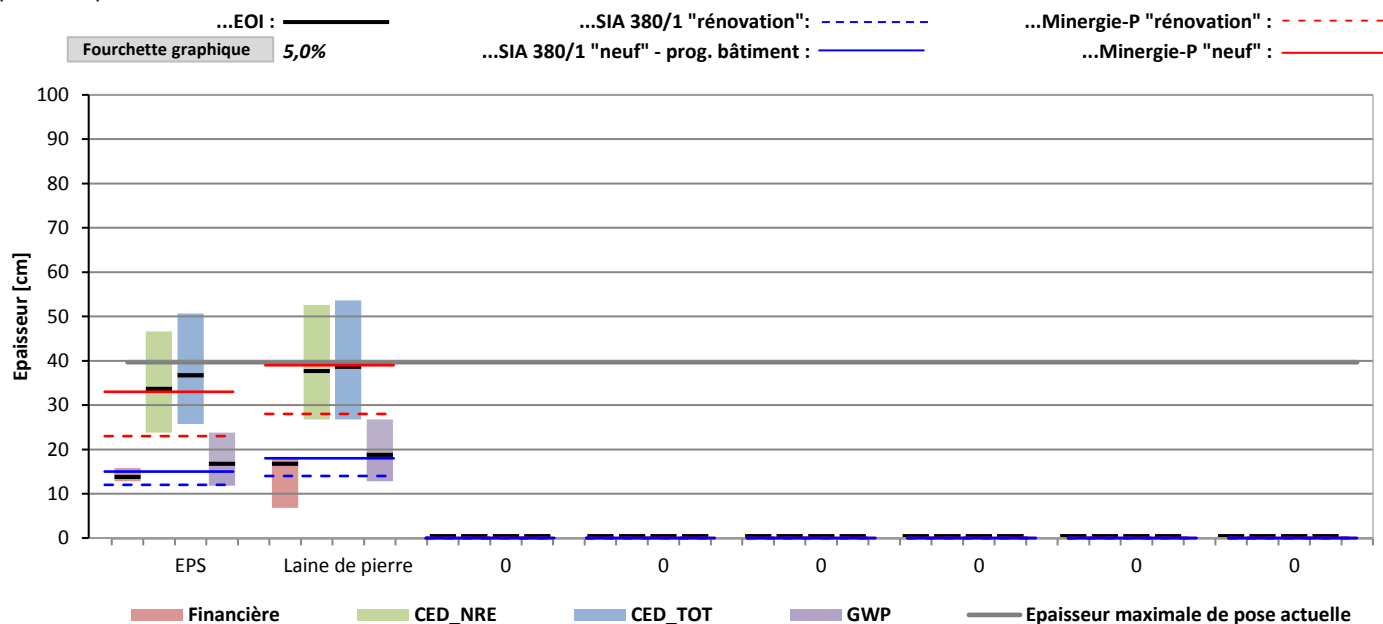
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

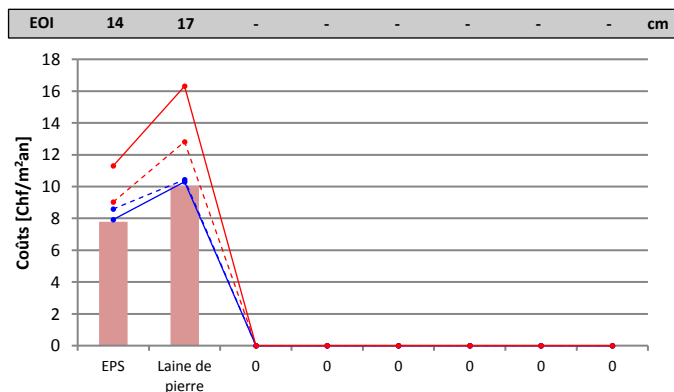
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

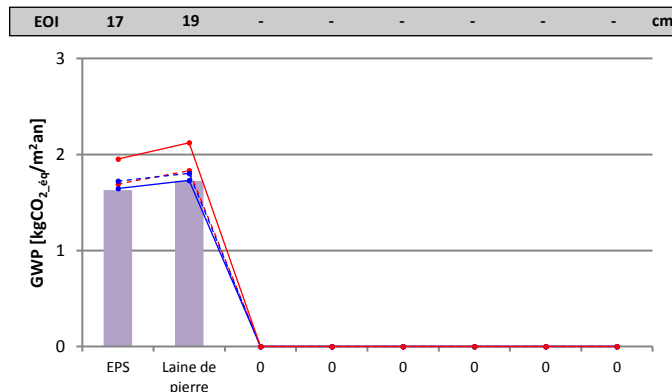
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

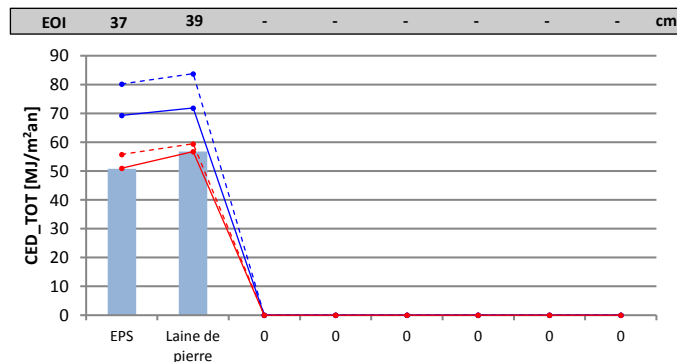
Coût



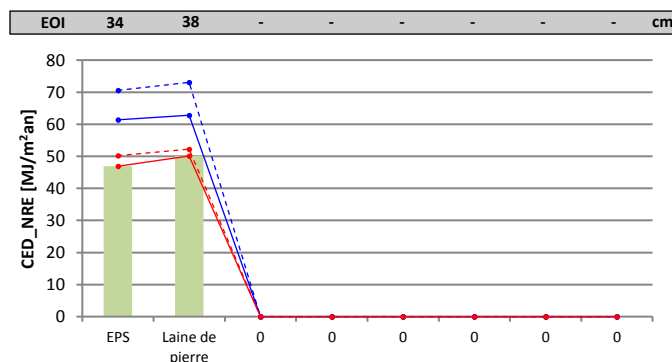
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

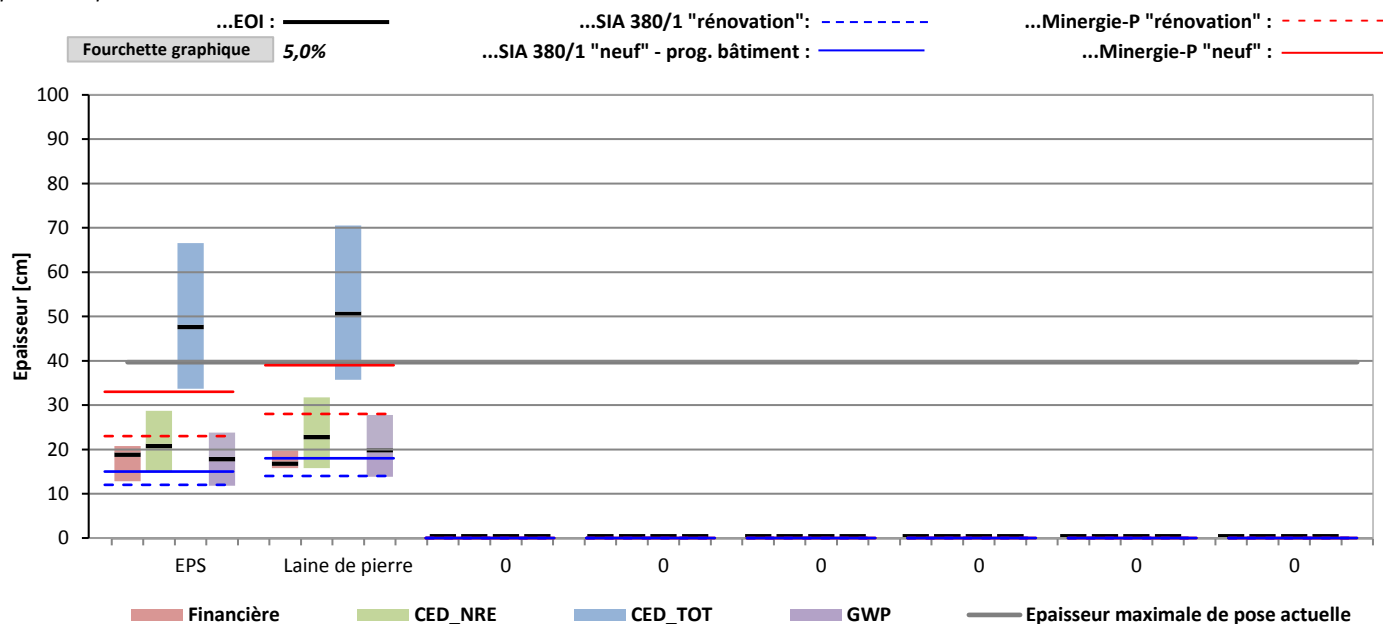
Façade compacte

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0,33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0,9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

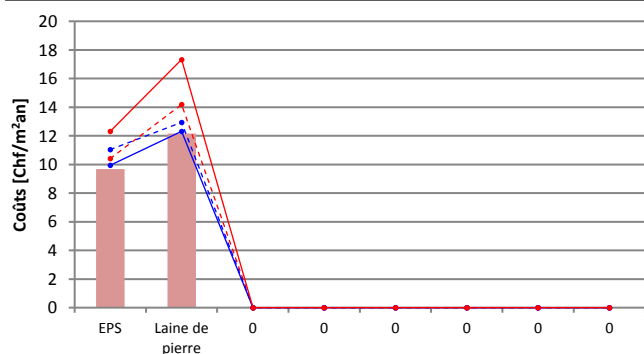
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

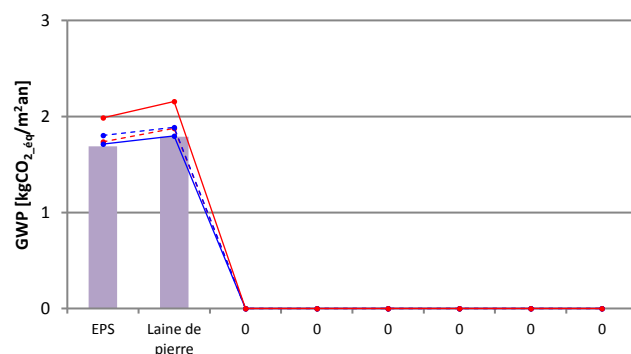
Coût

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 19 | 17 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



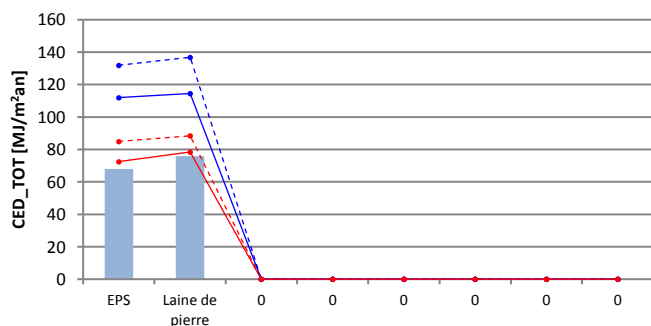
GWP

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 18 | 20 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



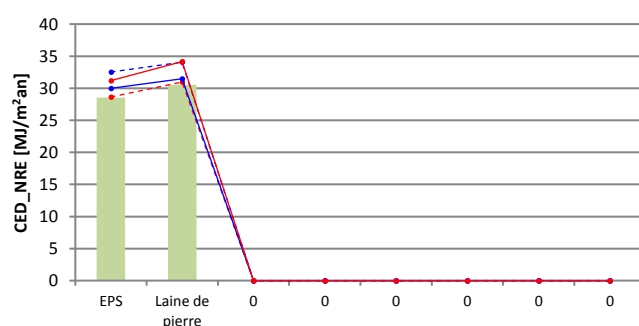
CED_TOT

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 48 | 51 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



CED_NRE

| | | | | | | | | | |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|
| EOI | 21 | 23 | - | - | - | - | - | - | cm |
|-----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|



Fiche de résumé par élément

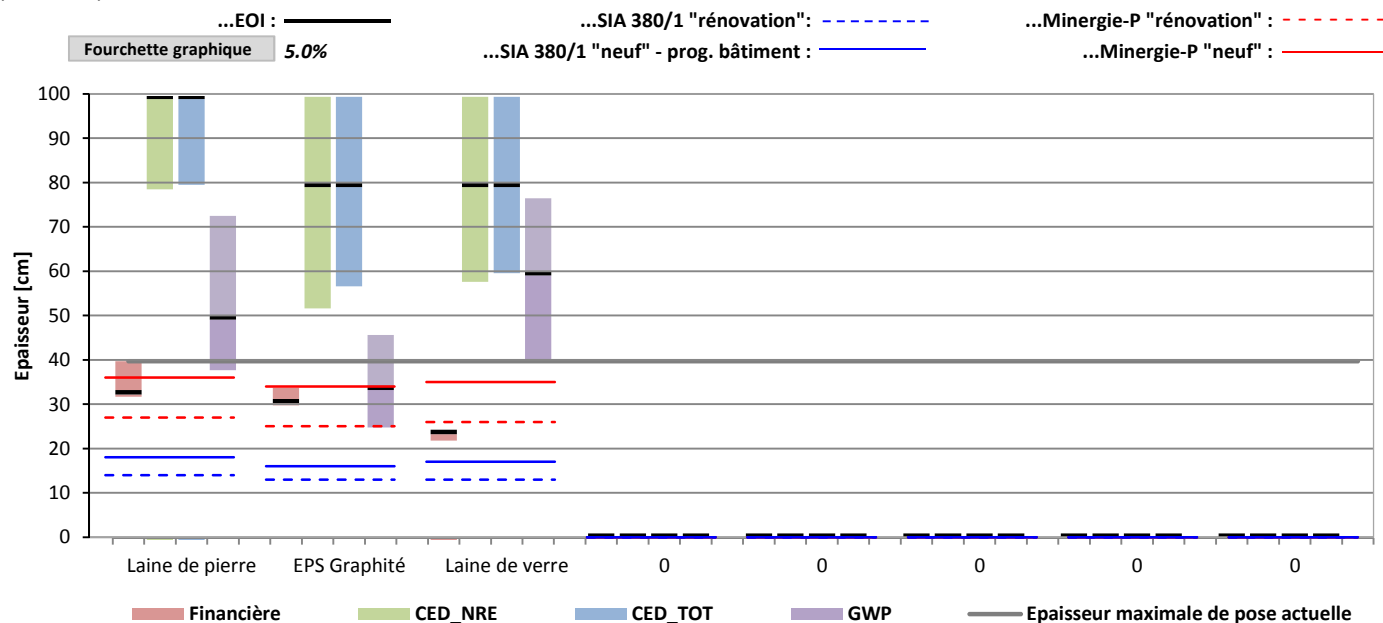
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

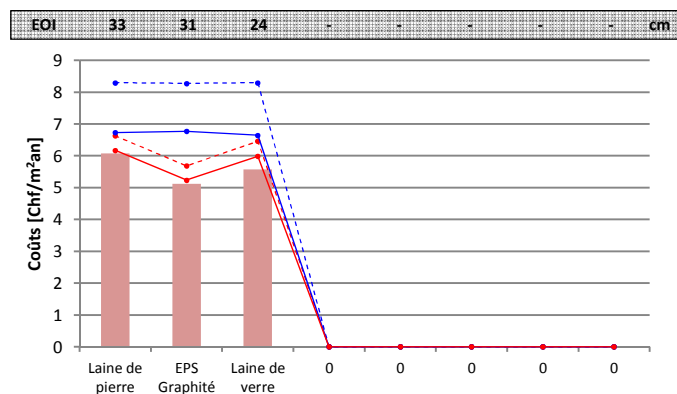
...SIA 380/1 "rénovation": - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

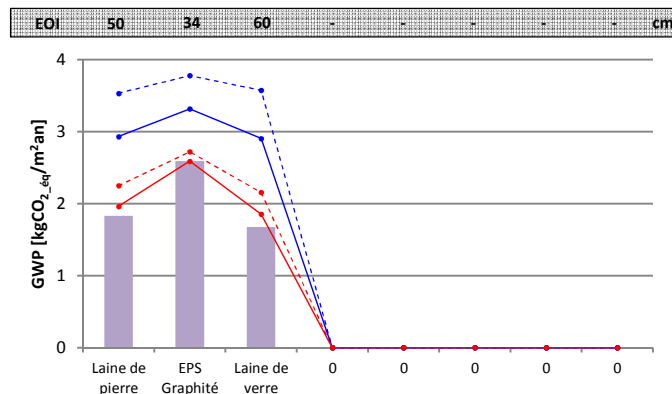
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

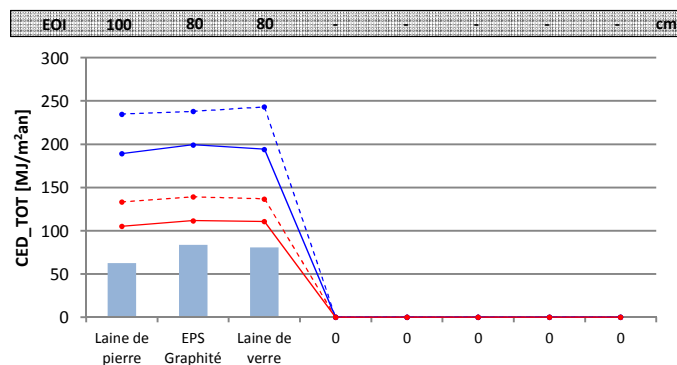
Coût



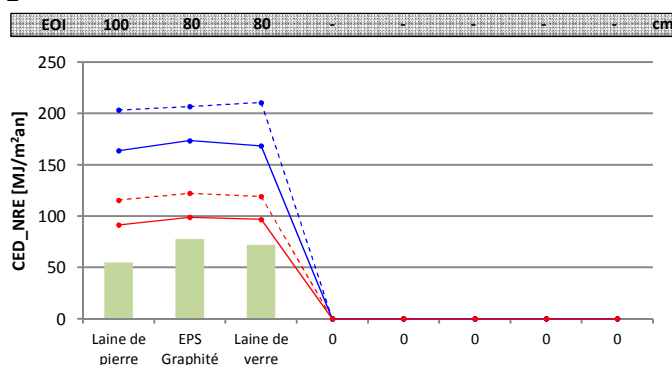
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

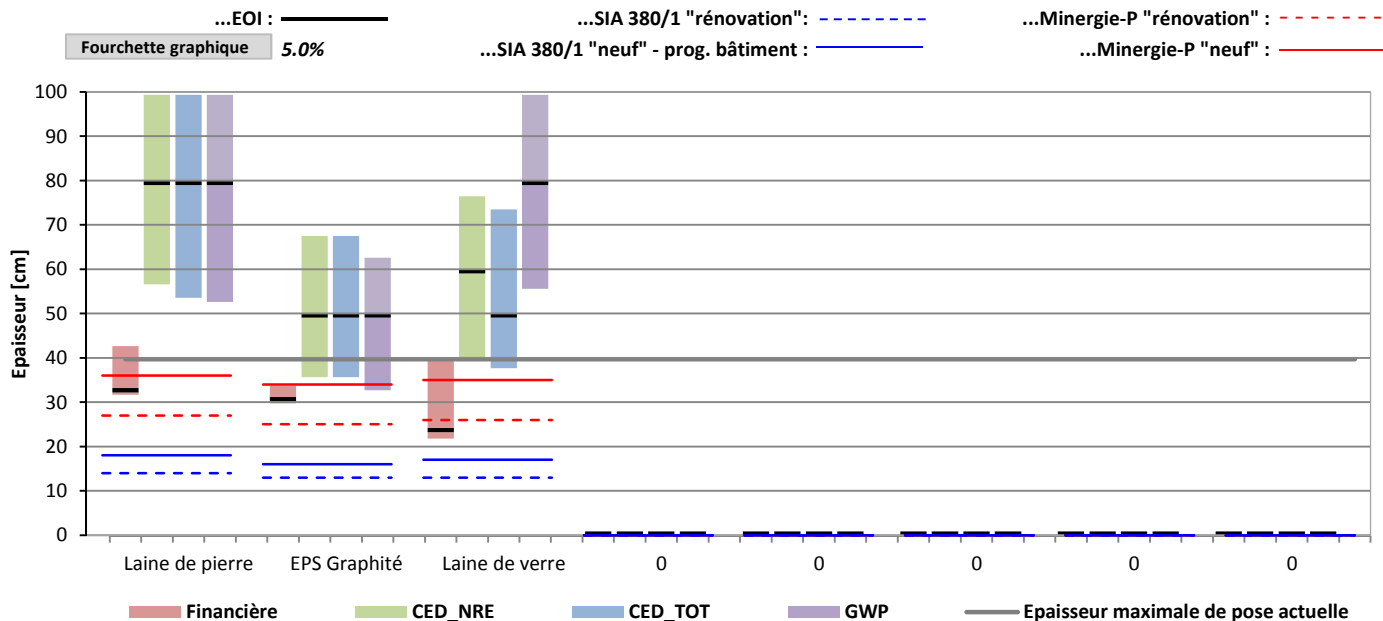
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

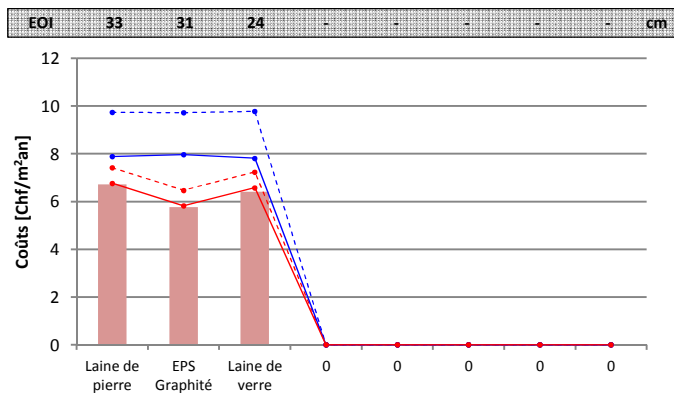
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

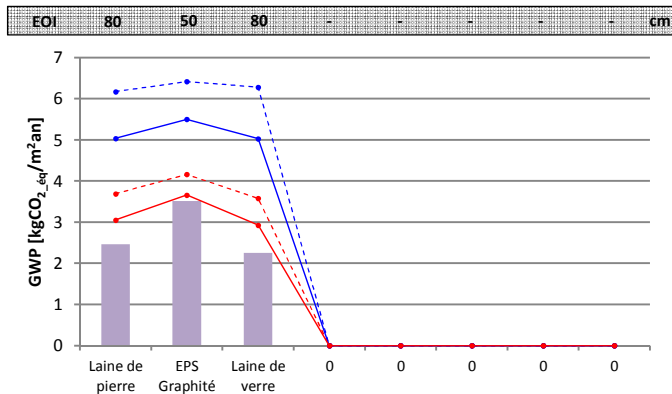
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

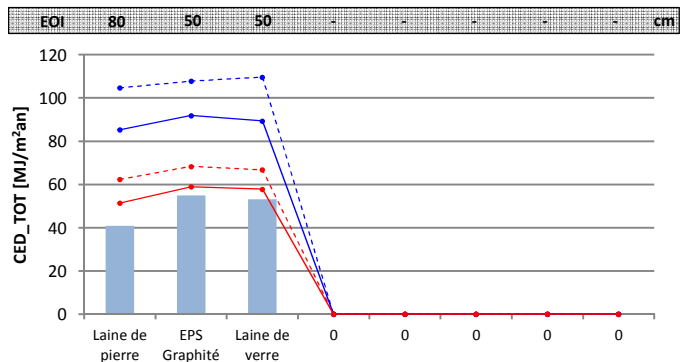
Coût



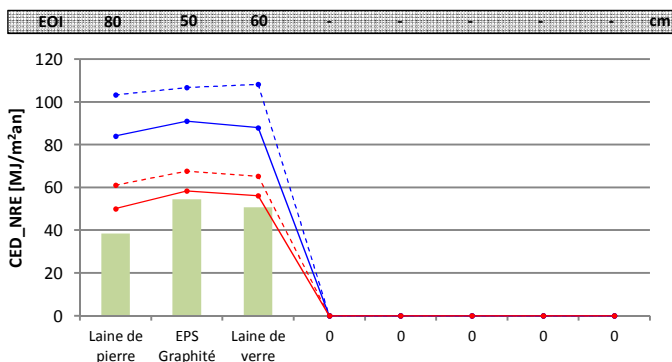
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

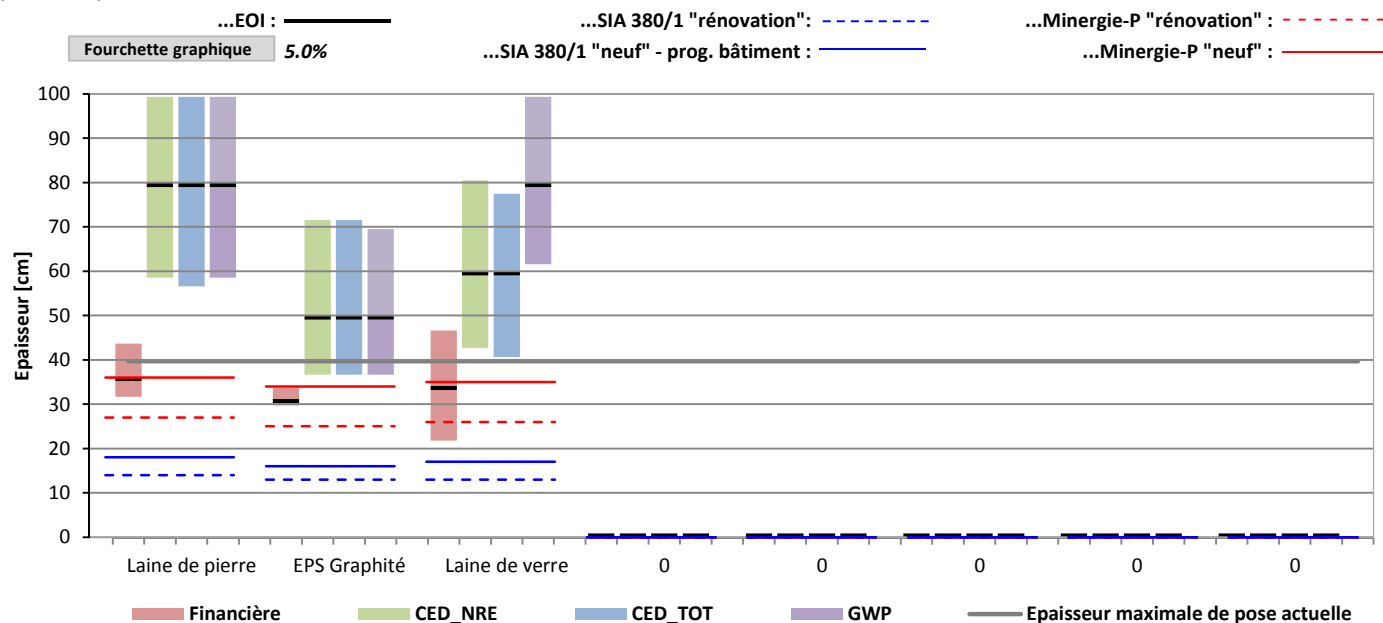
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Mazout</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

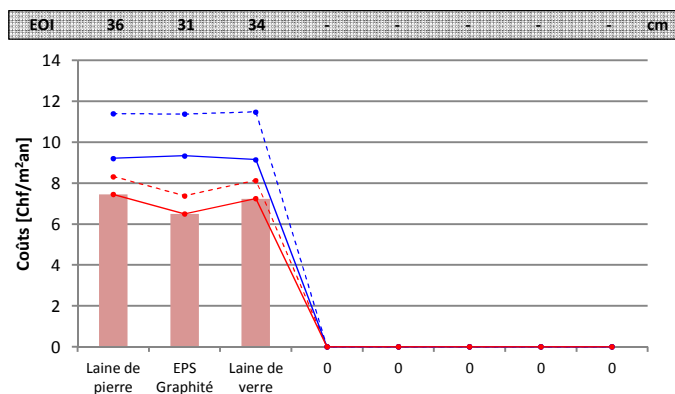
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

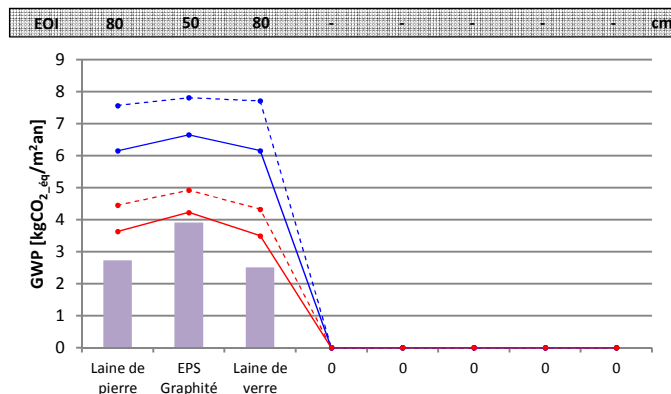
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

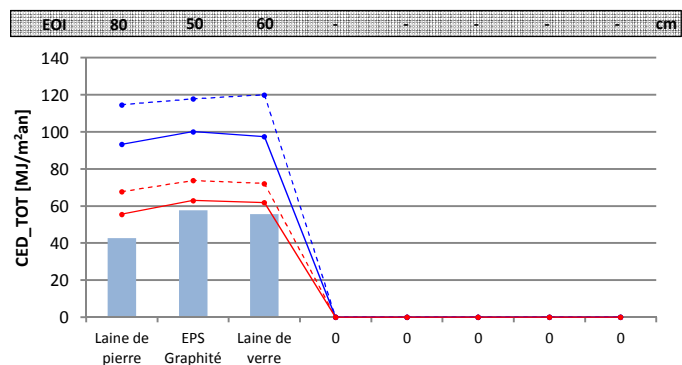
Coût



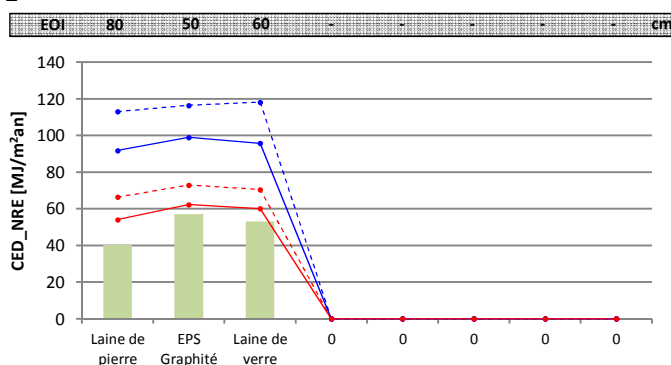
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

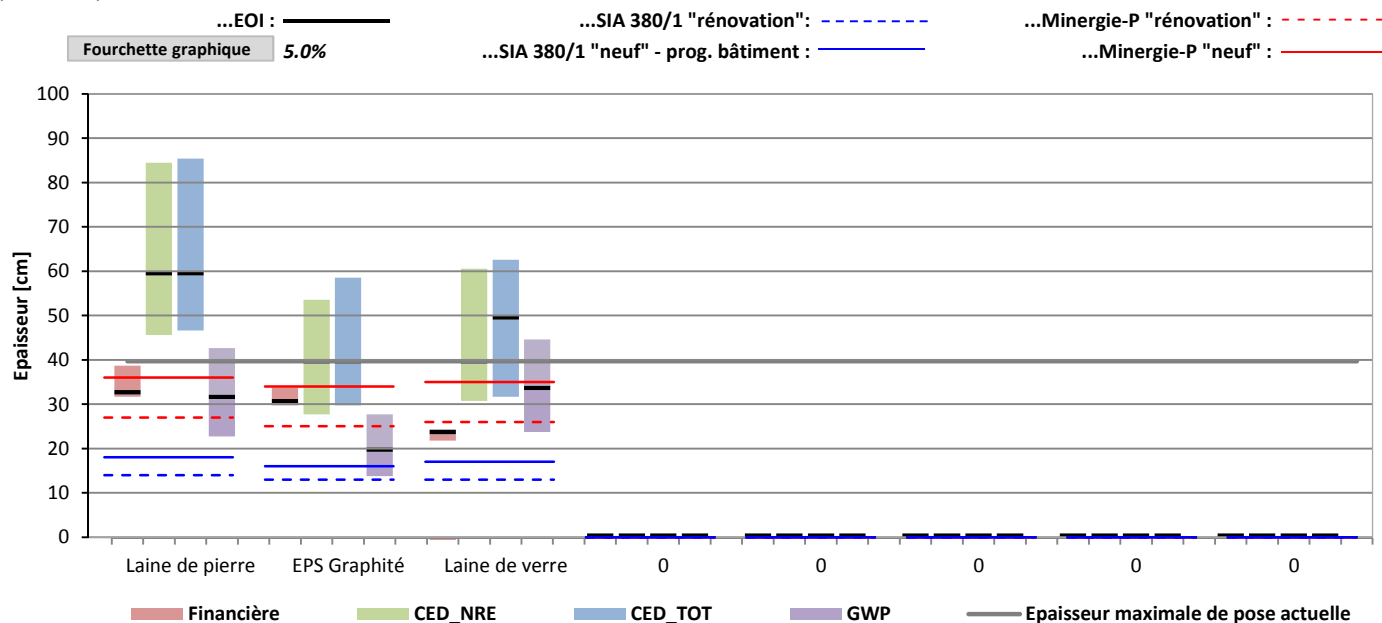
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

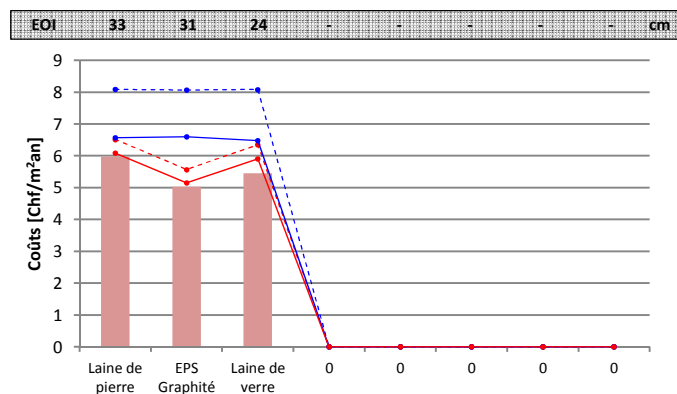
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

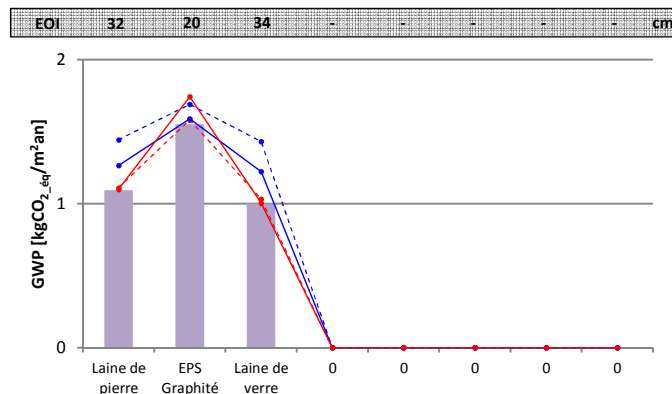
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

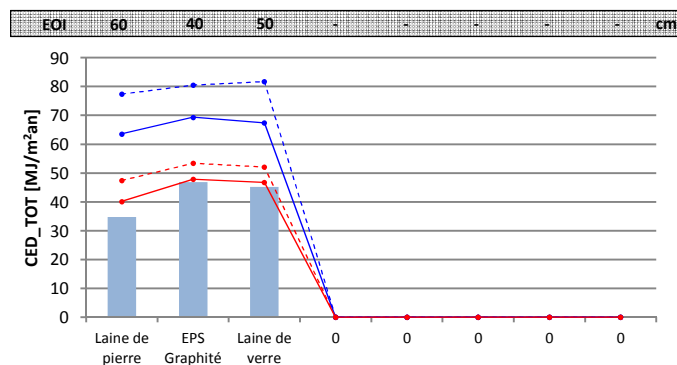
Coût



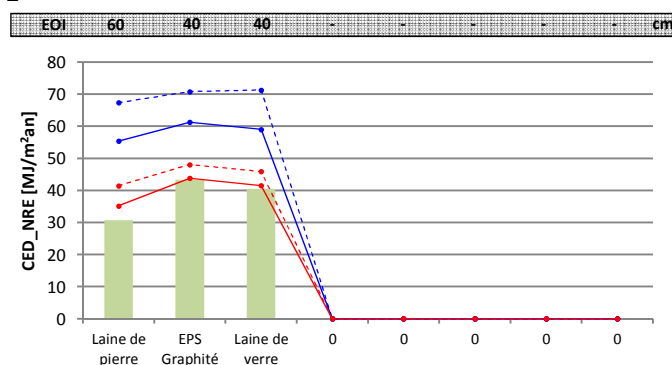
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

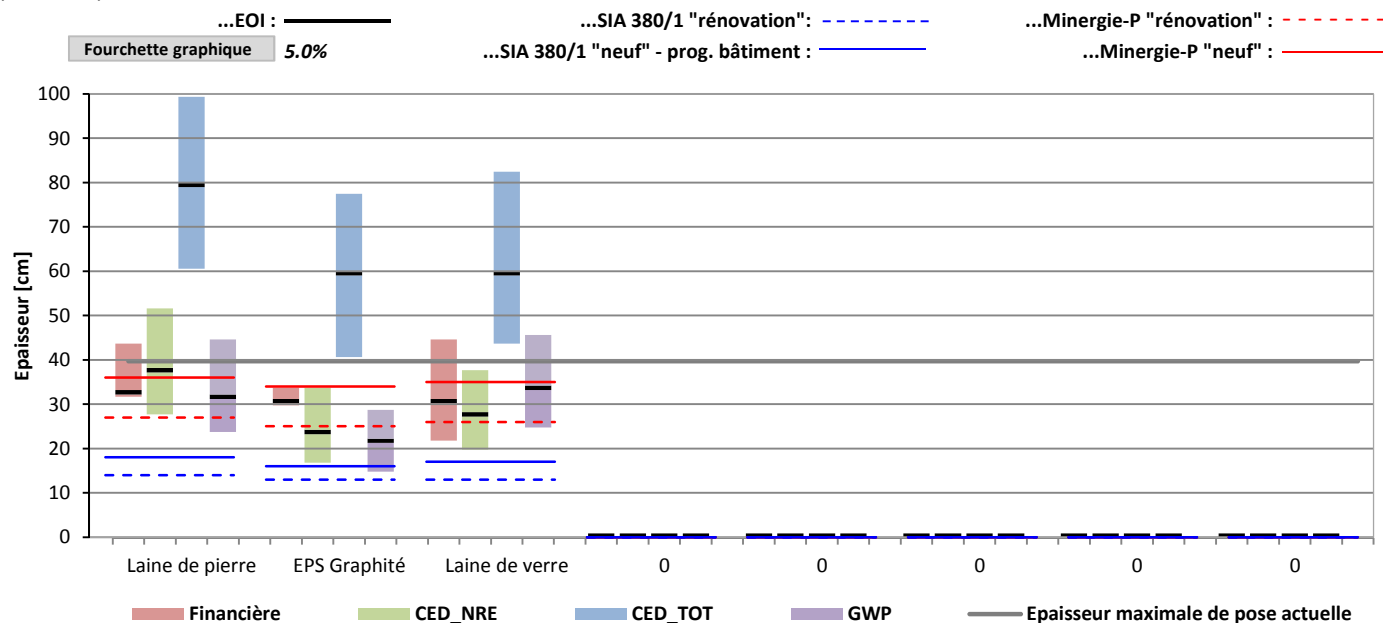
Façade ventilée

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

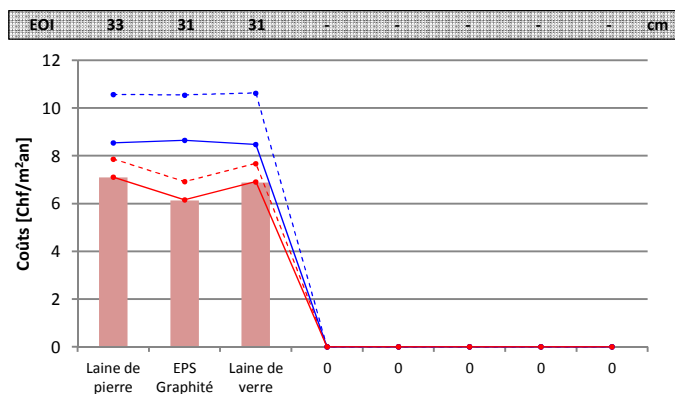
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

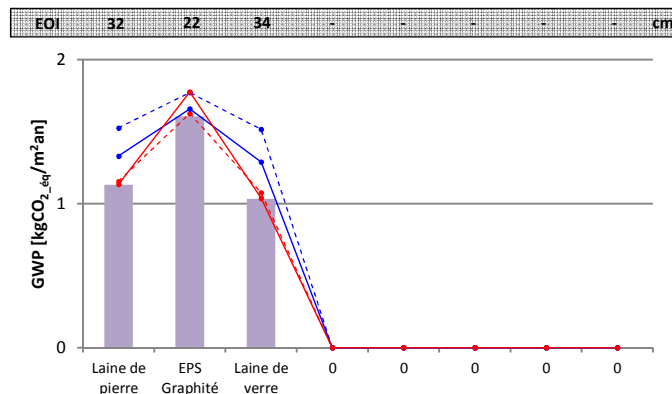
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

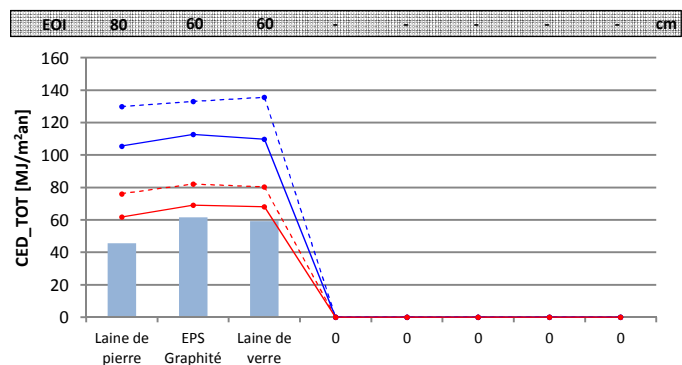
Coût



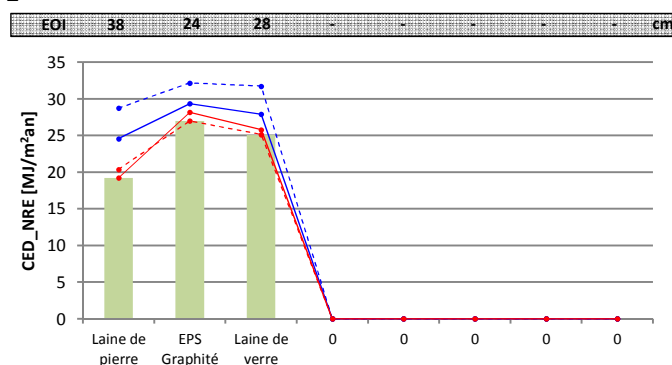
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

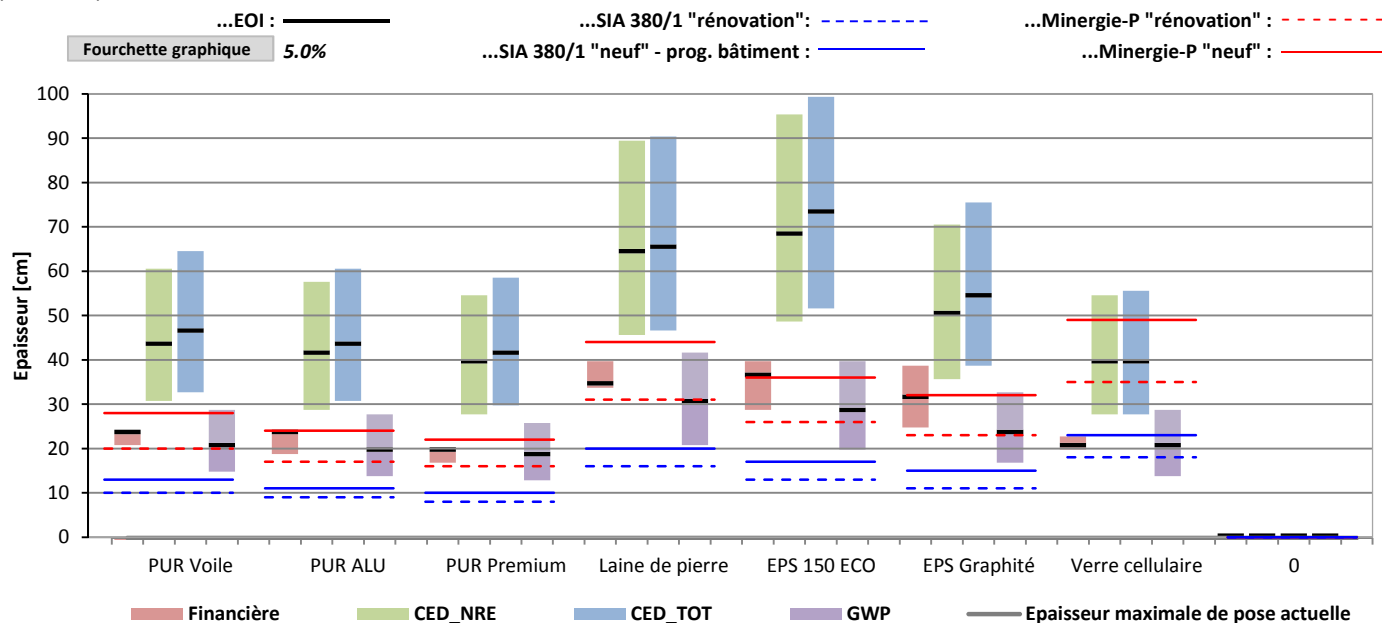
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

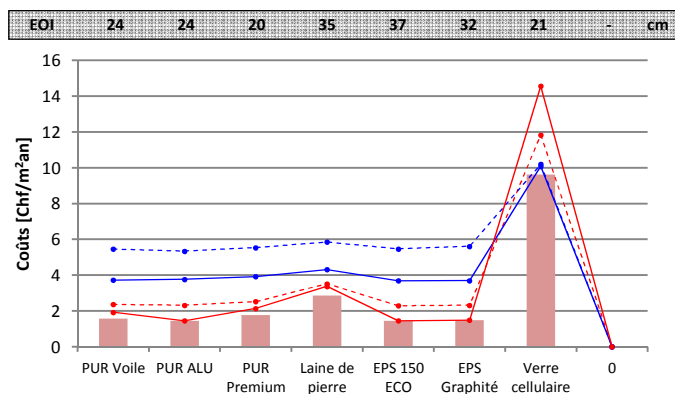
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

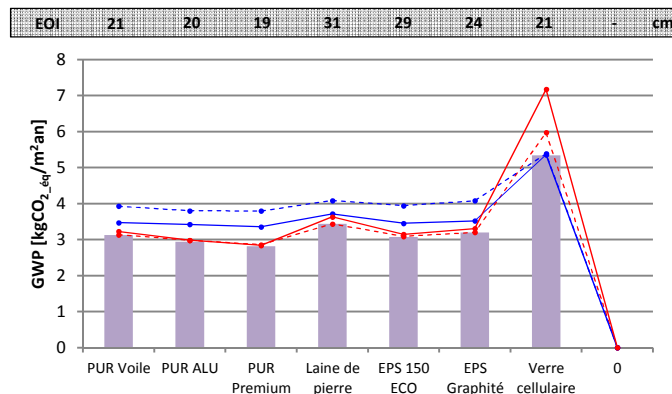
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

...Minergie-P "neuf" : ———

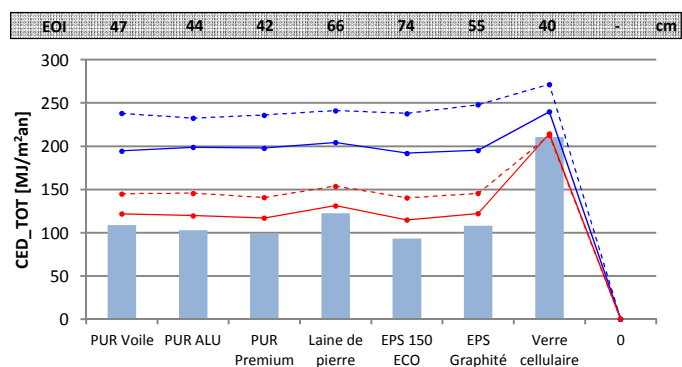
Coût



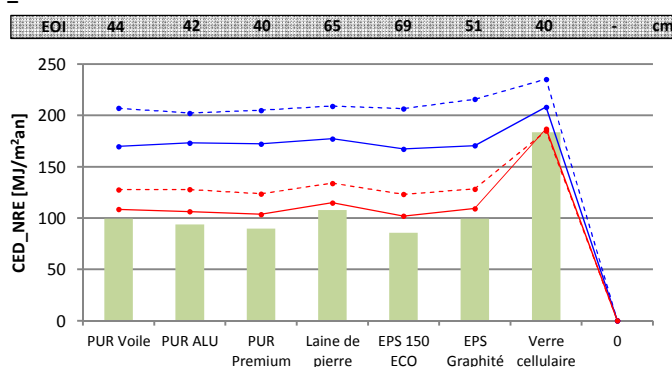
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

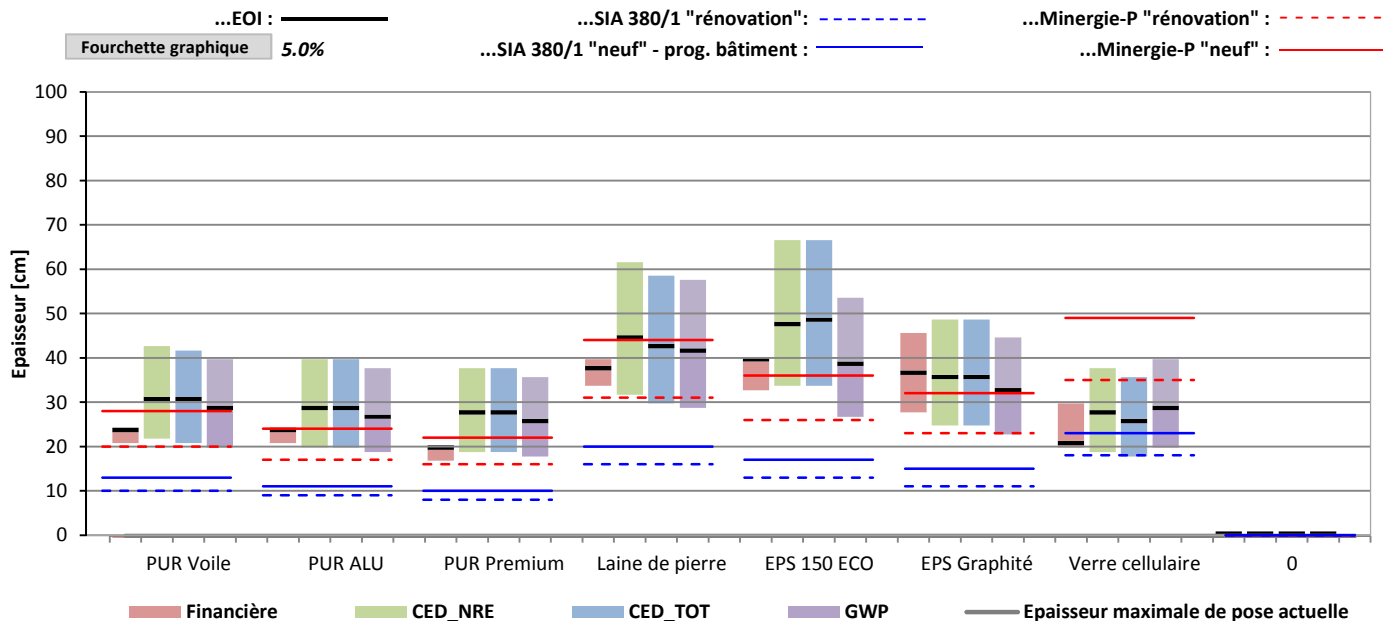
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

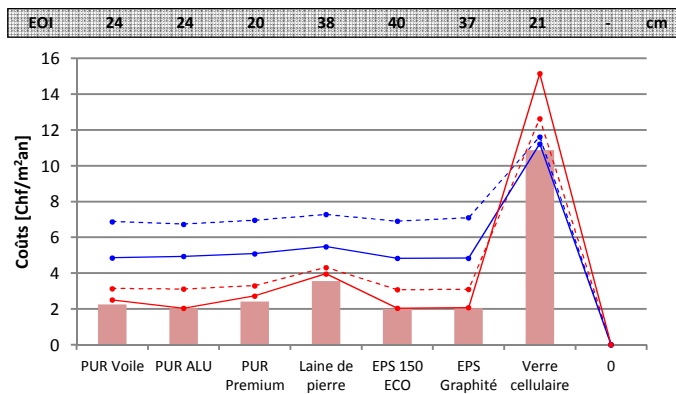
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

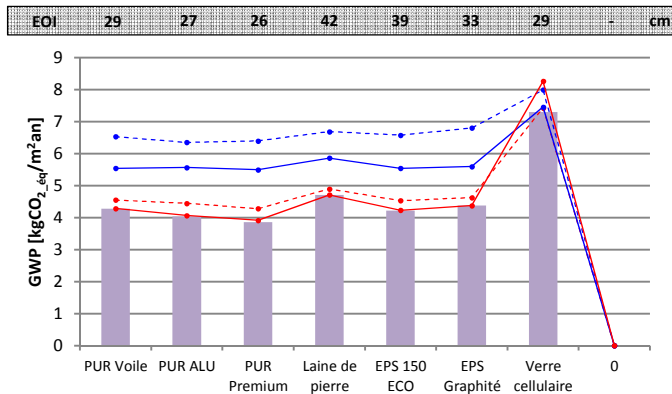
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

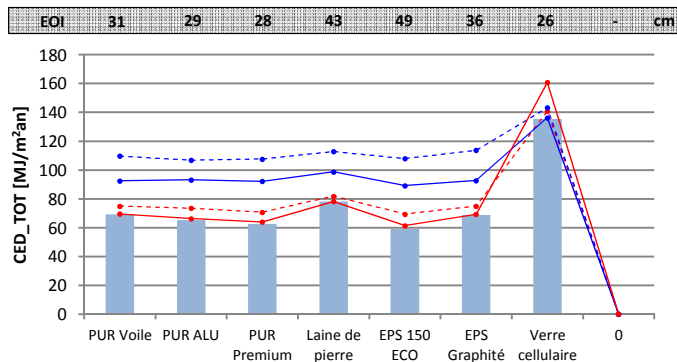
Coût



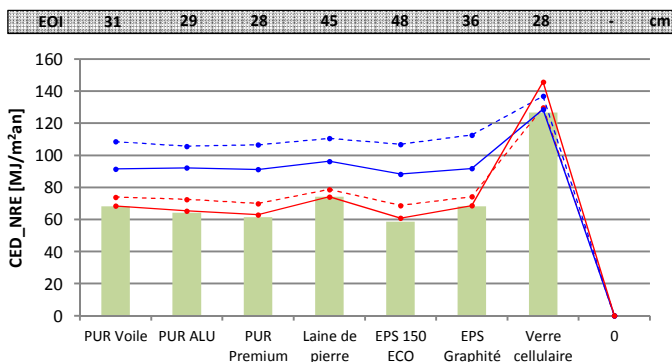
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

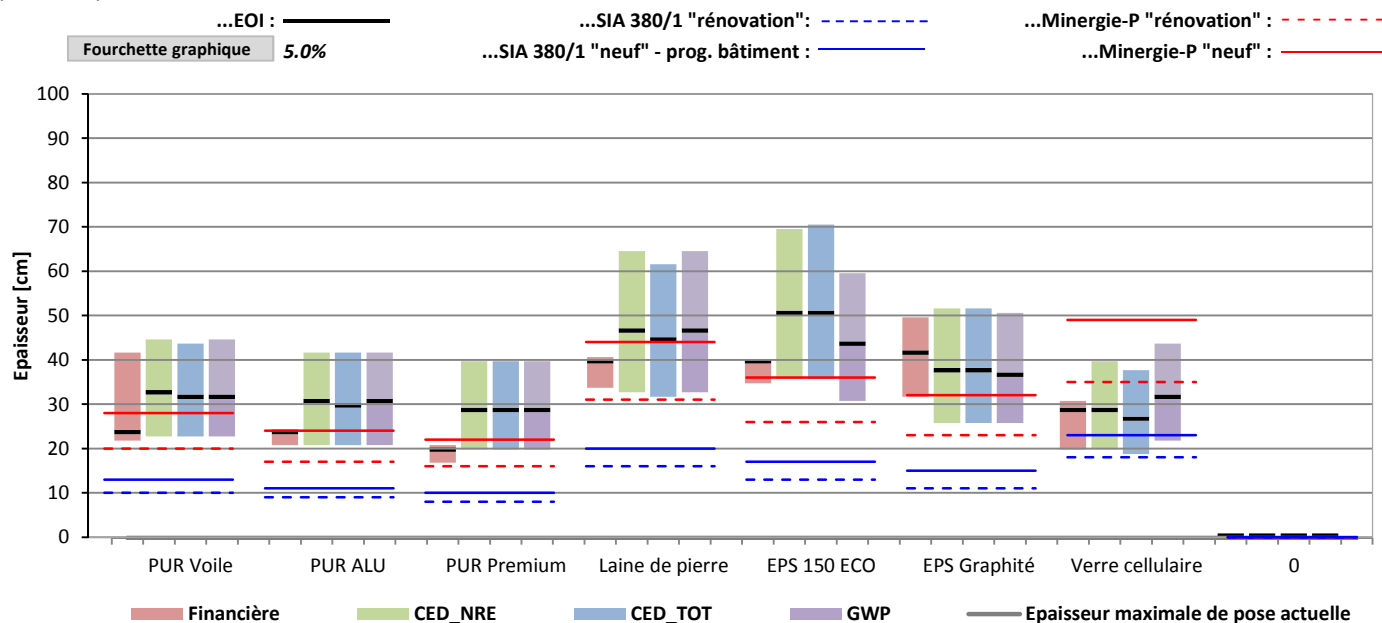
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Mazout</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

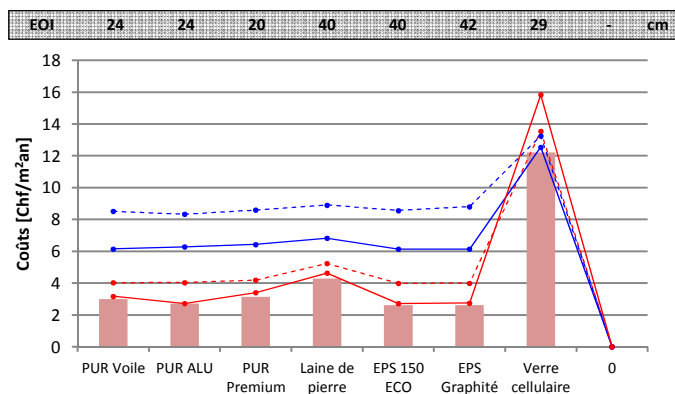
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

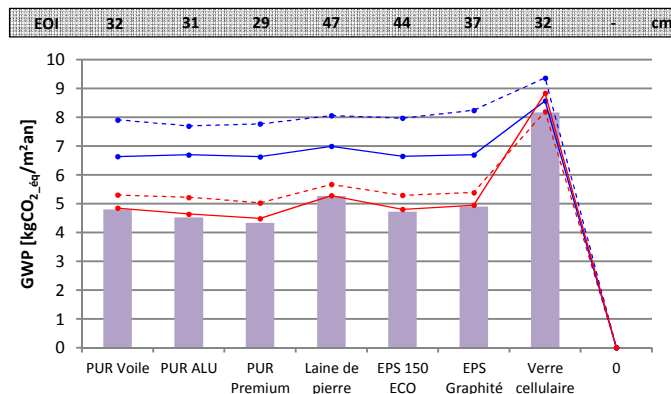
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

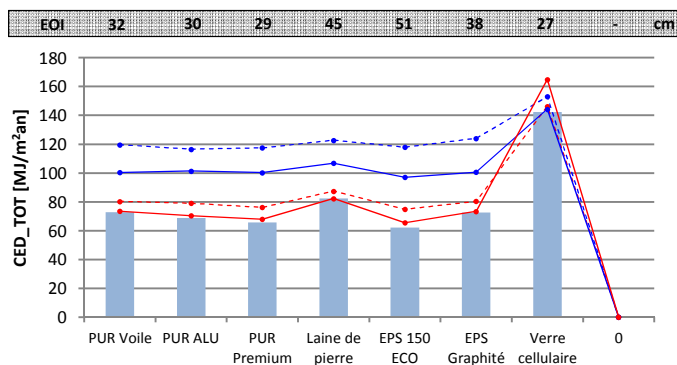
Coût



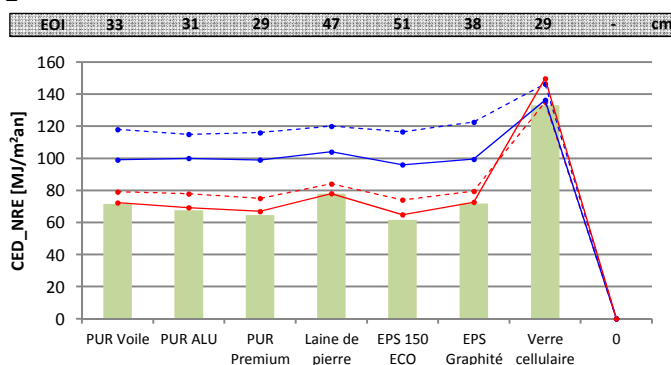
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

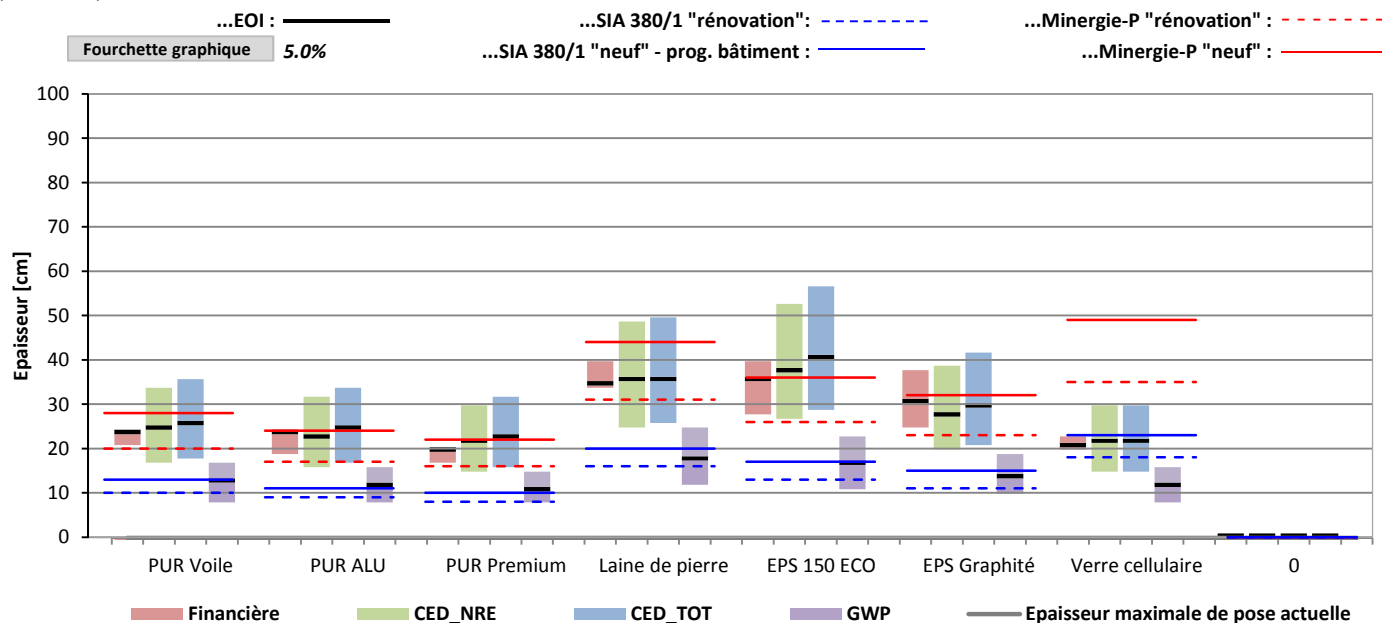
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

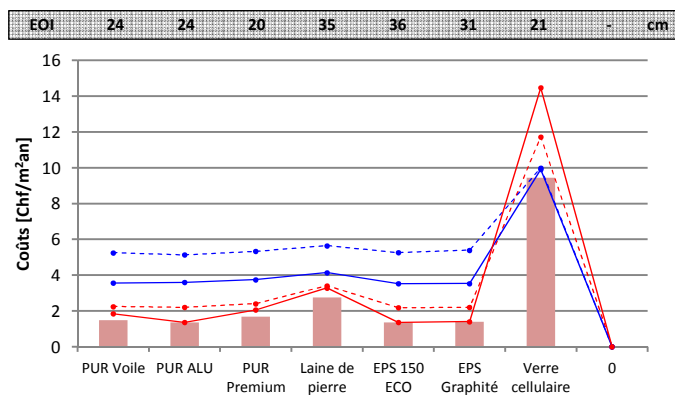
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

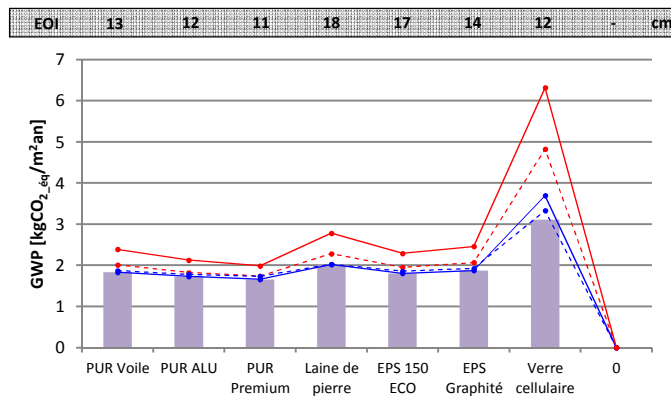
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

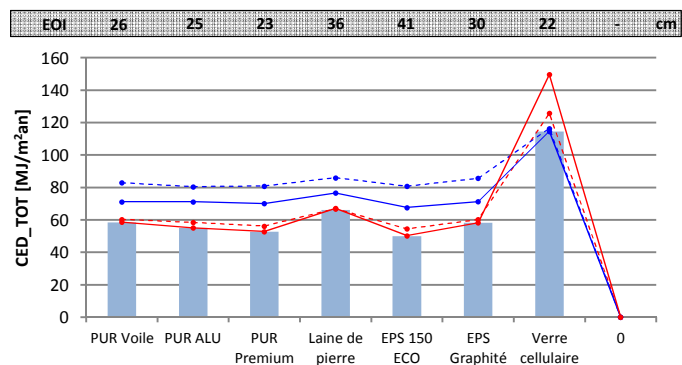
Coût



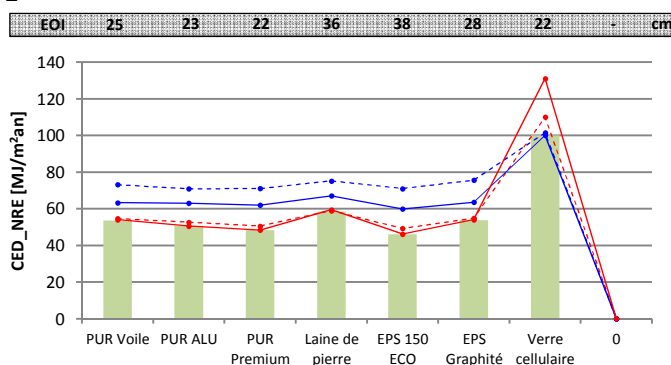
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

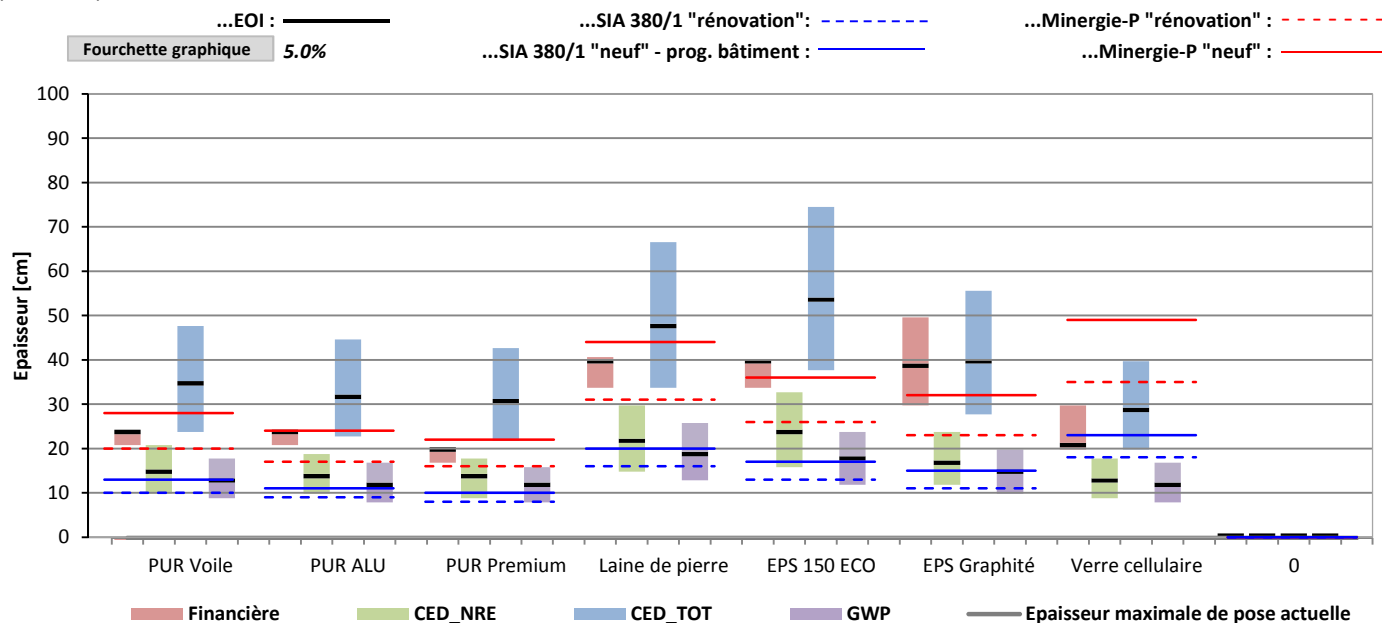
Toiture plate

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Homogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

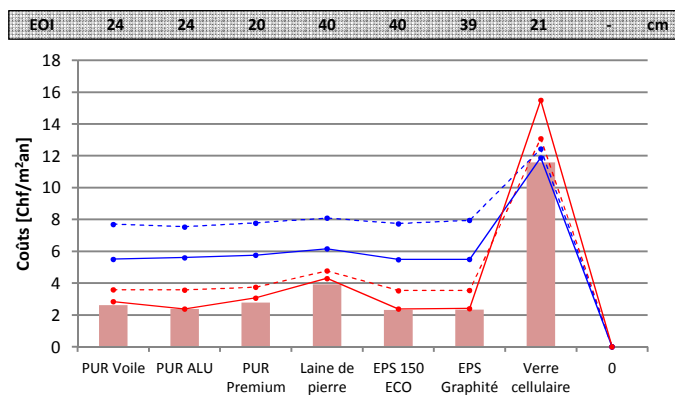
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

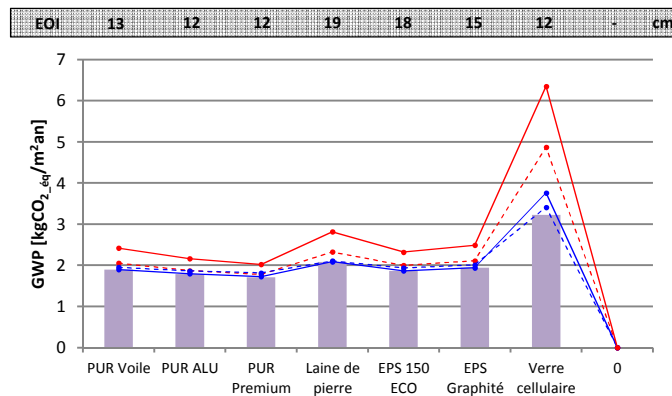
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

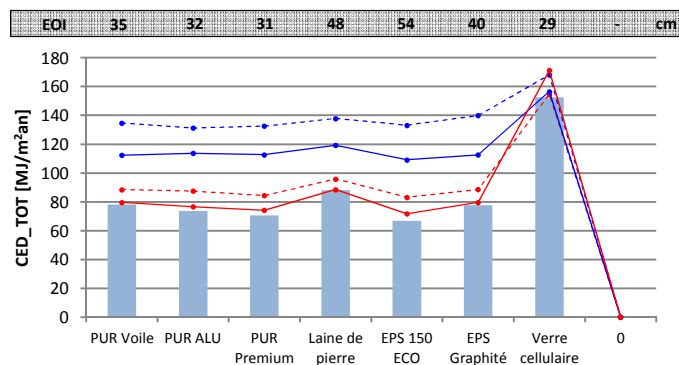
Coût



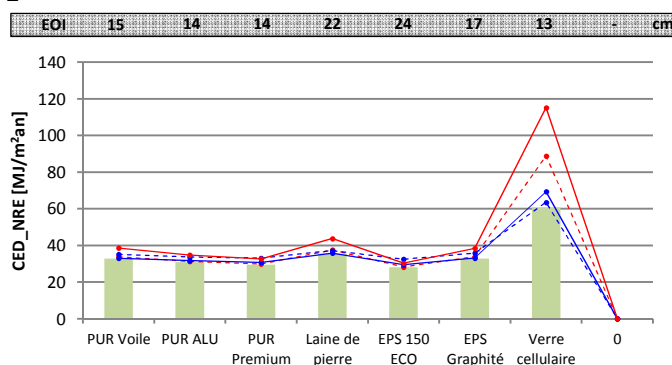
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

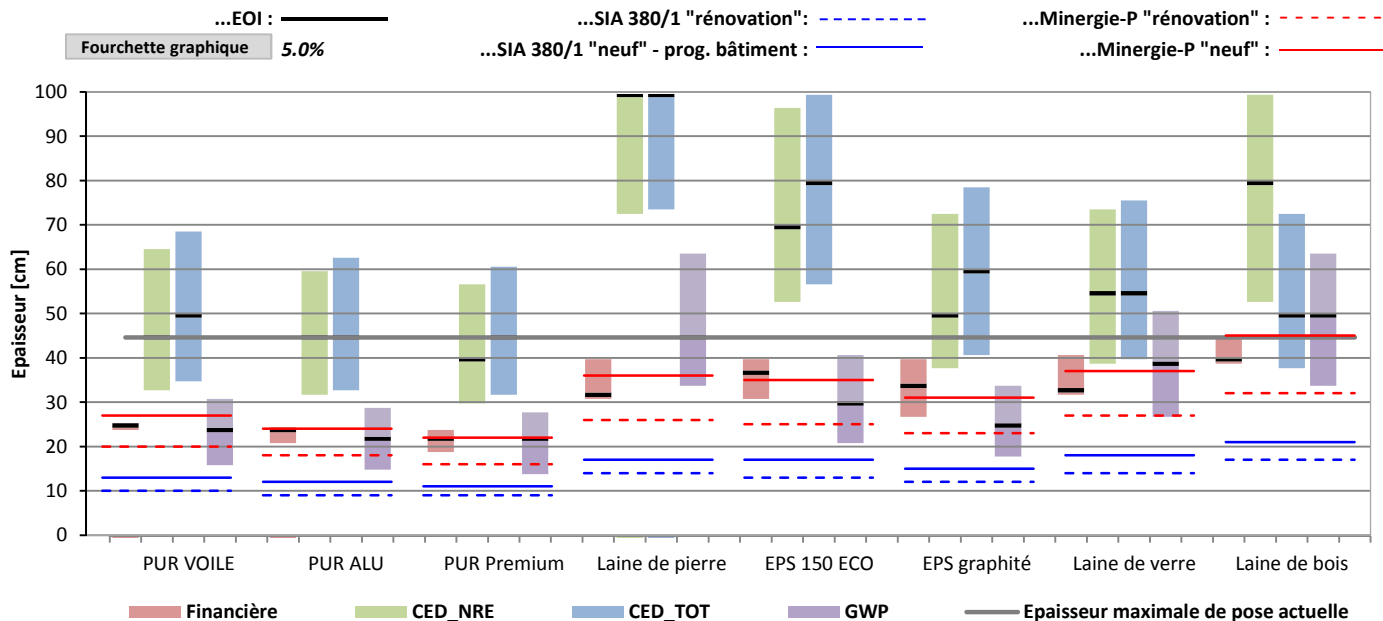
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Électricité</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.22 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Épaisseurs optimales par type d'isolants

Épaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

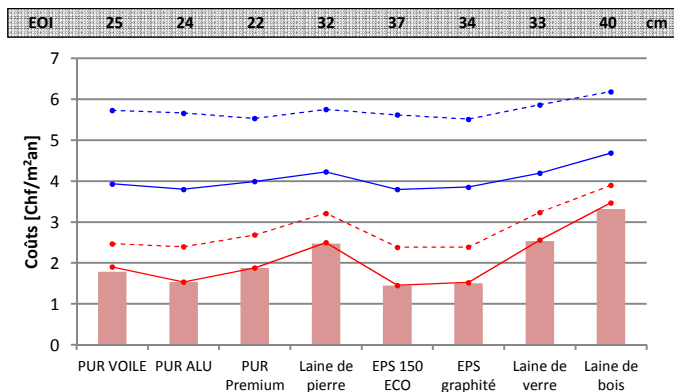
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

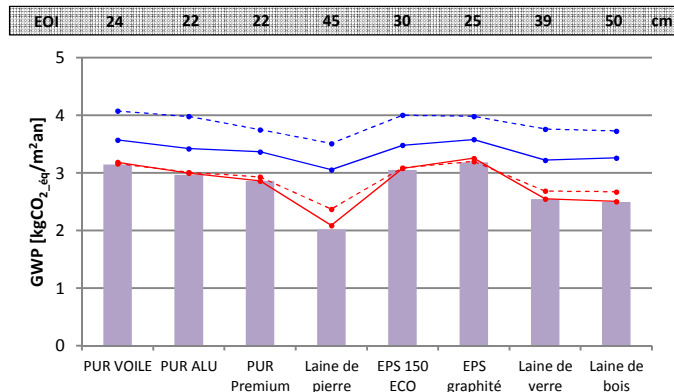
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

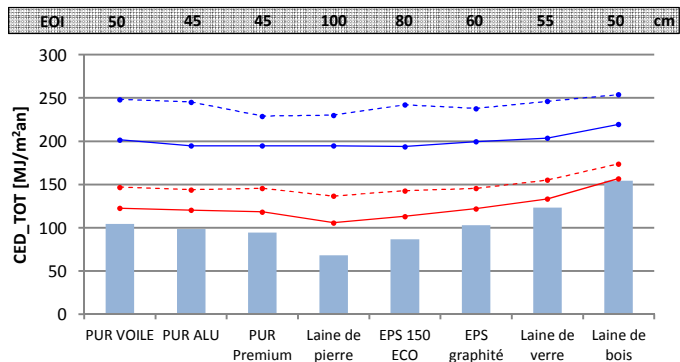
Coût



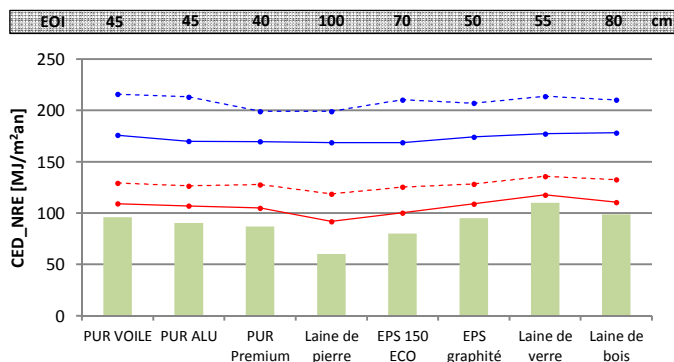
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

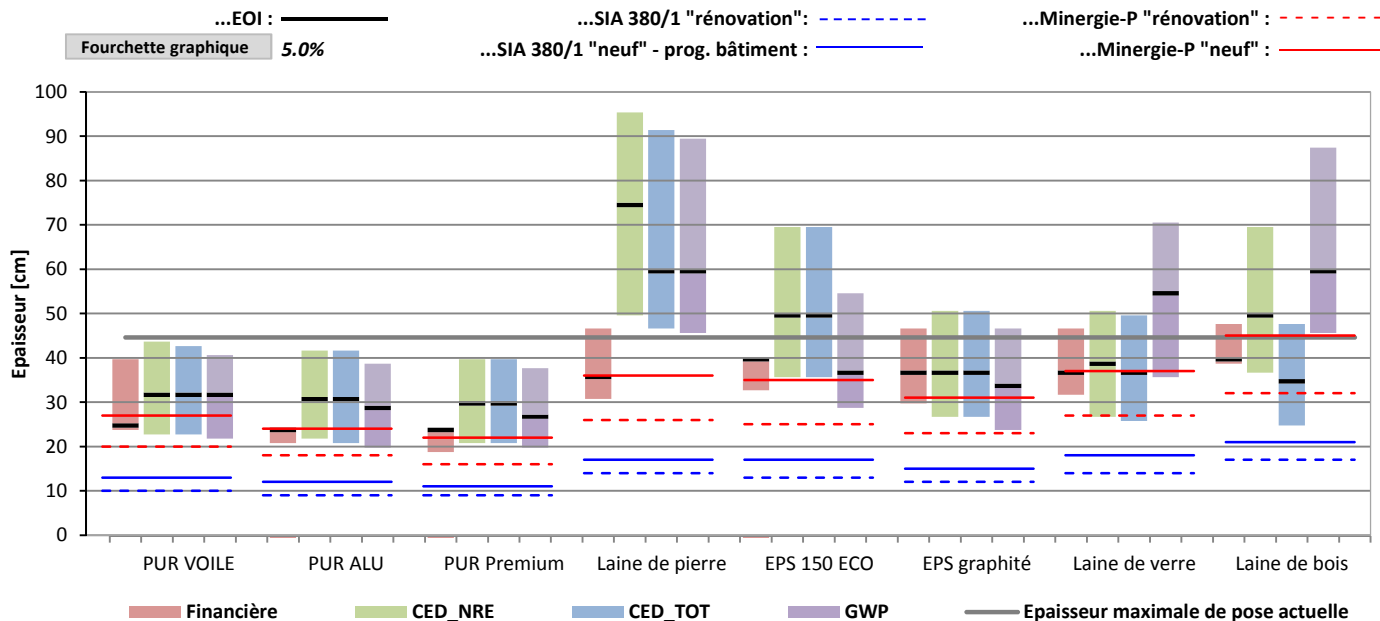
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : Gaz |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.29 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

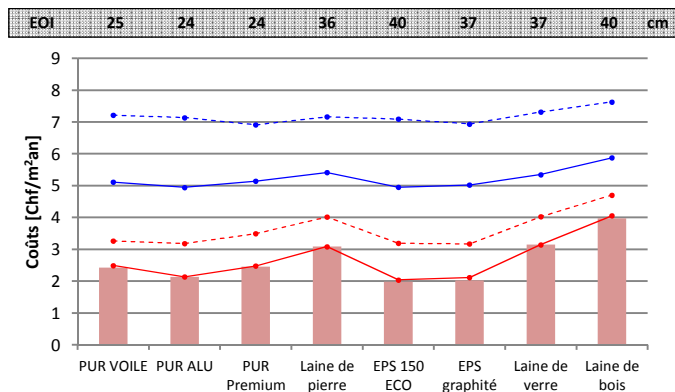
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

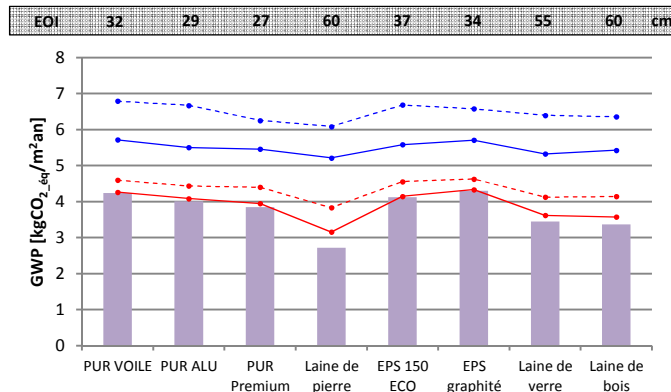
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

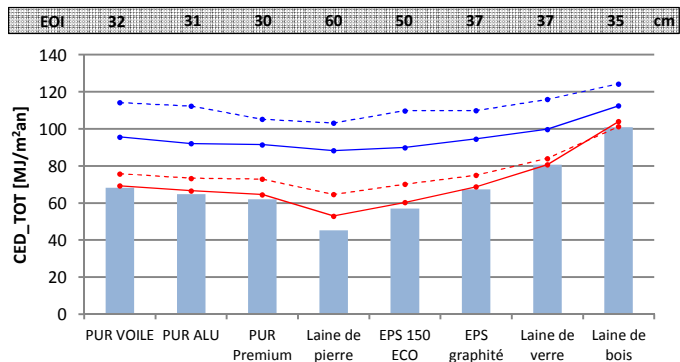
Coût



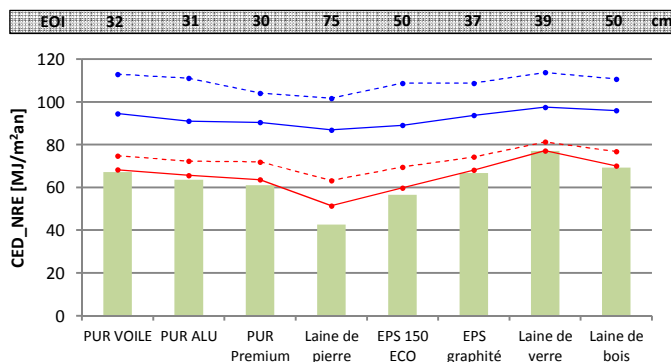
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

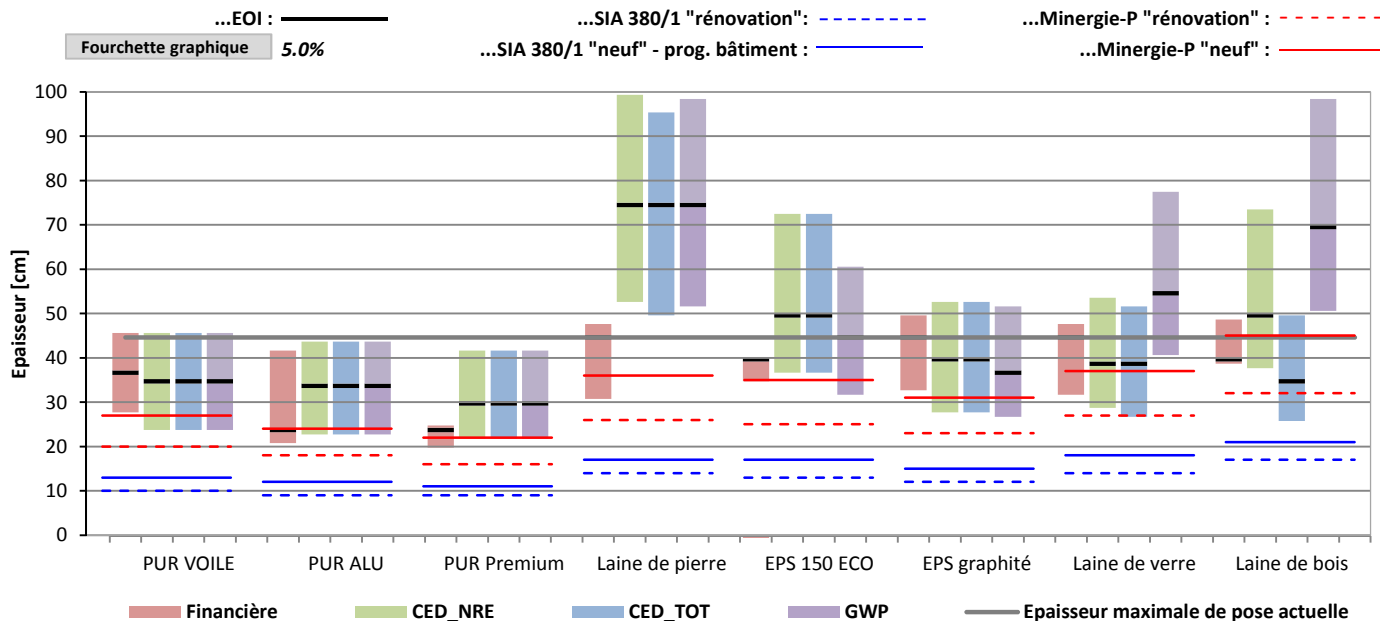
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Mazout</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.37 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

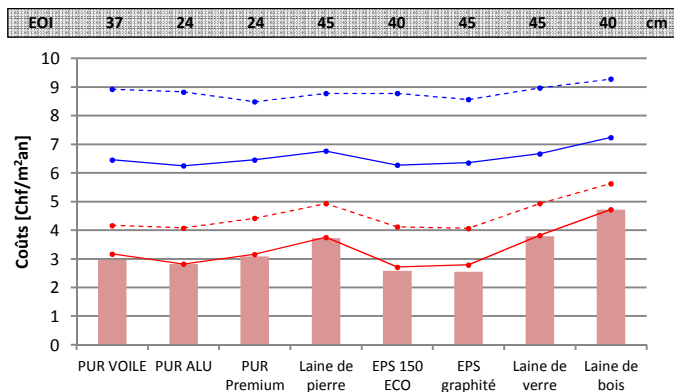
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : ———

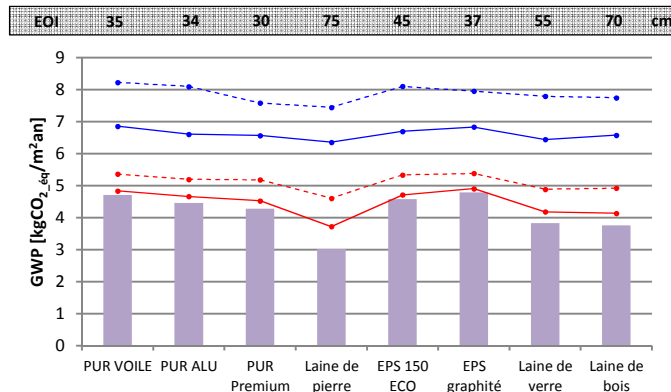
...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "neuf" : ———

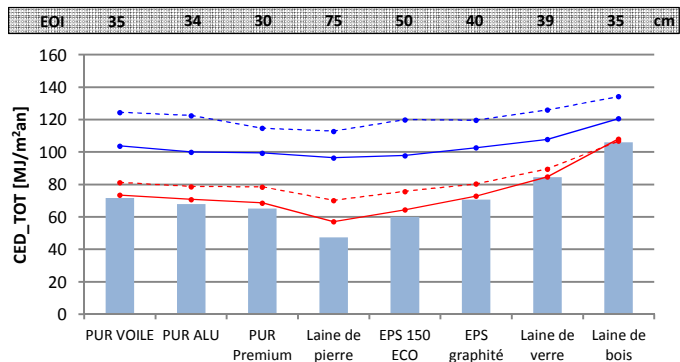
Coût



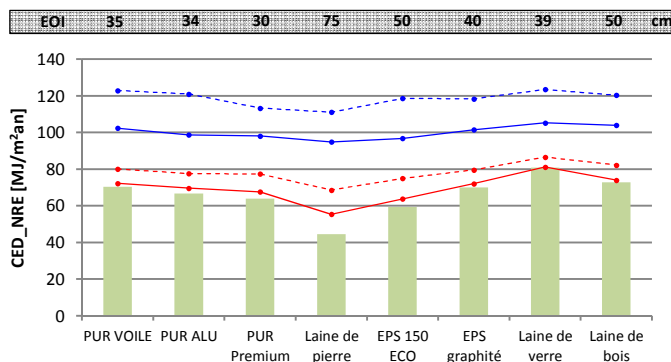
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

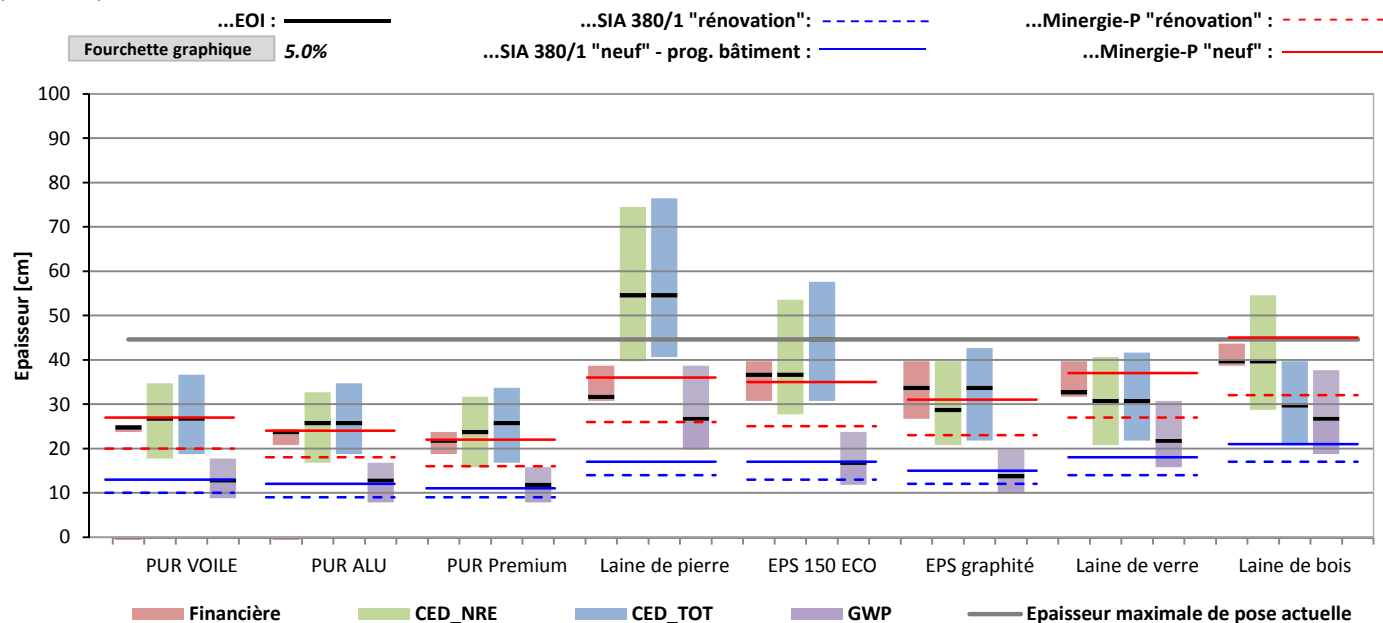
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>PAC AE</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.21 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

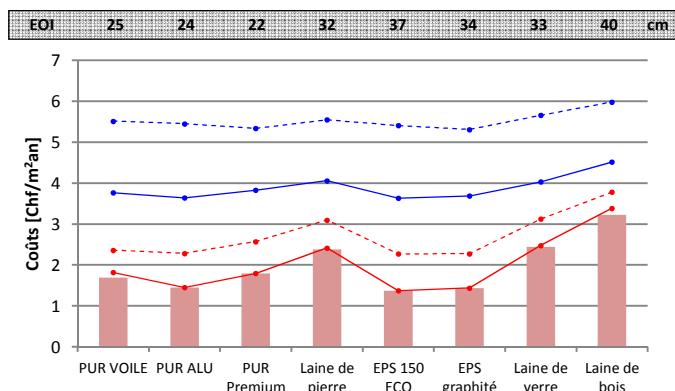
...SIA 380/1 "rénovation" : - - - - -

...Minergie-P "rénovation" : - - - - -

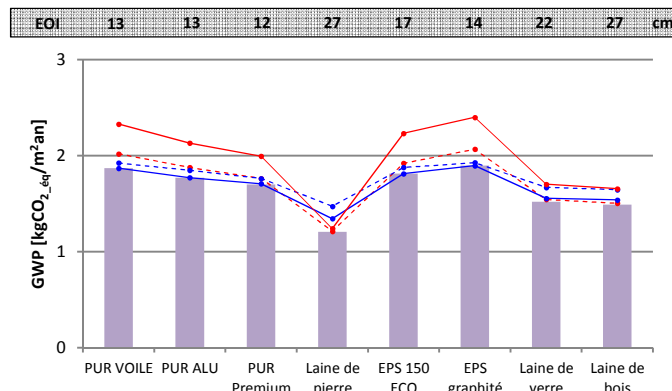
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : —

...Minergie-P "neuf" : —

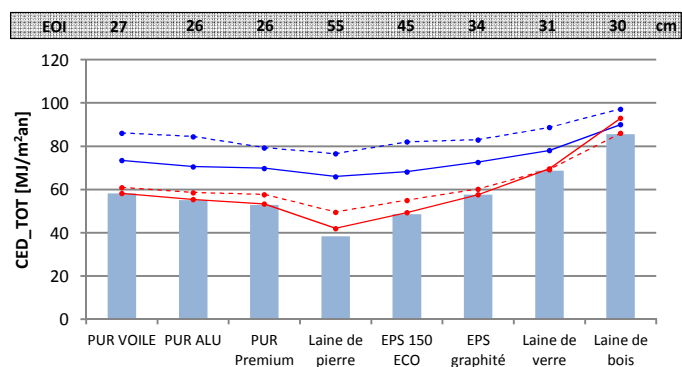
Coût



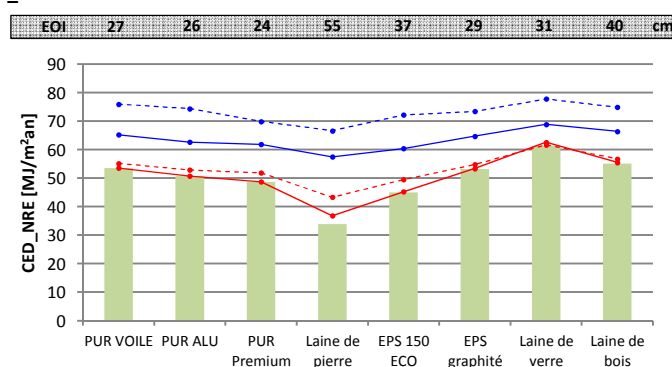
GWP



CED_TOT



CED_NRE



Fiche de résumé par élément

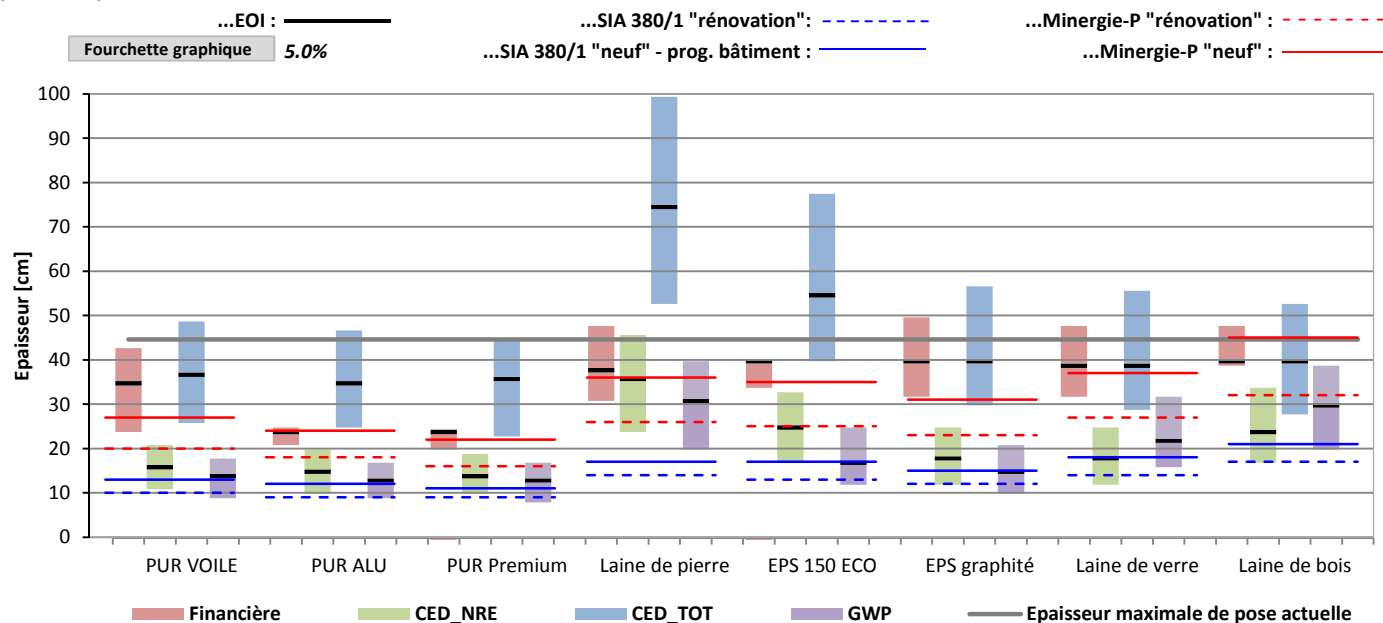
Toiture pente SC

EOI=épaisseur optimale

| | |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Type d'élément : <i>Inhomogène</i> | Vecteur énergétique : <i>Pellets</i> |
| Type de bâtiment : <i>Villa</i> | Coût du vecteur énergétique : <i>0.33 CHF/kWh_utile</i> |
| Climat : <i>Berne</i> | Coefficient κ : <i>0.9</i> |
| Durée de vie de l'élément : <i>30 ans</i> | Prise en compte des subventions : <i>avec subventions</i> |

Epaisseurs optimales par type d'isolants

Epaisseurs pour atteindre... :



Valeurs de l'impact selon l'indicateur pour chaque isolant

Impact à l'EOI :

Valeur d'impact pour ...

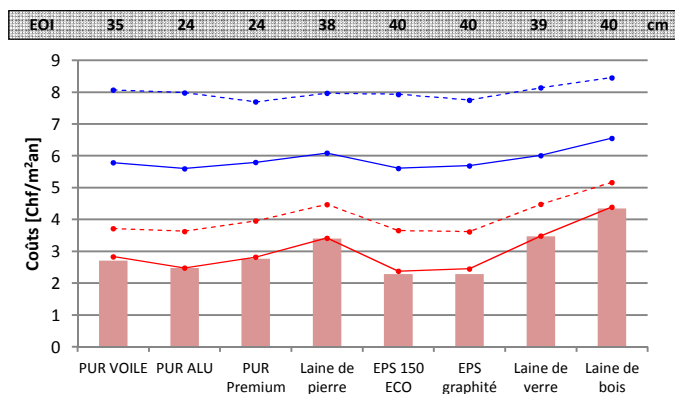
...SIA 380/1 "rénovation" : - - -

...Minergie-P "rénovation" : - - -

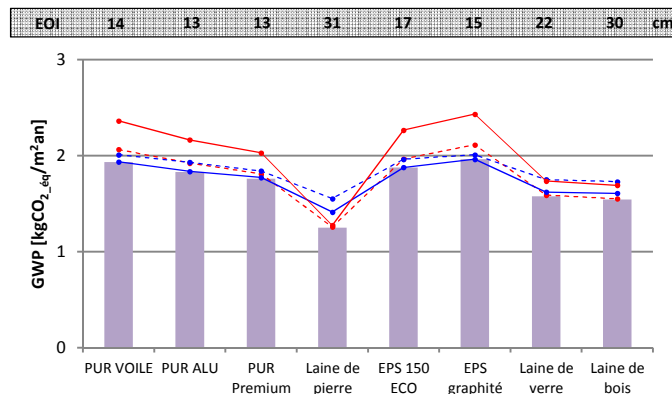
...SIA 380/1 "neuf" - prog. bâtiment : —

...Minergie-P "neuf" : —

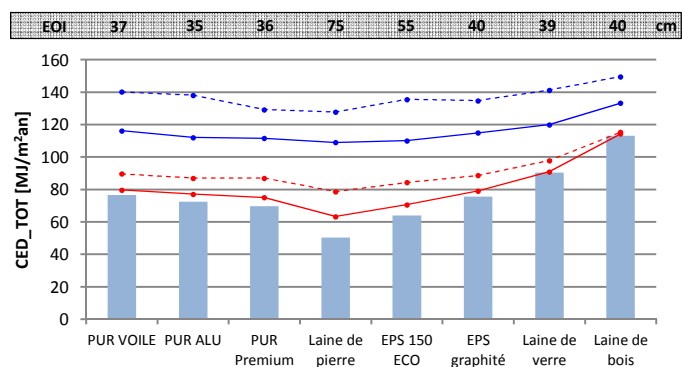
Coût



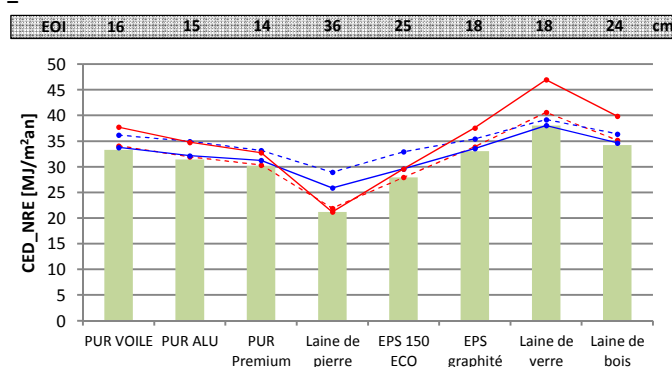
GWP



CED_TOT



CED_NRE





Projet ECO-Reno - Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation

PARTIE D

WP3 : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique

WP 3.1 et 3.2 : Systèmes existants de chauffage électrique et analyse des solutions possibles pour leur substitution

Résumé

Le présent document s'intègre dans le WP 3 du projet ECO-Reno et apporte un éclairage sur les différents systèmes de chauffage électriques fonctionnant actuellement dans une quantité non-négligeable d'habitations. De plus, ce document liste les possibilités de substitution de ces systèmes de chauffage en mettant en avant les contraintes liées à chaque solution de substitution. Finalement, et au travers de l'étude de cas du bâtiment individuel présenté dans le WP 3.3 [1], les différents contraintes liées au bâtiment, à son emplacement, à sa configuration et aux lois et réglementations en vigueur sont mises en avant. Les résultats montrent que les alternatives au remplacement d'un chauffage électrique sont assez limitées.

Abstract

This report is part of the WP3 of the ECO-Reno project and provides an insight on the different electric heating systems currently in use in a substantial number of buildings in Switzerland. In addition, this document presents a list of possible retrofitting options of these heating systems by highlighting the different constraints of each alternative. Finally, by using a case study of a single-family house in the WP3.3 [1], the different constraints linked to the building along with its location, its configuration and existing legislation and regulations, are also described. Results showed that possible alternatives to retrofit the electric heating system are quite limited.

Table des matières

| | |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| RÉSUMÉ | 3 |
| ABSTRACT | 3 |
| LISTE D'ABRÉVIATIONS | 5 |
| LISTE DES FIGURES | 5 |
| LISTE DES GRAPHIQUES | 5 |
| LISTE DES TABLEAUX..... | 5 |
| 1 OBJECTIF DU TRAVAIL..... | 6 |
| 2 LES CHAUFFAGES ÉLECTRIQUES | 6 |
| 3 RÉNOVATION DU CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE : LES SOLUTIONS..... | 9 |
| 3.1 Facteurs de décision liés au bâtiment | 10 |
| 3.1.1 Influence de la localisation du bâtiment | 10 |
| 3.1.2 Influence de la parcelle | 10 |
| 3.1.3 Influence du bâtiment et de son aménagement | 11 |
| 3.1.4 Influence de la surface de toit disponible | 11 |
| 3.1.5 Influence du volume du local technique disponible | 11 |
| 3.2 Facteurs économiques et environnementaux | 13 |
| 4 CONCLUSIONS..... | 15 |
| 5 RÉFÉRENCES | 16 |
| 6 ANNEXE | 17 |

Liste d'abréviations

| | | |
|------|--------------------------------------------|-----|
| COP | Coefficient de performance | [-] |
| COS | Coefficient d'occupation du sol | [-] |
| CUS | Coefficient d'utilisation du sol | [-] |
| ECS | Eau chaude sanitaire | [-] |
| OFSP | Office fédéral de la santé publique | [-] |
| PAC | Pompe à chaleur | [-] |
| SGV | Sonde géothermique | [-] |
| UIOM | Usine d'incinération des ordures ménagères | [-] |

Liste des figures

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Classification des systèmes de chauffage électrique selon le mode de transfert de chaleur et en fonction de l'inertie thermique du système..... | 6 |
| Figure 2 : Comparaison des différents systèmes de chauffage électrique | 8 |
| Figure 3 : Liste des installations techniques possibles de production de chaleur pour le chauffage et l'ECS..... | 9 |
| Figure 4 : Processus de décision pour la sélection d'une installation de chauffage au bois [8] | 12 |
| Figure 5 : Installations techniques envisageables dans le cas du bâtiment analysé..... | 13 |

Liste des graphiques

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graphique 1 : Couplage coûts annualisés et impacts environnementaux (CED _{NRE} et GWP) | 14 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

Liste des tableaux

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Scénarios de rénovation des installations techniques | 13 |
|------------------------------------------------------------------------|----|

1 Objectif du travail

La réalisation des lignes directrices de la stratégie 2050 de la Confédération, via le MoPEC [2] et les réglementations cantonales sur l'énergie, augmentent la pression exercée sur les propriétaires de bâtiments (individuels ou collectifs) utilisant l'électricité comme vecteur énergétique pour la production de chaleur pour le chauffage et/ou pour la préparation de l'eau chaude sanitaire (ECS).

La substitution d'un système de chauffage par des radiateurs électriques pose de nombreuses contraintes techniques en fonction de la localisation du bâtiment (approvisionnement), du bâtiment en lui-même (orientation, place disponible) et de son utilisation par les locataires (taux d'occupation).

Les objectifs de ce rapport sont de présenter et de comparer les différents systèmes de chauffage à électricité directe existants sur le marché ainsi que les solutions possibles de rénovation de ces systèmes de chauffage. Pour ce deuxième objectif, un bâtiment est utilisé comme base de réflexion et permet de comparer différentes solutions de rénovations. Ces variantes seront évaluées selon des critères techniques, environnementaux et économiques.

L'étude de cas du bâtiment individuel, étudiée dans le cadre du WP 3 – Etude de cas habitat individuel [1], est utilisée pour évaluer les différents systèmes d'installations techniques. Pour rappel, cet habitat est situé dans le village des Sciernes d'Albeuve dans le canton de Fribourg (altitude 902 mètres). Il est considéré que l'enveloppe thermique du bâtiment n'est pas rénovée. Le besoin de chaleur utile pour le chauffage, selon la norme SIA 380/1 en mode justificatif, est de 31'433 [kWh/an] (valeur 637.5 [MJ/m²]).

2 Les chauffages électriques

L'objectif de ce chapitre est de faire un état des lieux des systèmes de chauffages électriques disponibles et de les comparer entre eux.

En introduction, la figure 1 présente une vue schématique des systèmes de chauffage électrique évalué dans le cadre de ce projet. Cette arborescence est basée sur le mode de transfert de chaleur et l'inertie des systèmes.

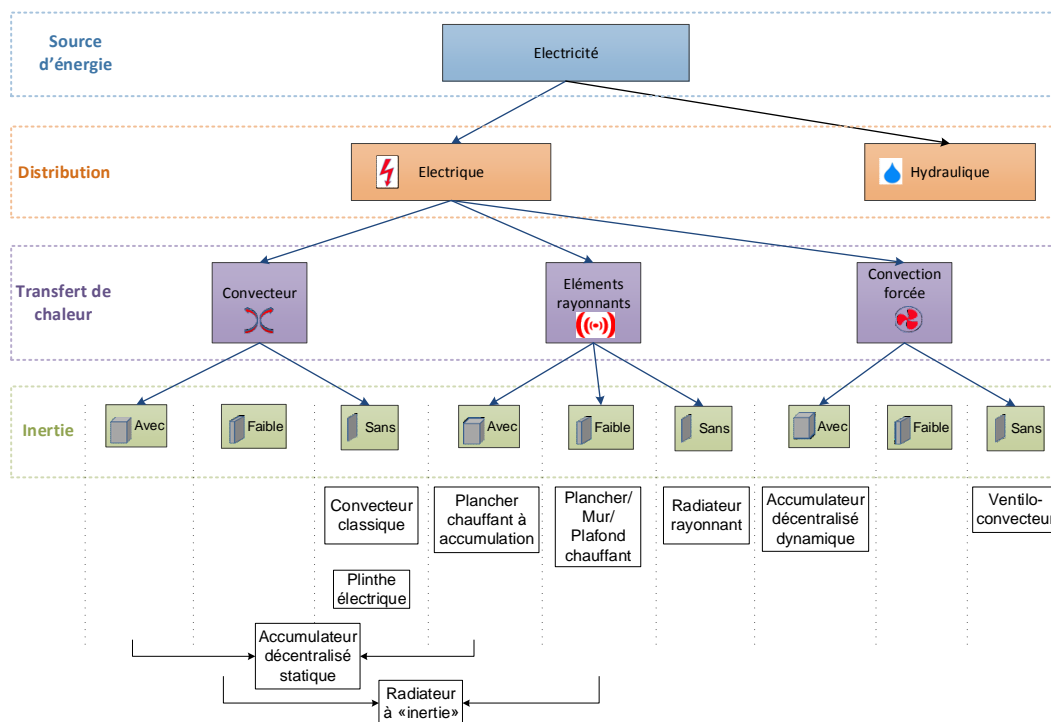


Figure 1 : Classification des systèmes de chauffage électrique selon le mode de transfert de chaleur et en fonction de l'inertie thermique du système

L'évaluation des avantages et inconvénients se base sur dix critères répartis en trois catégories :

- a. Confort (critères 1 à 6; "C"),
- b. Economique (7 à 9; "Ec"),
- c. Environnemental (10; "En").

Chacun de ces critères a été évalué pour chaque type de chauffage électrique en fonction du type de construction (neuve ou rénovation).

De plus, pour chaque type de chauffage électrique, des pictogrammes ont été ajoutés afin de préciser deux caractéristiques importantes des systèmes, à savoir le mode de transmission de chaleur et la capacité thermique des émetteurs.

Il est à signaler que le rayonnement non-ionisant¹ ne semble pas être un critère de choix pour le chauffage électrique. Selon les informations disponibles sur le site internet de l'Office Fédéral de la Santé Publique (OFSP), les valeurs de champs magnétiques à basse fréquence des radiateurs électriques sont largement inférieures à la valeur limite². Un risque sur la santé n'étant pas à exclure malgré tout, les recommandations de l'OFSP sont reprises dans les fiches de synthèse par types de chauffage électrique (cf. annexe 1).

¹ Rayonnement non-ionisant (RNI) : Appelé également électro-smog, il représente le rayonnement des ondes électromagnétiques qui n'ont pas une énergie suffisante pour transformer les atomes en ions.

² <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/index.html?lang=fr>

| Types | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | | 6.1a | | 6.1b | | 6.2 | | 6.3 | | 7.1 | | 7.2 | | 8 | |
|-------|--------------------------------------------------|----------------------|---|--------------------|---|-----------------------|---|--------------------|---|-----------------------------|---|--------------------|---|-----------------------------------|---|---------------|---|-------------------|---|-------------------------------------|---|--------------------------------------|---|----------------------------------------|---|
| | | Convecteur classique | | Plinthe électrique | | Radiateur à "inertie" | | Ventilo-convecteur | | Panneau rayonnant / radiant | | Plancher chauffant | | Plancher chauffant à accumulation | | Mur chauffant | | Plafond chauffant | | Accumulation décentralisée statique | | Accumulation décentralisée dynamique | | Hydraulique centralisée à accumultaion | |
| | | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R | N | R |
| C. | 1. Souplesse de régulation et temps de réaction* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 2. Encombrement au sol | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 3. Encombrement en hauteur | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 4. Chaleur dégagée uniformément | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 5. Qualité de l'air (humidité relative) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6. Acoustique | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ec. | 7. Frais d'entretien** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 8. Tarif de l'électricité (jour/nuit) *** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| En. | 9. Remplacement**** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 10. Substitution (source énergétique) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Non applicable

Bon

Moyen

Mauvais

Convection

Rayonnement

Convection forcée

Transmission de chaleur majoritaire par:

Capacité thermique des émetteurs

Autres

Sans inertie

Faible inertie

Forte inertie

Distribution hydraulique centralisée de la chaleur

C. : critère de Confort
 Ec.: critère Economique
 En.: critère Environnemental
 N: Construction neuve
 R: Rénovation

* Vitesse à laquelle le local pourra être chauffé
 ** Frais provenant d'un contrat d'entretien pour le nettoyage et le suivi de l'installation
 *** Système pouvant bénéficier du tarif d'électricité avantageux de nuit
 **** Facilité de remplacement du système électrique par un autre système électrique

Figure 2 : Comparaison des différents systèmes de chauffage électrique

Plusieurs points ressortent de la figure 2 :

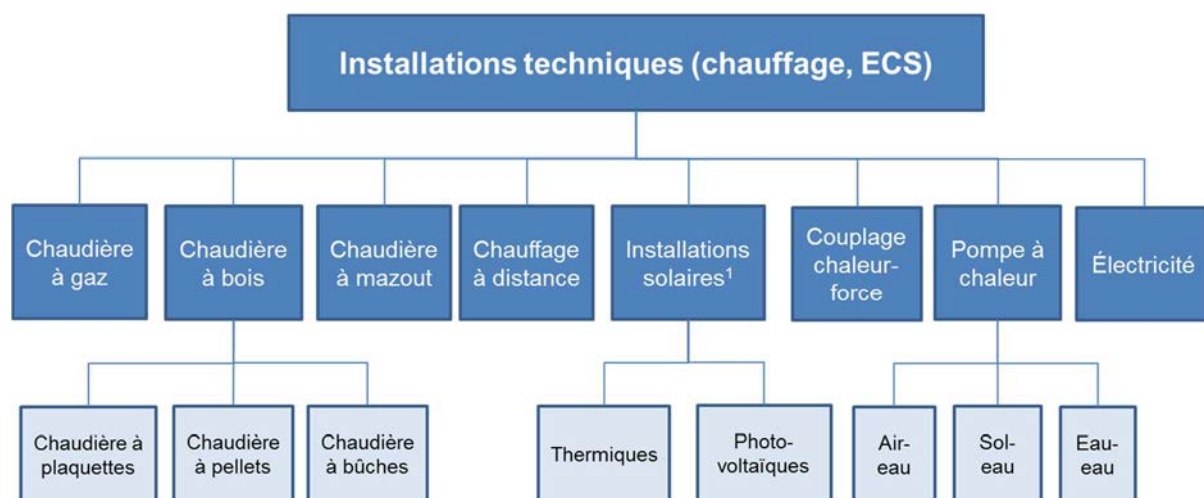
- L'ensemble des chauffages électriques muraux nécessitent un entretien simple; ces systèmes peuvent être remplacés soit par un même type de radiateur soit par un autre système électrique mural ;
- Les systèmes de chauffage électrique intégrés aux éléments de construction (chauffage au sol, chauffage de plafond et de murs) par contre sont difficilement remplaçables par un autre type de système électrique ;
- A l'exception du système de chauffage électrique "hydraulique centralisé à accumulation", tous les systèmes de chauffage électrique présentent l'inconvénient d'être difficilement substituables par un autre système de chauffage utilisant un vecteur énergétique différent ;
- La présence d'une distribution hydraulique pour le système hydraulique centralisé offre l'avantage de pouvoir changer facilement de vecteur énergétique.

3 Rénovation du chauffage électrique : Les solutions

Après un certain nombre d'années de fonctionnement, les systèmes de production de chaleur (pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS) doivent être remplacés. Les propriétaires ont deux options :

- Continuer avec un système électrique (remplacement par un système neuf) ;
- Substituer le système existant par un autre système de production d'énergie. Cette décision étant souvent liée à des raisons économiques et/ou environnementales.

Un ensemble d'installations techniques sont envisageables comme le montre la figure 3 :



¹ Systèmes devant être généralement couplés à une autre source d'énergie

Figure 3 : Liste des installations techniques possibles de production de chaleur pour le chauffage et l'ECS

3.1 Facteurs de décision liés au bâtiment

Le choix des installations techniques du bâtiment pour le chauffage et la production ECS est propre à chaque bâtiment. La localisation du bâtiment (réglementation, zone rurale ou urbaine, altitude), la parcelle (réglementation – COS/CUS, distances aux limites –, la composition du sous-sol, les zones de protections des eaux, la nappe phréatique, l'accès – chantier, livraison de combustible) et le bâtiment (surface et volume local technique, surface de toiture disponible pour les installations techniques, l'âge et la condition physique des utilisateurs) sont des caractéristiques importantes qui guideront le choix des installations techniques avant la prise en compte des considérations de coûts d'investissement ou d'impacts environnementaux.

Les paragraphes suivants montrent l'approche effectuée par rapport à ces différents critères dans le cas du bâtiment servant de base de réflexion.

3.1.1 Influence de la localisation du bâtiment

La loi et le règlement sur l'énergie du canton de Fribourg et la commune des Sciernes d'Albeuve n'imposent aucune restriction quant aux installations techniques possibles.

L'utilisation de chaleur provenant d'un chauffage à distance (par exemple, chaleur provenant d'une Usine d'Incinération des Ordures Ménagères – UIOM) et l'utilisation de systèmes à gaz naturel dépendent fortement de la proximité du bâtiment à un réseau de distribution. Le plan du réseau d'approvisionnement de la Suisse en gaz naturel [3] montre un clivage entre le milieu urbain de la Plaine et le milieu rural de montagne ainsi qu'entre le côté Nord et Sud des Alpes. Le chauffage à distance nécessite de grandes installations énergétiques. Il est donc plus adapté à des villes ou des villages d'une certaine taille équipés d'installations offrant cette possibilité. Le village des Sciernes d'Albeuve ne fournit pas de telles installations.

Pour rappel, le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur (PAC) dépend des températures de la source extérieure (source froide) et du circuit de chauffage (source chaude) et de la technologie utilisée. Plus l'écart de température est petit entre ces deux sources, meilleur sera le COP. Dans ce contexte, la PAC air-eau présentera de mauvaises performances, notamment en hiver quand la température de l'air est basse (correspond au moment où le chauffage est le plus utile) et que le besoin en chauffage est élevé (phénomène accentué dans le cas d'un bâtiment mal isolé avec chauffage par radiateurs). Un chauffage d'appoint pourrait être nécessaire (électrique, poêle à bois).

3.1.2 Influence de la parcelle

Le choix du système de pompe à chaleur est dépendant de certains paramètres liés à l'implantation du bâtiment, à savoir :

- La PAC [4] à sondes géothermiques verticales (SGV) ne peut pas être implantée n'importe où. Les zones de protection des eaux souterraines S1, S2 et S3 (dans une moindre mesure) sont des zones interdites au forage, tout comme, dans certains cas, les terrains assurant la protection d'aquifères karstiques sous-jacents. L'implantation de SGV est donc soumise à autorisation dans tous les cantons suisses dans les zones "autres secteurs üB" (qui ne nécessitent pas une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux) et "secteurs Au" (implantation admise au cas par cas par l'autorité compétente).

Dans le cas d'étude, la parcelle concernée se situe dans une zone Au [5]. Selon le Service de l'environnement du canton de Fribourg, la zone géographique d'implantation du bâtiment est située dans la zone d'un aquifère d'intérêt public (protection d'aquifères profonds). Dès lors, malgré la réalisation passée de sondes géothermiques dans cette zone, de nouvelles demandes ne sont plus considérées par le canton. Il est donc impossible d'installer des sondes géothermiques pour ce bâtiment. Par contre, une PAC eau-eau pourrait être envisagée dans cette zone car le forage nécessaire se situe à une profondeur plus faible. Dans ce cas, une étude géologique (forage test pour déterminer la qualité de l'eau, profondeur de captage et flux d'eau extractible) serait

nécessaire et une demande d'autorisation devrait être faite à l'autorité compétente. De plus, une autorisation au sens de l'art. 32 OEaux [6] devrait être octroyée. Compte tenu de ces différentes contraintes, cette variante n'a pas été évaluée.

- Selon le plan d'aménagement local, le bâtiment est situé en zone d'habitation individuelle B H1. Ainsi, l'article 11 du règlement communal d'urbanisme s'applique et impose certaines restrictions :
 - Hauteur des constructions : 1 niveau habitable au maximum ;
 - Distance aux limites de fonds :
 - Grande distance : 10 m au minimum
 - Petite distance : 5 m au minimum
 - Indice d'utilisation du sol (CUS) : 0.25 au maximum

La superficie du bien-fonds est de 841 m² [5]. La surface du bâtiment au sol est de 94.4 [m²]. Le CUS actuel est de 0.11. Il est donc possible de construire une annexe technique à ce bâtiment.

3.1.3 Influence du bâtiment et de son aménagement

Dans le cas d'une rénovation d'un système de chauffage électrique, la place disponible dans le bâtiment pour l'installation du nouveau système est primordiale. En effet, la chaudière, les accumulateurs d'eau chaude, la place de stockage pour les combustibles (mazout ou bois) ainsi que la place nécessaire pour les autres équipements électriques communs (p.ex. machine à laver le linge) nécessitent une surface et un volume importants (fonction de la puissance à installer).

Le local technique du bâtiment considéré est actuellement scindé en deux parties : une partie pour l'appartement du rez-de-chaussée et une pour l'appartement de l'étage. La suite de l'étude considérera ce local comme une seule pièce d'un volume net de 30.32 [m³] (local situé au rez-de-chaussée).

La puissance de la chaudière à installer pour le chauffage est de 10.2 [kW] selon le pré-dimensionnement de la chaudière de Lesosai (mode SIA 380/1).

3.1.4 Influence de la surface de toit disponible

La surface de toit disponible définit la quantité de capteurs solaires thermiques et/ou de panneaux photovoltaïques pouvant être installés.

Dans la suite de cette étude, le dimensionnement de l'installation solaire thermique sera fait sur la base d'une couverture de 60% des besoins de chaleur pour la production d'ECS. Il est à signaler que les Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement ainsi que l'agence Minergie® recommandent d'éviter d'utiliser l'installation solaire thermique pour couvrir le 100% des besoins annuels de chauffage et d'ECS. Swissolar mentionne que, pour un habitat individuel, une couverture de l'ordre de 60 à 70% des besoins de chaleur est raisonnable.

En cas d'utilisation du solaire photovoltaïque, la production est considérée auto-consommée. Selon le calculateur "PV Calculator" [7], 13% des besoins de chaleur pour le chauffage électrique peuvent être couverts, le reste devant être tiré du réseau.

3.1.5 Influence du volume du local technique disponible

La place disponible dans le local existant aura une influence importante sur le choix du système de production de chaleur, en particulier pour les vecteurs énergétiques stockables comme la biomasse et le mazout.

Les installations de chauffage au bois se caractérisent par leur grande variété de systèmes. Le choix étant dépendant de plusieurs paramètres, à savoir : l'utilisation de l'installation (appoint ou combustible principal), disponibilité des occupants à participer à l'alimentation du combustible et place disponible pour le stockage du combustible.

La figure 4 résume les différents types de systèmes actuellement disponible sur le marché et propose une démarche décisionnelle :

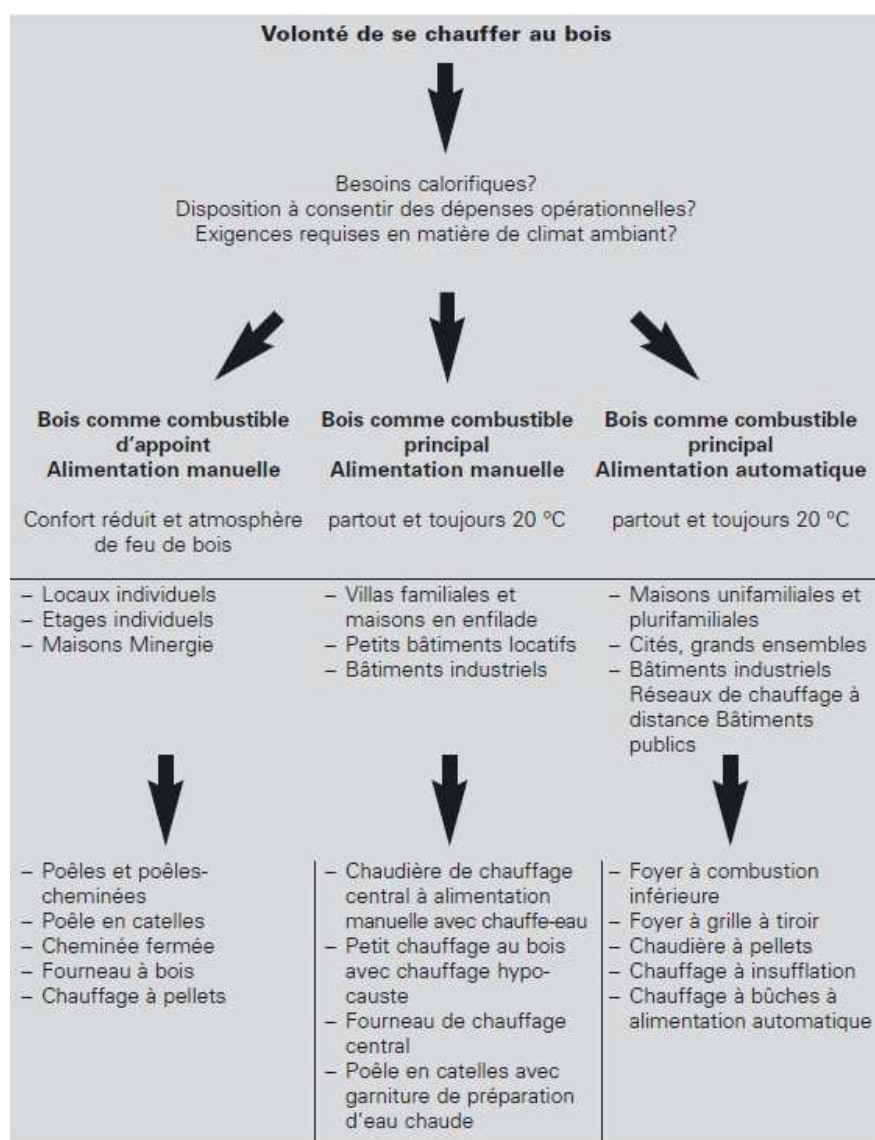


Figure 4 : Processus de décision pour la sélection d'une installation de chauffage au bois [8]

Les poêles et les cheminées à alimentation manuelle conviennent pour des maisons à très faible demande calorifique [8] ou en tant qu'appoint à un autre système (PAC AE par exemple). Les chaudières à bûches avec distribution de chaleur par circuit central sont une bonne alternative pour des puissances importantes et un chauffage à l'année mais nécessitent un investissement de la part de l'utilisateur pour la charge de la chaudière. Les puissances disponibles sur le marché sont comprises entre 10 et 200 [kW] [9]. Signalons, à ce stade, qu'il existe sur le marché des chaudières à bûches à alimentation automatique mais que leur puissance nominale est toujours supérieure à 25 [kW]³. De plus, une telle installation nécessite un accumulateur tampon. Ce système n'est ainsi que peu adapté à l'habitat individuel.

Finalement, la solution la moins contraignante pour l'utilisateur et conjuguant une vision à long terme de l'évolution du bâtiment (par exemple, rénovation de l'enveloppe durant la durée de vie de l'installation de chauffage) réside en l'installation d'une chaudière à granulés/pellets avec alimentation automatique et distribution de chaleur par réseau hydraulique centralisé. Le marché de ces chaudières se situe dans des plages de puissances comprises entre 5 et 50 kW [8].

En prenant en compte l'énergie finale à stocker pour assurer les besoins utiles de chauffage et d'ECS, les prescriptions de la protection incendie à prendre en compte pour installer un système de stockage de

³ Chaudière à bûche à alimentation automatique Timber 25, Lopper Kesselbau GmbH, puissance nominale : 25 [kW]

mazout ou de pellets et les autres équipements (chaudière, accumulateurs d'eau chaude, machine à laver), il s'avère que le local technique existant n'est pas suffisant. Il est donc nécessaire, pour le mazout et le pellet, d'installer une citerne enterrée et ce que le système de chauffage soit couplé ou non avec du solaire thermique.

Sur la base de ce constat, le système de couplage chaleur-force avec le bois ou le mazout semble également difficile à mettre en œuvre en raison du peu de place à disposition dans le local technique.

Ainsi, il est intéressant de constater que l'unique considération de critères propres à la situation du bâtiment écarte un certain nombre de solutions techniques initialement envisageables. Il reste dans le cadre de ce bâtiment, les solutions techniques suivantes.

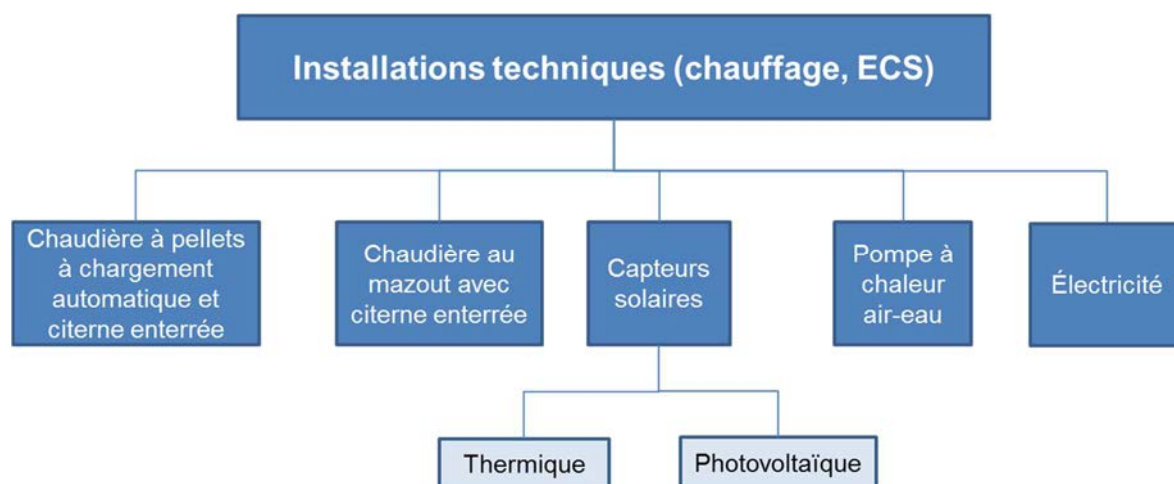


Figure 5 : Installations techniques envisageables dans le cas du bâtiment analysé

Il ressort que, pour ce bâtiment, sur treize systèmes techniques initialement envisageables, seulement six sont techniquement réalisables. De plus, sur ces six systèmes restants, deux sont utilisable seulement comme appoint à un autre système (capteurs solaires).

3.2 Facteurs économiques et environnementaux

L'analyse économique et environnementale est détaillée en détail dans le rapport "ECO-RENO WP3 : Rénovation de l'enveloppe vs rénovation du chauffage, étude de cas habitat individuel". Seuls sont repris ici les résultats principaux de cette étude.

Sur la base des analyses du chapitre 3.1, plusieurs scénarios de rénovation des installations techniques sont envisageables (cf. tableau 1) :

| Postes de consommation | Scénario 1 Él + S | Scénario 2 M. | Scénario 3 Pellets | Scénario 4 PAC AE | Scénario 5 M.+ST | Scénario 6 Pellets+ST | Scénario 7 PAC AE+ST |
|------------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Chauffage | Électricité + PV | Mazout | Pellets | PAC air-eau | Mazout | Pellets | PAC AE |
| ECS | Électricité + solaire thermique | Mazout | Pellets | PAC air-eau | Mazout + solaire thermique | Pellets + solaire thermique | PAC AE + solaire thermique |

Tableau 1 : Scénarios de rénovation des installations techniques

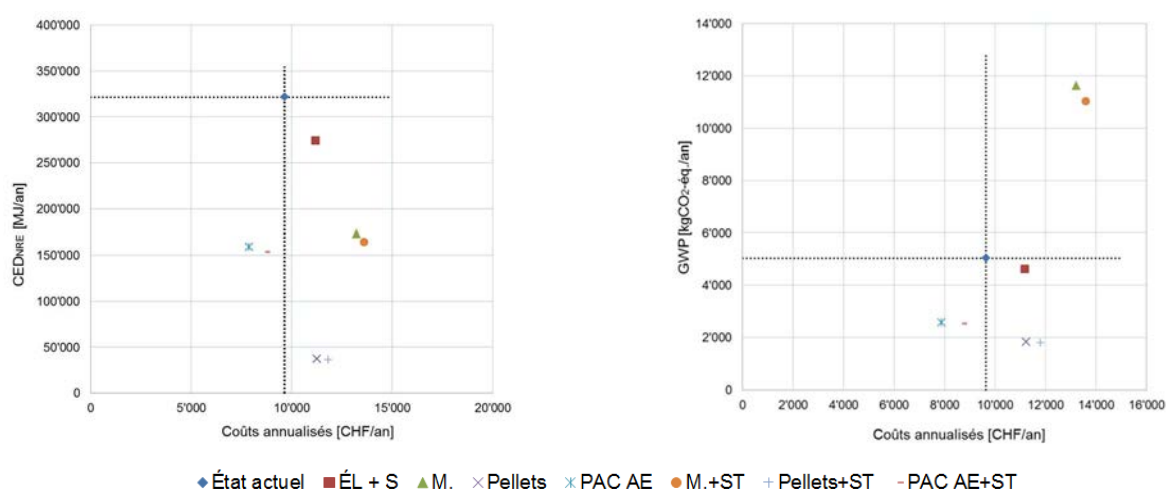
Les coûts des différents scénarios ont été évalués sur la base d'estimations faites par des prestataires de service, des fournisseurs et le tableur excel du WWF [10]. Tous les coûts sont annualisés. Des facteurs d'annuités ont été définis pour les coûts d'investissements selon la norme SIA 480 [11] en considérant un taux d'intérêt réel à 3.25% sur une période de calcul équivalent à la durée de vie des installations techniques selon le CT SIA 2032 [12].

Les coûts d'investissement pour la production et la distribution de chaleur, les coûts de l'énergie finale consommée y compris la variation annuelle, les coûts d'entretien de l'installation, la taxe CO₂ sur les combustibles fossiles sont pris en compte. Les subventions cantonales sont également incluses.

La méthodologie choisie pour l'évaluation des impacts environnementaux est compatible avec le standard Minergie®-ECO et conforme au CT SIA 2032. Les impacts environnementaux considèrent les installations techniques remplacées ou ajoutées et l'énergie finale consommée. Les impacts environnementaux ont été définis sur la base de données de la KBOB [13].

Les rendements des installations techniques utilisés pour les combustibles fossiles et les pellets se basent sur les valeurs fournies dans le cahier technique SIA 2040 [14] alors que le COP de la PAC a été évalué avec l'outil PACesti [15].

Le graphique 1 couple les coûts annualisés et les impacts environnementaux du bâtiment dans son état actuel et pour les sept scénarios de rénovation des installations techniques. Le bâtiment existant est pris comme base de comparaison.



Graphique 1 : Couplage coûts annualisés et impacts environnementaux (CED_{NRE} et GWP)

Le Graphique 1 montre que :

- Les solutions substituant le chauffage électrique par une PAC air-eau présentent à la fois des coûts annualisés et des impacts environnementaux plus faibles que le bâtiment dans son état actuel ;
- Les solutions substituant le chauffage électrique par une chaudière à pellets présentent les impacts environnementaux les plus faibles mais un coût supérieur ;
- les scénarios à base de mazout sont les plus coûteux et ce malgré des coûts d'énergie plus faibles que le bâtiment actuel (scénario 1 : électricité). Ceci est la conjonction à la fois du sur investissement nécessaire pour l'installation de la citerne enterrée et des coûts d'entretien. Pour le mazout, s'ajoute encore la taxe CO₂ ;
- Le gain énergétique total lié à la pose de capteurs solaires thermiques est faible par rapport à la majoration du capital investi ;
- Pour l'indicateur GWP, à l'exception des scénarios utilisant le mazout comme vecteur énergétique, tous les scénarios présentent un impact environnemental plus faible que celui du bâtiment dans son état actuel. Le mazout est doublement pénalisé par rapport à l'électricité pour cet indicateur : premièrement son impact unitaire et deux fois plus élevé que pour l'électricité et deuxièmement, le rendement des chaudières à mazout est inférieur à celui des systèmes de chauffages électriques (90% pour le chauffage et 65% pour l'ECS contre 100% pour l'électricité) ;

Sur la base de cette analyse financière et environnementale, le scénario substituant le chauffage électrique par une PAC air-eau semble être la solution optimale. En effet, celle-ci présente un coût énergétique et des impacts environnementaux faibles pour un coût d'investissement réduit. Il ressort également que la pose de capteurs solaires thermiques ou de panneaux photovoltaïques sur un bâtiment mal isolé n'amène que peu de gain énergétique pour un investissement important. Il est donc important d'investir, dans un premier temps, dans des installations techniques permettant la diminution de la consommation d'énergie de chauffage.

4 Conclusions

En cas de rénovation d'une installation technique de production et de distribution de chaleur (chauffage et ECS), un certain nombre de solutions de substitution ou de remplacement sont disponibles sur le marché. Cependant, toutes ces solutions ne sont pas réalisables. En effet, selon la localisation du bâtiment (plaine, montagne, ville ou campagne) la disponibilité de certains vecteurs énergétiques (gaz naturel) ou de système de distribution de la chaleur (chauffage à distance) est inexistante. La parcelle, elle-même, influence le choix de l'installation technique. En effet, selon la classification du bien-fonds, certaines technologies ne sont pas réalisables (p. ex. PAC avec sondes géothermiques). De plus, des facteurs liés à la typologie du bâtiment engendrent des contraintes supplémentaires (par exemple, la performance des capteurs solaires est dépendante de l'orientation et de l'inclinaison du toit). L'espace disponible pour l'entreposage de l'ensemble des installations techniques peut également être problématique dans les bâtiments à rénover, notamment dans les bâtiments fonctionnant à l'électricité directe où les locaux techniques n'ont pas été prévus pour accueillir d'autres types de systèmes de production de chaleur.

En ajoutant à ces contraintes les aspects financiers et environnementaux, les choix de système de remplacement se restreignent encore plus. En effet, la substitution du chauffage électrique par un autre type de chauffage nécessite des investissements conséquents (chaudière et réalisation d'un nouveau système de distribution de chaleur). Ces coûts élevés concernent tant les propriétaires d'habitations individuelles que collectives. Pour ces derniers, aux coûts élevés de la nouvelle distribution, s'ajoute différentes nuisances (sonores, poussières intérieures, etc.) que doivent subir les locataires lors des travaux de rénovation. A ces coûts d'investissement, s'ajoutent des coûts d'entretien plus élevés et, selon le vecteur énergétique choisi, la taxe sur le CO₂. L'analyse financière détaillée [1] montre que la diminution des coûts de l'énergie résultant du nouveau système et la prise en compte d'éventuelles subventions ne permettent pas systématiquement d'offrir une solution de substitution économiquement viable. En effet, dans le cas d'étude, seule la PAC air-eau (couplée ou non avec une installation solaire thermique) permet d'effectuer des économies financières.

Une question se pose avec ce système, en effet, la PAC air-eau est soumise à une contrainte de fonctionnement liée à la température extérieure, quelle serait la solution possible dans le cas d'un bâtiment situé à une altitude plus élevée ? Sachant qu'il y a, pour ces bâtiments d'altitude, des contraintes possibles liées à la disponibilité de livraison de mazout ou de pellets. De plus, il se peut que cette technologie ait des restrictions légales comme sur le canton de Vaud qui ne l'autorise que pour des bâtiments situés à une altitude de plus de 1'000 mètres si ceux-ci sont Minergie ou équivalent (RLVLEne, art.17, al.3 [16]).

D'un point de vue environnemental, la substitution du chauffage électrique fait sens selon les deux critères environnementaux évalués, à l'exception de l'installation au mazout pour l'indicateur GWP (potentiel de réchauffement climatique).

Cette analyse a également démontré que le couplage d'une installation avec du solaire thermique ou du photovoltaïque n'a que peu de poids sur les résultats étant donné que le bâtiment concerné est une épave énergétique. Proportionnellement, ce couplage amène peu de gains environnementaux mais augmente passablement les coûts d'investissement.

Finalement et en plus des considérations précédentes, il ne faut pas négliger que selon le type de chauffage électrique utilisé, le temps de réponse entre la production et l'émission de chaleur est plus rapide que d'autres systèmes de distribution. Ainsi, le chauffage électrique, malgré un impact environnemental plus important, peut être adapté à certains types d'habitat ou de locaux. Par exemple, les habitats ou les locaux peu fréquentés (p. ex. les appartements de vacances, les ateliers de particuliers) semblent être propices à l'emploi de chauffages électriques de par leurs coûts d'investissement faible, la densité du réseau électrique, l'entretien et le temps de réponse entre le moment de l'enclenchement du chauffage et le chauffage de la pièce.

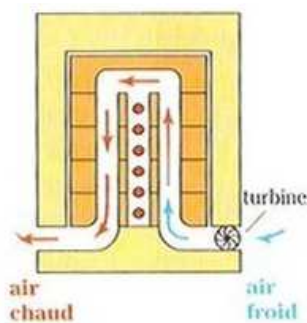
5 Références

- [1] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - PARTIE E - WP3.3a : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique - Étude de cas : Habitat individuel," 2015.
- [2] C. des services cantonaux de l'énergie Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie, "Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC)," 2014.
- [3] "Plan du réseau d'approvisionnement de la Suisse en gaz naturel." [Online]. Available: <http://www.gaz-naturel.ch/approvisionnement/reseau-en-suisse/>.
- [4] "Geothermie.ch." [Online]. Available: http://www.geothermie.ch/index.php?p=detail_ews_sgv.
- [5] "Guichet cartographique du canton de Fribourg." [Online]. Available: <http://www.geo.fr.ch/#>.
- [6] OFEV, "Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol," 2009.
- [7] "PV Calculator." [Online]. Available: <http://pvcalc.meteotest.ch/>.
- [8] T. Nussbaumer, "Partie 3 - Installations de chauffage à granulés/pellets de bois," 2008.
- [9] T. Nussbaumer, "Partie 2 – Installations de chauffage au bois à alimentation manuelle," 2008.
- [10] WWF, "Comparaison des coûts annuels des systèmes de chauffage (avec alimentation en eau chaude) pour les installations de 30-60 kW." 2005.
- [11] "SIA 480 - Calcul de rentabilité pour les investissement dans le bâtiment." 2004.
- [12] "SIA 2032 - L'énergie grise des bâtiments." 2010.
- [13] "Données des écobilans dans la construction, KBOB," 2012.
- [14] "SIA 2040 - La voie SIA vers l'efficacité énergétique." 2011.
- [15] "PACesti v 6.5." 2011.
- [16] "RLVLEne - Règlement d'application de la loi du 16 mai 2006 sur l'énergie (RLVLEne)." 2006.

6 Annexes

Annexe 1: Fiches de synthèse des chauffages électriques

Chauffage électrique : Accumulateur décentralisé dynamique



Source : www.maison-climatisation-chauffage.com

Description & fonctionnement

Ce type de chauffage est constitué d'un noyau en briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation, chauffé par des résistances électriques. L'accumulateur se charge la nuit. La journée, l'émission de chaleur se fait principalement par convection forcée (par une turbine) à travers les parois de l'appareil. Les turbines ou ventilateurs sont commandés par un thermostat d'ambiance.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort | |
| | <ul style="list-style-type: none">- Le bruit de la turbine- Courant d'air possible |
| Économique | |
| <ul style="list-style-type: none">✓ De par son fonctionnement, il est possible de profiter du tarif nuit de l'électricité✓ Remplacement/réparation aisée | <ul style="list-style-type: none">- Les frais d'entretien |
| Environnemental | |
| | <ul style="list-style-type: none">- Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

Recommandations / remarques

- De par leur taille et leur épaisseur, l'influence de ce type de radiateur sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond) ou des autres radiateurs muraux.
- La présence de la turbine permet d'accélérer la diffusion de la chaleur dans la pièce. Ce qui est un avantage par rapport à l'accumulateur décentralisé statique.
- L'influence de ce type de radiateur sur la hauteur d'étage disponible est nul que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.
- Il est possible de réduire les risques de rayonnements non-ionisants (RNI) en respectant une distance de 80 cm entre le chauffage à accumulation et les lieux de travail, de séjour ou de sommeil.

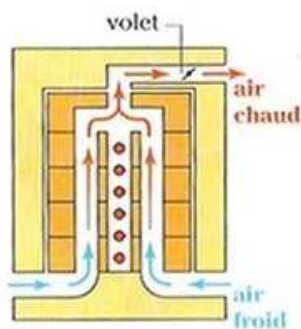
Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- Office Fédérale de la Santé publique (OFSP), <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/05460/index.html?lang=fr>
- www.energieplus-lesite.be
- www.maison-climatisation-chauffage.com
- radiateur.comprendrechoisir.com

Glossaire

- Rayonnement non-ionisant (RNI) : Appelé également électro-smog, il représente le rayonnement des ondes électromagnétiques qui n'ont pas une énergie suffisante pour transformer les atomes en ions.

Chauffage électrique : Accumulateur décentralisé statique



Source : www.maison-climatisation-chauffage.com

Description & fonctionnement

Ce type de chauffage est constitué d'un noyau en briques réfractaires à haut pouvoir d'accumulation, chauffé par des résistances électriques. L'accumulateur se charge la nuit. La journée, l'émission de chaleur se fait par rayonnement et convection naturelle à travers les parois de l'appareil.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort ✓ Pas de nuisance sonore | - Le temps de réaction est long entre le moment de l'enclenchement et de l'émission de chaleur |
| Économique ✓ De par son fonctionnement, il est possible de profiter du tarif nuit de l'électricité ✓ Les frais d'entretien ✓ Remplacement/réparation aisée | |
| Environnemental | - Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

Recommandations / remarques

- De par leur taille et leur épaisseur, l'influence de ce type de radiateur sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond) ou des autres radiateurs muraux.
- L'influence de ce type de radiateur sur la hauteur d'étage disponible est nul que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.
- Il est possible de réduire les risques de rayonnements non-ionisants (RNI) en respectant une distance de 80 cm entre le chauffage à accumulation et les lieux de travail, de séjour ou de sommeil.

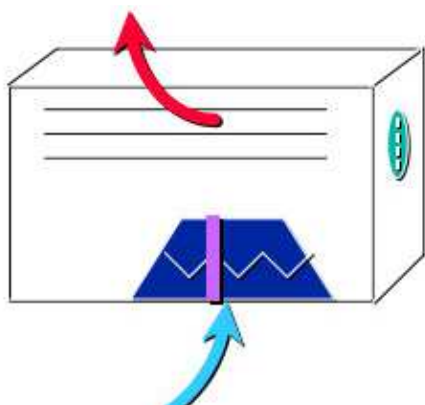
Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- Office Fédérale de la Santé publique (OFSP), <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/05460/index.html?lang=fr>
- <http://www.energieplus-lesite.be>
- <http://www.maison-climatisation-chauffage.com>

Glossaire

- Rayonnement non-ionisant (RNI) : Appelé également électro-smog, il représente le rayonnement des ondes électromagnétiques qui n'ont pas une énergie suffisante pour transformer les atomes en ions.

Chauffage électrique : Convecteur classique



Source : radiateur-electrique.net

Description & fonctionnement

Ce type de chauffage électrique produit de l'air chaud (flèche rouge) par contact de l'air froid (flèche bleue) avec une résistance électrique. Cet air est diffusé par convection naturelle dans la pièce à vivre. Ces convecteurs sont généralement munis d'un thermostat pour diminuer la consommation électrique.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort <ul style="list-style-type: none">✓ Permet de réchauffer rapidement une pièce✓ Pas de nuisance sonore | |
| Économique <ul style="list-style-type: none">✓ Les frais d'entretien✓ Remplacement/réparation aisée | <ul style="list-style-type: none">- De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter pleinement du tarif nuit de l'électricité |
| Environnemental | <ul style="list-style-type: none">- Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

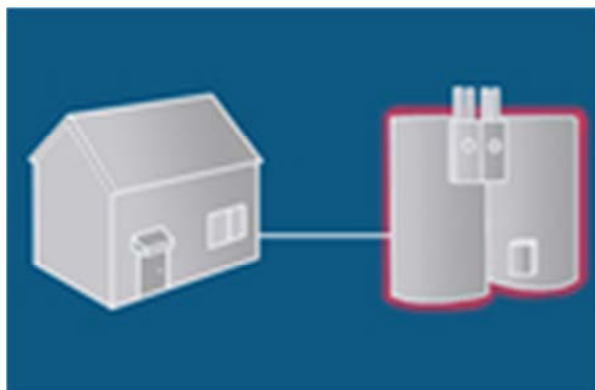
Recommandations / remarques

- Il est recommandé d'utiliser ce type de radiateurs dans des bâtiments peu fréquentés (p. ex. résidences secondaires) ou de les installer dans des pièces utilisées ponctuellement (p. ex. atelier).
- L'influence de ce type de radiateur sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond). Par rapport au mur chauffant, si l'encombrement au sol semble plus faible, la souplesse d'aménagement de l'intérieur est réduite. Son encombrement au sol est toutefois moins important que dans le cas des radiateurs électriques à accumulation décentralisé (statique ou dynamique).
- L'influence de ce type de radiateur sur la hauteur d'étage disponible est nul que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.

Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- <http://www.chauffage-electrique.ch/>
- <http://www.radiateur-electrique.net/>
- <http://www.scdi.ch>

Chauffage électrique : Hydraulique centralisé à accumulation



Source : OFSP

Description & fonctionnement

Ce type de chauffage électrique est formé d'une production de chaleur assurée par des résistances électriques (conversion de l'électricité en chaleur). Le stockage de la chaleur est assuré par une ou plusieurs cuves d'accumulation (eau). La distribution de la chaleur est réalisée par un système hydraulique qui permet, par rayonnement (p. ex. chauffage au sol), la distribution de la chaleur dans les pièces à vivre.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Économique <ul style="list-style-type: none">✓ En produisant le stock de chaleur la nuit grâce au système d'accumulation, il profite du tarif réduit du kilowattheure électrique✓ Il est également aisé de remplacer/réparer le système existant | <ul style="list-style-type: none">- Les frais d'entretien sont plus importants notamment par la présence d'une distribution hydraulique- Investissement important (distribution de chauffage + accumulateur) |
| Environnemental <ul style="list-style-type: none">✓ L'utilisation d'un stockage et d'une distribution hydraulique rend facile, par rapport aux autres chauffages électriques, le changement de mode de production de chaleur (p. ex. PAC) et du vecteur énergétique | |

Recommandations / Remarques

- Il est recommandé de coupler ce type de chauffage à une chaudière à bois capable d'assurer la charge principale en hiver afin de ne pas surcharger le réseau lors des heures de pointes.
- Afin de réduire l'exposition au rayonnement non-ionisant, Il faut veiller à respecter une distance de 100 à 150 cm entre l'accumulateur central et les pièces à vivre voisines (à côté ou au-dessus).
- Il est aussi préférable d'installer les câbles d'alimentation électriques des accumulateurs centraux à l'écart des pièces à vivre afin de réduire le rayonnement non-ionisant.

Sources

- Office Fédérale de la Santé publique (OFSP), <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/05460/index.html?lang=fr>
- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1996
- Rayonnement non-ionisant, Commission universitaire pour la santé et la sécurité au travail romande (CUSSTR), 2009

Glossaire

- Rayonnement non-ionisant (RNI) : Appelé également électro-smog, il représente le rayonnement des ondes électromagnétiques qui n'ont pas une énergie suffisante pour transformer les atomes en ions.

Chauffage électrique : Mur chauffant



Source : www.radiateur-electrique.org

Description & fonctionnement

Le principe de fonctionnement est identique au plancher chauffant. C'est-à-dire qu'il est constitué d'un réseau de câbles ou de films posé sur une isolation et recouvert d'un parement. L'isolation empêche la diffusion de chaleur dans le mur. La transmission de chaleur se fait essentiellement par convection et rayonnement à travers le parement.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort <ul style="list-style-type: none"> ✓ La chaleur est distribuée uniformément ✓ La qualité de l'air ✓ Pas de nuisance sonore | |
| Économique <ul style="list-style-type: none"> ✓ Ne nécessite aucun entretien | <ul style="list-style-type: none"> - De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter du tarif nuit de l'électricité - Le prix de l'installation - Le changement ou le remplacement est coûteux |
| Environnemental | <ul style="list-style-type: none"> - Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

Recommandations / remarques

- Par analogie au plancher chauffant, un risque de rayonnement non ionisant (RNI) n'est pas à exclure en fonction de la technologie utilisée. Il est préférable d'éloigner la tête du lit du mur.
- Ce type de chauffage n'a pas d'influence sur la hauteur d'étage disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.
- L'influence de ce type de chauffage sur la surface nette disponible, dans le cadre d'une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond). Par rapport aux éléments muraux, si l'encombrement au sol semble plus important, la souplesse d'aménagement de l'intérieur est meilleure. Son encombrement au sol est toutefois moins important que dans le cas des radiateurs électriques à accumulation décentralisé (statique ou dynamique).
- Malgré un décalage de temps entre l'enclenchement du chauffage et l'émission de la chaleur dans la pièce, le chauffage est rapide par rapport aux radiateurs électriques à accumulation.

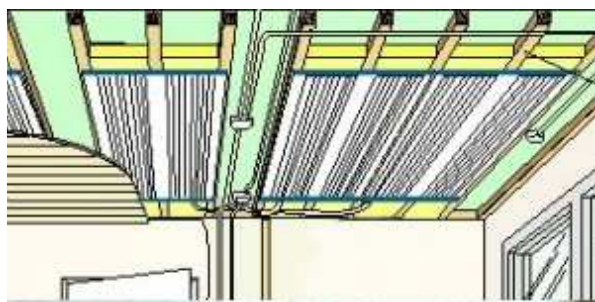
Sources

- <http://www.quelleenergie.fr>
- <http://www.radiateur-electrique.org>
- www.ecohabitation.com

Glossaire

- Rayonnement non-ionisant (RNI) : Appelé également électro-smog, il représente le rayonnement des ondes électromagnétiques qui n'ont pas une énergie suffisante pour transformer les atomes en ions.

Chauffage électrique : Plafond chauffant



Source : www.radiateur-electrique.org

Description & fonctionnement

Le film chauffant est installé entre une couche d'isolation et au-dessus d'un parement. La couche d'isolation permet d'éviter les pertes de chaleur vers le haut, alors que les panneaux de plâtre diffusent par rayonnement, dans la pièce, la chaleur emmagasinée.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort <ul style="list-style-type: none">✓ La chaleur est distribuée uniformément✓ La qualité de l'air✓ Pas de nuisance sonore | |
| Économique <ul style="list-style-type: none">✓ Ne nécessite aucun entretien | <ul style="list-style-type: none">- De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter du tarif nuit de l'électricité- Le prix de l'installation- Le changement ou le remplacement est coûteux |
| Environnemental | <ul style="list-style-type: none">- Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

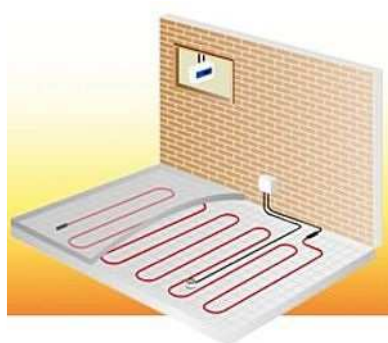
Recommandations / remarques

- Ce type de chauffage n'a pas d'influence sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.
- Il est recommandé, dans le cas d'une rénovation, de faire attention à la diminution de la hauteur d'étage lors de la pose de ce type de chauffage.
- Lors de la conception du bâtiment, il convient de faire attention à la hauteur des pièces.
- Malgré un décalage de temps entre l'enclenchement du chauffage et l'émission de la chaleur dans la pièce, le chauffage est rapide par rapport aux radiateurs électriques à accumulation et le plancher chauffant.
- En cas de panne, le plafond chauffant est plus facilement réparable qu'un plancher chauffant.

Sources

- plancher-chauffant.comprendrechoisir.com/comprendre/plafond-chauffant
- www.coop-elec.fr
- www.radiateur-electrique.org

Chauffage électrique : Plancher chauffant à accumulation



Source : www.scdi.ch

Description & fonctionnement

Les chauffages au sol électriques sont constitués d'un réseau de câbles ou de films chauffants intégrés dans la chape. La chaleur est accumulée dans la chape et émise par rayonnement dans la pièce. La différence avec le plancher chauffant est la mise en œuvre d'une chape plus épaisse.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort <ul style="list-style-type: none">✓ La chaleur est distribuée uniformément✓ La qualité de l'air✓ Pas de nuisance sonore | <ul style="list-style-type: none">- La restitution de la chaleur n'est pas directe |
| Économique <ul style="list-style-type: none">✓ Ne nécessite aucun entretien | <ul style="list-style-type: none">- Le prix de l'installation- Le changement ou le remplacement est coûteux |
| Environnemental | <ul style="list-style-type: none">- Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

Recommandations / remarques

- Un risque de rayonnement non ionisant (RNI) n'est pas à exclure en fonction de la technologie utilisée. Si les chauffages au sol à double fil ne posent pas de problèmes, l'OFSP fournit quelques recommandations concernant les chauffages comportant des câbles à un seul fil : Il faut chauffer les pièces uniquement quand personne ne s'y trouve ; Il est préférable d'utiliser un cadre de lit plutôt que de poser un matelas ou un sommier directement au sol.
- Ce type de chauffage n'a pas d'influence sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.
- Il est recommandé, dans le cas d'une rénovation, de faire attention à la diminution de la hauteur d'étage lors de la pose de ce type de chauffage.
- Ce type de chauffage nécessite la pose d'un chauffage électrique direct d'appoint à cause de l'inertie du sol. De plus, une recharge diurne peut s'avérer nécessaire.

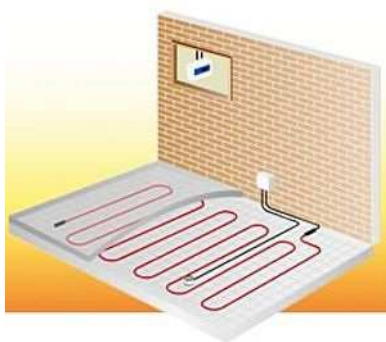
Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- Office Fédérale de la Santé publique (OFSP), <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/05460/index.html?lang=fr>
- www.scdi.ch

Glossaire

- Rayonnement non-ionisant (RNI) : Appelé également électro-smog, il représente le rayonnement des ondes électromagnétiques qui n'ont pas une énergie suffisante pour transformer les atomes en ions.

Chauffage électrique : Plancher chauffant



Source : www.scdi.ch

Description & fonctionnement

Les chauffages au sol électriques sont constitués d'un réseau de câbles ou de films chauffants intégrés dans la chape. La chaleur est accumulée dans la chape et émise par rayonnement dans la pièce.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort <ul style="list-style-type: none">✓ La chaleur est distribuée uniformément✓ La qualité de l'air✓ Pas de nuisance sonore | |
| Économique <ul style="list-style-type: none">✓ Ne nécessite aucun entretien | <ul style="list-style-type: none">- De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter du tarif nuit de l'électricité- Le prix de l'installation- Le changement ou le remplacement est coûteux |
| Environnemental | <ul style="list-style-type: none">- Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

Recommandations / remarques

- Un risque de rayonnement non ionisant (RNI) n'est pas à exclure en fonction de la technologie utilisée. Si les chauffages au sol à double fil ne posent pas de problèmes, l'OFSP fournit quelques recommandations concernant les chauffages comportant des câbles à un seul fil : Il faut chauffer les pièces uniquement quand personne ne s'y trouve ; Il est préférable d'utiliser un cadre de lit plutôt que de poser un matelas ou un sommier directement au sol.
- Ce type de chauffage n'a pas d'influence sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.
- Il est recommandé, dans le cas d'une rénovation, de faire attention à la diminution de la hauteur d'étage lors de la pose de ce type de chauffage.
- Malgré un décalage de temps entre l'enclenchement du chauffage et l'émission de la chaleur dans la pièce, le chauffage est rapide par rapport aux radiateurs électriques à accumulation.

Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- Office Fédérale de la Santé publique (OFSP), <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/05460/index.html?lang=fr>
- www.scdi.ch
- www.ecohabitation.com

Glossaire

- Rayonnement non-ionisant (RNI) : Appelé également électro-smog, il représente le rayonnement des ondes électromagnétiques qui n'ont pas une énergie suffisante pour transformer les atomes en ions.

Chauffage électrique : Plinthe électrique



Source : www.emetteursdechauffage.com

Description & fonctionnement

Comme le convecteur classique, la plinthe fonctionne par convection. Au sol, l'air froid entre en contact avec des résistances électriques puis remonte par convection dans la pièce. L'air chaud chauffe le mur qui accumule, à son tour, de la chaleur, puis la relâche par rayonnement, apportant une chaleur homogène dans la pièce.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort <ul style="list-style-type: none"> ✓ Permet de réchauffer rapidement une pièce ✓ Chaleur est assez bien répartie dans la pièce ✓ La qualité de l'air (humidité relative) est relativement bonne ✓ Pas de nuisance sonore | |
| Économique <ul style="list-style-type: none"> ➤ Les frais d'entretien ➤ Remplacement/réparation aisée | <ul style="list-style-type: none"> - De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter du tarif nuit de l'électricité |
| Environnemental | <ul style="list-style-type: none"> - Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

Recommandations / Remarques

- Il est recommandé d'utiliser ce type de chauffage dans des bâtiments peu fréquentés (p. ex. résidences secondaires) ou de les installer dans des pièces utilisées ponctuellement (p. ex. atelier).
- L'influence de ce type de chauffage sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond). Par rapport au mur chauffant, si l'encombrement au sol semble plus faible, la souplesse d'aménagement de l'intérieur semble réduite. Son encombrement au sol est toutefois moins important que dans le cas des radiateurs électriques à accumulation décentralisé (statique ou dynamique).
- L'influence de ce type de chauffage sur la hauteur d'étage disponible est nul que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.

Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- <http://radiateur.comprendrechoisir.com>
- <http://www.ecohabitation.com>
- <http://www.emetteursdechauffage.com>

Chauffage électrique : Radiateur à inertie



Inertie fluide



Inertie sèche

Source : Domotelec

Description & fonctionnement

Il existe deux types de radiateurs à inertie : les radiateurs à inertie fluide (liquide caloporteur) et les radiateurs à inertie sèche (blocs de fonte ou de céramique). Ce type de radiateur se base sur la capacité d'un corps physique (fluide ou solide) à absorber puis à restituer la chaleur, par rayonnement, de manière lente et diffuse.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort <ul style="list-style-type: none"> ✓ De par sa faible inertie, il permet de réchauffer relativement rapidement une pièce. ✓ L'inertie thermique est suffisante pour offrir une diffusion de chaleur relativement constante. ✓ Pas de nuisance sonore | |
| Économique <ul style="list-style-type: none"> ✓ Les frais d'entretien | <ul style="list-style-type: none"> - De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter du tarif nuit de l'électricité |
| <ul style="list-style-type: none"> ✓ Remplacement/réparation aisée Environnemental | <ul style="list-style-type: none"> - Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

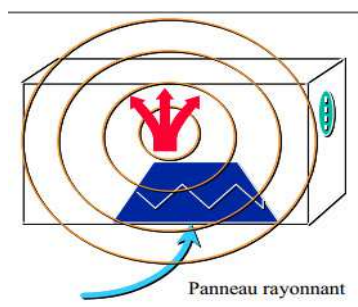
Recommandations / remarques

- L'inertie est ici toute relative. En effet, ce type de radiateur permet de profiter d'une légère inertie qui ne se trouve pas dans certains radiateurs électriques tels que les convecteurs classiques, les plinthes électrique ou encore le ventilo-convecteur. Cependant, l'inertie est moins prononcée que dans les radiateurs électriques à accumulation. Ce niveau d'inertie thermique est la raison pour laquelle ces radiateurs ne permettent pas de profiter du tarif nuit de l'électricité. Par contre, il a l'avantage de diffuser continuellement sa chaleur par rayonnement et convection.
- Il est recommandé d'utiliser ce type de radiateurs dans des bâtiments peu fréquentés (p. ex. résidences secondaires) ou de les installer dans des pièces utilisées ponctuellement (p. ex. atelier).
- L'influence de ce type de radiateur sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond). Par rapport au mur chauffant, si l'encombrement au sol semble plus faible, la souplesse d'aménagement de l'intérieur est réduite. Son encombrement au sol est toutefois moins important que dans le cas des radiateurs électriques à accumulation décentralisé (statique ou dynamique).
- L'influence de ce type de radiateur sur la hauteur d'étage disponible est nul que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.

Sources

- <http://www.radiateur-electrique.org>
- <http://www.radiateurelectrique.net/>
- <http://www.radiateur.org>

Chauffage électrique : Panneaux rayonnants ou radiants



Source : www.radiateur-electrique.net

Description & fonctionnement

Le panneau rayonnant est constitué d'une plaque métallique chauffée par de résistance électrique et protégée par une grille ou une plaque de verre. La chaleur produite est émise par rayonnement, à travers la grille ou la plaque de verre, dans la pièce.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort | |
| ✓ La qualité de l'air | |
| ✓ Pas de nuisance sonore | |
| Économique | |
| ✓ Les frais d'entretien | - De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter du tarif nuit de l'électricité |
| ✓ Remplacement/réparation aisée | - Consommation élevée d'électricité |
| Environnemental | |
| | - Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

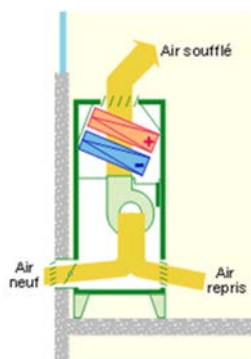
Recommandations / remarques

- Les panneaux rayonnants émettent de la chaleur sur une courte distance. Dès lors, selon la taille de la pièce et de l'endroit, une sensation de froid est perceptible.
- Il est recommandé d'utiliser ce type de radiateurs dans des locaux peu ou non chauffés.
- L'influence de ce type de radiateur sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond). Par rapport au mur chauffant, si l'encombrement au sol semble plus faible, la souplesse d'aménagement de l'intérieur est réduite. Son encombrement au sol est toutefois moins important que dans le cas des radiateurs électriques à accumulation décentralisé (statique ou dynamique). Il est également plus encombrant que des convecteurs classiques.
- L'influence de ce type de radiateur sur la hauteur d'étage disponible est nul que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation.

Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- <http://www.radiateur-electrique.org>
- <http://www.radiateur-electrique.net/>
- <http://www.radiateur.org>

Chauffage électrique : Ventilo-convecteur



Source : www.ecohabitation.com

Description & fonctionnement

Le principe est le même que le convecteur classique mise à part que, dans ce cas, la convection est forcée par l'ajout d'un ventilateur (axial ou centrifuge). L'air chaud (air soufflé) est produit par contact de l'air froid (air neuf et/ou repris) avec une résistance électrique. Cet air est diffusé par convection forcée dans la pièce à vivre.

Avantages et inconvénients par rapport aux autres systèmes de chauffage électrique

| Avantages | Inconvénients |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Confort ✓ Permet de réchauffer rapidement une pièce | - Émission sonore - Courant d'air possible |
| Économique ✓ Remplacement/réparation aisée | - De par son fonctionnement, il ne permet pas de profiter du tarif nuit de l'électricité |
| Environnemental | - Lors de la rénovation de bâtiment, la substitution de ce type de chauffage par un système hydraulique, par exemple, est compliqué |

Recommandations / remarques

- Il est recommandé d'utiliser ce type de radiateurs dans des bâtiments peu fréquentés (p. ex. résidences secondaires) ou de les installer dans des pièces utilisées ponctuellement (p. ex. atelier).
- L'influence de ce type de radiateur sur la surface nette disponible, que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation, est plus marquée que dans le cas d'éléments de construction chauffants (plancher ou plafond). Par rapport au mur chauffant, si l'encombrement au sol semble plus faible, la souplesse d'aménagement de l'intérieur est réduite. Son encombrement au sol est toutefois moins important que dans le cas des radiateurs électriques à accumulation décentralisé (statique ou dynamique)
- L'influence de ce type de radiateur sur la hauteur d'étage disponible est nul que ce soit dans le cadre d'une construction neuve ou une rénovation
- Si le flux d'air est orienté vers le haut il y a un risque que la chaleur soit mal répartie dans la pièce. Par contre, une orientation du flux d'air chaud vers le bas permet d'atténuer cet inconfort en réchauffant d'abord la pièce au niveau du sol.
- L'entretien, de par la présence du ventilateur, est un peu plus compliqué que dans le cas de convecteurs classiques

Sources

- Installations techniques des bâtiments : Situation actuelle - Connaissance de base pour les installateurs, les ingénieurs CVSE et les architectes, Office fédéral des questions conjoncturelles, 2^{ème} édition 1986
- <http://www.energieplus-lesite.be>
- <http://www.ecohabitation.com>



Projet ECO-Reno - Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation

PARTIE E

WP 3 : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique

WP 3.3.a : Application sur une étude de cas d'habitat individuel

Résumé

L'étude de cas présentée dans ce rapport concerne la rénovation de l'enveloppe thermique et des installations techniques d'un habitat individuel situé dans le canton de Fribourg. Ce bâtiment des années 80 est chauffé par un système de radiateurs électriques directs. Une analyse détaillée de plusieurs scénarios de rénovation des systèmes de chauffage et de l'enveloppe a été effectuée selon des critères financiers et environnementaux. L'étude de ce bâtiment a montré que la solution optimale - solution offrant à la fois des coûts annualisés et des impacts environnementaux plus faibles que le bâtiment dans son état actuel - est la substitution du système de chauffage à électricité directe par une PAC air-eau. Cette solution permet de diminuer les coûts annualisés de 11 % et de diminuer l'impact environnemental de 50% au niveau de l'indicateur GWP et de 51% la consommation d'énergie primaire non-renouvelable (CED_{NRE}). La rénovation globale de l'enveloppe thermique est une autre possibilité de rénovation. En conservant le chauffage électrique direct, la rénovation de l'enveloppe permet de diminuer l'impact environnemental total de 58% selon l'indicateur CED_{NRE} et de 51% selon le GWP par rapport au bâtiment dans son état actuel. Par contre, la rénovation de l'enveloppe thermique présente des coûts annualisés plus élevés de 49% par rapport au bâtiment dans son état actuel et de 60% supérieur à la solution de substitution unique du chauffage (PAC air-eau) et ce malgré la prise en compte des subventions. Dès lors, d'un point de vue des coûts, la rénovation globale de l'enveloppe thermique du bâtiment peut représenter un frein à la rénovation énergétique tant que les coûts de rénovation des éléments de l'enveloppe thermiques sont aussi élevés et que les aides financières aussi faibles. De plus, lorsque l'ensemble des résultats sont mis en rapport avec les exigences du CT SIA 2040, aucun scénarios de rénovation globale du bâtiment ne répond à la valeur indicative totale selon les deux indicateurs retenus (CED_{NRE} et GWP).

Il semble, dès lors, que la détermination du scénario de rénovation d'un bâtiment – de façon générale et non pas seulement les bâtiments fonctionnant à l'électricité – n'est ni aisé ni évident. L'addition des contraintes techniques, économiques et environnementales rendent ce choix difficile.

Abstract

The case study presented in this report concerns the energy related building renovation of the thermal envelope and building integrated technical systems (BITS) of a detached single-family house in the Canton of Fribourg. The building investigated was built in the eighties and is currently heated with electric radiators. A detailed analysis of several renovation scenarios of the heating system and envelope was conducted according to economic and environmental criteria. Results have shown that to lower current annual costs and environmental impacts, a retrofit of the electric heating system with an air-to-water heat pump is the optimal solution. This solution enables to decrease the annual costs by 11% and to lower the environmental impacts by 51% for the global warming potential (GWP) indicator and 50% for the non-renewable primary energy consumption (CED_{NRE}). In the case where the electric heating system remains unchanged, the renovation of the envelope alone enables to decrease the environmental impacts by 58% for the CED_{NRE} and 51% for the GWP indicator when compared to the building current state. However, the renovation of the thermal envelope, even when subsidies are considered, presents higher annual costs with an increase by 49% when compared to the building current state and 60% when compared to the heating system retrofit solution described earlier. As a result, from an economic point of view, the renovation of the building thermal envelope could be a limiting factor to the energy related renovation due to the high renovation costs of the building elements coupled to the small amount of subsidies. Moreover, no scenario of the building renovation fulfil the requirements of the SIA 2040 (indicative value) for the CED_{NRE} and GWP indicators. Overall, it seems neither easy nor obvious to determine an optimal renovation scenario of a building whatever its type of heating system (electricity or other). It is the constraints linked to the technical, economic and environmental aspects that make this a difficult decision.

Table des matières

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RÉSUMÉ | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| LISTE D'ABRÉVIATIONS | 6 |
| LISTE DES FIGURES | 7 |
| LISTE DES GRAPHIQUES | 7 |
| LISTE DES TABLEAUX | 8 |
| 1 OBJECTIF DU TRAVAIL | 9 |
| 2 INTRODUCTION..... | 9 |
| 3 DESCRIPTIF DU BÂTIMENT | 10 |
| 4 MÉTHODOLOGIE..... | 13 |
| 5 SUBSTITUTION DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE ET DE PRODUCTION D'ECS..... | 14 |
| 5.1 Description des scénarios de substitutions | 15 |
| 5.2 Résultats et analyses des scénarios de substitution | 17 |
| 5.3 Positionnement par rapport à la société à 2'000 Watts | 22 |
| 6 SCÉNARIO DE RÉNOVATION GLOBALE DU BÂTIMENT | 24 |
| 6.1 Rénovation des éléments principaux de l'enveloppe thermique | 24 |
| 6.1.1 Méthodologie | 24 |
| 6.1.2 Description des scénarios de rénovation des éléments de l'enveloppe thermique | 25 |
| 6.1.3 Résultats et analyses des scénarios de rénovation | 32 |
| 6.2 Scénario de rénovation globale du bâtiment | 36 |
| 6.2.1 Méthodologie | 36 |
| 6.2.1 Description des scénarios de rénovation globale du bâtiment | 37 |
| 6.3 Résultats et analyses | 39 |
| 6.4 Positionnement par rapport à la norme SIA 2040 | 43 |
| 7 CONCLUSION | 45 |
| 8 RÉFÉRENCES | 47 |
| 9 ANNEXES..... | 49 |
| Annexe 1 : Coûts annualisés des installations techniques | 49 |
| Annexe 2 : Impacts environnementaux des scénarios de substitution des installations techniques | 52 |
| Annexe 3 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation globale du bâtiment | 53 |
| Annexe 4 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation globale du bâtiment | 56 |

Liste d'abréviations

| | | |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ACV | Analyse de cycle de vie | [-] |
| AE | Air-eau | [-] |
| A _E | Surface de référence énergétique | [m ²] |
| AFD | Administration fédérale des douanes | [-] |
| CECB | Certificat énergétique cantonal des bâtiments | [-] |
| CED | Demande cumulée d'énergie | [MJ/an] |
| CED _{NRE} | Energie primaire non renouvelable | [MJ/an] |
| COP _a | Coefficient de performance annuel | [-] |
| CT | Cahier technique | [-] |
| DV | Double vitrage | [-] |
| ECS | Eau chaude sanitaire | [-] |
| EF _{,hww} | Demande en énergie finale pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire | [MJ/an] |
| Él. | Système de chauffage électrique | [-] |
| EnDK | Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie | [-] |
| EnFK | Conférence des services cantonaux de l'énergie | [-] |
| EPS | Polystyrène expansé | [-] |
| ER | Énergie renouvelable | [-] |
| FB | Fibres de bois | [-] |
| FC | Fibres de cellulose | [-] |
| GES | Gaz à effet de serre | [-] |
| GWP | Potentiel de réchauffement climatique (Global Warming Potential) | [kgCO ₂ -éq/an] |
| HT | Hors taxe | [-] |
| KBOB | Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics | [-] |
| LP | Laine de pierre | [-] |
| LV | Laine de verre | [-] |
| M | Mazout | [-] |
| MoPEC | Modèle de prescriptions énergétiques des cantons | [-] |
| MP | Minergie-P® | [-] |
| PB | Programme Bâtiments | [-] |
| PUR | Polyuréthane | [-] |
| PV | Panneaux solaire photovoltaïque | [-] |
| Q _h | Besoin d'énergie utile pour le chauffage | [MJ/an] |
| R | Radier | [-] |
| ReLATeC | Règlement d'exécution de la loi sur l'aménagement du territoire et les constructions du canton de Fribourg, du 1er décembre 2009 | [-] |
| REne | Règlement sur l'énergie du canton de Fribourg, du 5 mars 2001 | [-] |
| rez | Rez-de-chaussée | [-] |
| ST | Solaire thermique | [-] |
| TTC | Toutes taxes comprises | [-] |
| TV | Triple vitrage | [-] |
| U | Coefficient de transmission thermique | [W/(m ² K)] |
| VI | Valeurs indicatives norme SIA 2040 | [-] |

Liste des figures

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Situation géographique du bâtiment | 10 |
| Figure 2 : Façade sud-est | 11 |
| Figure 3: Façades sud-est et nord-est | 11 |
| Figure 4: Intercalaire du vitrage : mastic à gauche et aluminium à droite..... | 11 |
| Figure 5: Radiateurs électriques | 11 |
| Figure 6: Chauffe-eau électrique..... | 12 |
| Figure 7: Cuisine du rez-de-chaussée | 12 |
| Figure 8: Salle de bain | 12 |
| Figure 9: Méthodologie pour la détermination du scénario optimal | 21 |
| Figure 10 : Zone chauffée avant et après rénovation | 25 |
| Figure 11 : Méthode pour la détermination du scénario optimal de rénovation des éléments de construction | 32 |

Liste des graphiques

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graphique 1 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation selon le type d'installations techniques (sans les coûts externes) | 17 |
| Graphique 2 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation des installations techniques (avec les coûts externes) | 18 |
| Graphique 3 : Répartition des coûts annualisés du capital pour les installations techniques | 19 |
| Graphique 4 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation des installations techniques. | 20 |
| Graphique 5 : Couplage coûts annualisés et impacts environnementaux (CED _{NRE} et GWP) | 21 |
| Graphique 6 : Positionnement des scénarios de rénovation des installations techniques par rapport à la valeur indicative totale du CT SIA 2040 [12], CED _{NRE} à gauche et GWP à droite | 23 |
| Graphique 7: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade compacte en maçonnerie, à gauche CED _{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts | 33 |
| Graphique 8: Variation des coûts (à gauche) et des impacts environnementaux (CED _{NRE} , à droite) en fonction de l'épaisseur d'EPS pour le mur de maçonnerie | 34 |
| Graphique 9: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade ventilée, à gauche CED _{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts | 35 |
| Graphique 10 : Détermination du scénario optimal de rénovation de la toiture, à gauche CED _{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts | 35 |
| Graphique 11: Coûts annualisés des scénarios de rénovation globales comparés au bâtiment dans son état actuel (sans coûts externes) | 40 |
| Graphique 12 : Impacts environnementaux (CED _{NRE} et GWP) des scénarios globaux de rénovation du bâtiment | 42 |
| Graphique 13 : Coûts annualisés vs Impacts environnementaux des scénarios globaux de rénovation | 42 |
| Graphique 14 : Positionnement des scénarios globaux de rénovation par rapport à au CT SIA 2040 | 43 |

Liste des tableaux

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Durée de vie des éléments de construction et des installations techniques..... | 14 |
| Tableau 2 : Coûts et variation annuelle de l'énergie | 15 |
| Tableau 3: Consommations d'énergie utile pour l'évaluation des scénarios de rénovation | 15 |
| Tableau 4 : Scénario de substitution du chauffage électrique direct | 16 |
| Tableau 5 : Rendements et couvertures des scénarios de substitution du chauffage électrique direct | 16 |
| Tableau 6 : Exigences thermiques posées à l'enveloppe du bâtiment pour la rénovation | 24 |
| Tableau 7: Description de la façade compacte avec de l'EPS | 26 |
| Tableau 8: Description de la façade compacte avec isolation en panneaux de fibres de bois | 26 |
| Tableau 9: Description de la façade compacte avec des panneaux de laine de pierre..... | 27 |
| Tableau 10: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade compacte pour les différents types d'isolation selon l'exigence à atteindre..... | 27 |
| Tableau 11: Description de la façade ventilée avec de l'EPS..... | 27 |
| Tableau 12: Description de la façade ventilée avec des panneaux de fibres de bois | 28 |
| Tableau 13: Description de la façade ventilée avec des panneaux de laine de verre..... | 28 |
| Tableau 14: Description de la façade ventilée avec isolation en fibres de cellulose | 29 |
| Tableau 15: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre sur la façade ventilée pour les différents types d'isolation selon l'exigence à atteindre..... | 29 |
| Tableau 16: Description de la toiture avec isolation en PUR..... | 30 |
| Tableau 17: Description de la toiture avec des panneaux de fibres de bois | 30 |
| Tableau 18: Description de la toiture avec des panneaux de laine de verre | 31 |
| Tableau 19: Description de la toiture avec isolation en fibres de cellulose | 31 |
| Tableau 20: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre sur la toiture pour les différents types d'isolation selon l'exigence à atteindre | 32 |
| Tableau 21 : Abréviations utilisée dans l'exploitation des résultats | 33 |
| Tableau 22: Scénarios de rénovation des éléments de construction (façades et toiture) | 37 |
| Tableau 23 : Caractéristiques des fenêtres pour les scénarios de rénovation | 37 |
| Tableau 24: Description du radier avec isolation sous-vide..... | 38 |
| Tableau 25: Scénarios analysés pour la rénovation globale du bâtiment | 38 |
| Tableau 26 : Rendements et couvertures des scénarios de rénovation globale de rénovation du bâtiment..... | 39 |
| Tableau 27: Besoin de chaleur pour le chauffage (Qh) des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment comparés aux exigences SIA 380/1 (Qh,li)..... | 39 |

1 Objectif du travail

La réalisation des lignes directrices de la stratégie 2050 de la Confédération, via le MoPEC [1] et les réglementations cantonales de l'énergie, augmente la pression exercée sur les propriétaires de bâtiments (individuel ou collectif) utilisant l'électricité comme vecteur énergétique pour la production de chaleur pour le chauffage ou la préparation de l'eau chaude sanitaire (ECS).

La substitution du chauffage électrique par un autre système nécessite souvent des investissements conséquents, notamment dans les bâtiments fonctionnant à l'électricité directe (p. ex. avec des ventilo-convecteurs). Dès lors, la question se pose, à long-terme, de savoir si tant économiquement qu'environnementalement il est préférable de substituer le chauffage électrique, de rénover l'enveloppe thermique en conservant le chauffage électrique ou s'il est préférable d'appliquer ces deux mesures conjointement.

2 Introduction

La catastrophe naturelle qui a dévasté la région de Fukushima et les conséquences sur l'environnement qui sont suivies ont été un facteur important dans la décision du Conseil fédéral d'abandonner progressivement la production d'énergie nucléaire en Suisse.

La stratégie énergétique 2050 mise sur pied pour assurer la sécurité de l'approvisionnement de la Suisse après la sortie du nucléaire est définie autour de deux axes, à savoir d'une part des économies d'énergie accrues et d'autre part le développement de la force hydraulique et des nouvelles énergies renouvelables et, au besoin, la production d'électricité à base de combustible fossile ainsi que des importations d'énergie électriques de l'étranger.

Dans le cadre des économies accrues d'énergie de la stratégie énergétique 2050, l'une des mesures est le remplacement des chauffages et chauffe-eaux électriques. Ce système de chauffage représente environ 11% de la consommation nationale d'électricité [2]. La mise en application de cette mesure a été relayée par certains cantons qui l'appliquent alors que d'autres sont en train de prendre les mesures nécessaires pour l'introduire dans leur loi cantonale sur l'énergie.

Si la réalisation de cette mesure dans la théorie semble simple, l'étude de ce bâtiment situé dans le canton de Fribourg à 900 [m] d'altitude démontre qu'avant de penser à la substitution du système de chauffage électrique par un autre, il est nécessaire de s'intéresser au préalable à la localisation du bâtiment (en plaine ou en montagne, en zone urbaine ou en campagne, accessibilité), à la parcelle sur laquelle il se situe (qualité du sous-sol, présence d'une nappe ou protection des aquifères) et au bâtiment en lui-même (orientation, espace disponible) mais également aux personnes qui y habitent (âge, état physique, etc.). Ces facteurs diminuent déjà les possibilités de rénovation, notamment des installations techniques.

Pour ce bâtiment, après avoir examiné ces paramètres dans le cadre du WP3 du projet ECO-Réno - rénovation de l'enveloppe vs rénovation du chauffage [3], il s'avère qu'au vu de sa localisation en altitude, les réseaux de chaleur distance et de gaz naturel ne sont pas applicables. A cela s'ajoute la situation du bâtiment sur un aquifère d'intérêt public, qui rend l'installation d'une pompe à chaleur à sondes géothermiques impossible. En plus d'une situation au fond d'une vallée, l'orientation du bâtiment n'est pas favorable à l'utilisation de l'énergie solaire. De plus, le bâtiment n'offre pas de volumes nécessaires pour accueillir des installations techniques suffisantes pour garantir le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Dès lors, en cas d'utilisation de chauffages à pellets ou à mazout, il est nécessaire de procéder à l'installation de citernes enterrées. Suite à cette analyse, seules les solutions utilisant un chauffage à mazout, un chauffage à pellets ou une pompe à chaleur air-eau sont envisageables dans ce bâtiment. Pour cette dernière solution, il est à noter que la température extérieure est un facteur important ; selon l'altitude du lieu d'exploitation, ce type de PAC ne peut pas toujours être utilisé.

L'étude s'est donc portée en premier lieu sur la comparaison entre les différents systèmes de chauffage possibles par rapport à la situation actuelle du bâtiment selon les points de vue environnementaux, énergétiques et économiques. Cette première étape revenant à répondre à la question : "Est-il plus intéressant de conserver le système existant ou de changer le système de chauffage ?"

Le deuxième axe d'analyse se situant au niveau de la rénovation énergétique du bâtiment sans modification du chauffage électrique existant. Cette analyse permettant de répondre à la question : "Est-il préférable de faire une rénovation énergétique globale du bâtiment en conservant le chauffage électrique actuel ou est-il préférable de changer uniquement le système de chauffage sans toucher à l'enveloppe du bâtiment".

Le dernier point de l'analyse regroupe les conclusions des deux premiers points et permet d'analyser si la rénovation énergétique de l'enveloppe thermique couplée à un changement de systèmes de chauffage est une solution plus viable économiquement, moins néfaste pour l'environnement et moins gourmande en énergie ?

3 Descriptif du bâtiment

Le bâtiment analysé, construit au début des années 80, est une construction de type chalet comprenant un rez-de-chaussée, un étage et des combles partiellement habitables. Il est situé dans le village "Les Sciernes-d'Albeuve" dans le canton de Fribourg en Suisse, figure 1. Le bâtiment se situe à une altitude d'environ 902 [m]. Le bâtiment est orienté nord-est et sud-ouest (figure 1 – carré rouge).

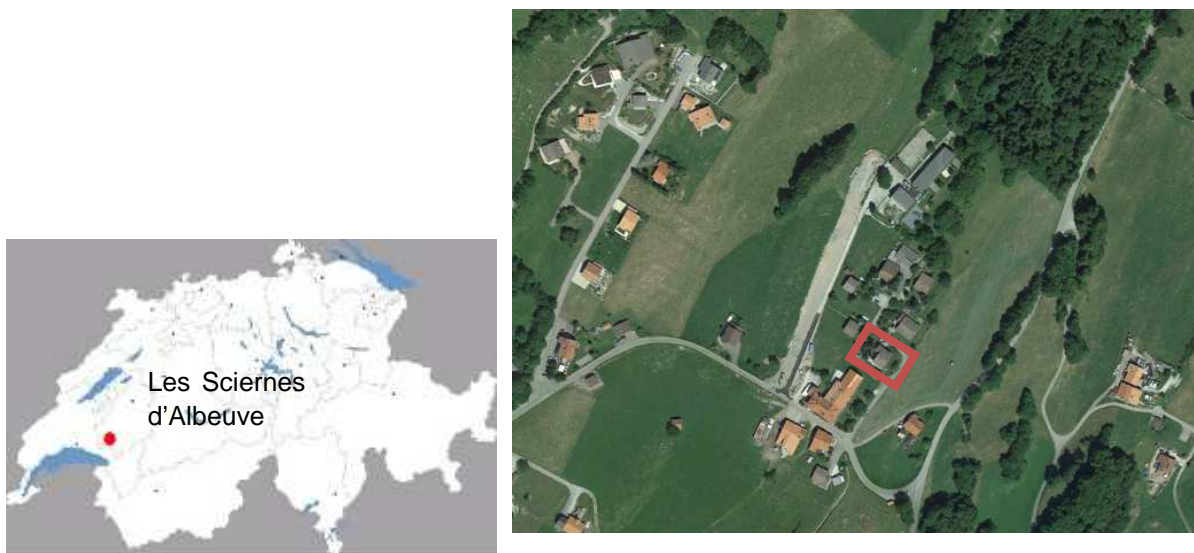


Figure 1: Situation géographique du bâtiment

Le bâtiment est constitué de deux logements, l'un au rez-de-chaussée et l'autre à l'étage (combles compris). Le bâtiment comprend une annexe. Celle-ci est constituée d'un garage, au niveau du rez-de-chaussée, et d'une chambre à coucher au niveau supérieur. Cette pièce à vivre est attenante et fait partie de l'habitat de l'étage.

Le bâtiment a vécu deux périodes de construction : 1981 pour la partie principale du bâtiment et 1990 pour l'annexe.

L'ensemble des façades du rez-de-chaussée est en béton avec une isolation en laine de verre, alors que les façades du 1^{er} étage et des combles sont en structure bois avec une isolation en laine de verre. La toiture inclinée possède également une isolation en laine de verre.

Le radier est en béton.



Figure 2 : Façade sud-est



Figure 3: Façades sud-est et nord-est

Les fenêtres possèdent un cadre en bois et un double vitrage avec un intercalaire en mastic pour la partie construite en 1981 et en aluminium pour les fenêtres posées ultérieurement dans l'annexe (cf. figure 4). Les portes d'entrée sont en bois.



Figure 4: Intercalaire du vitrage : mastic à gauche et aluminium à droite

Le chauffage est assuré par un système de radiateurs électriques directs avec thermostat permettant la régulation de la température des locaux (cf. figure 5).



Figure 5: Radiateurs électriques

L'eau chaude sanitaire est fournie par 2 boilers : l'un de 250 litres pour le rez-de-chaussée; l'autre de 280 litres pour l'appartement de l'étage. La température de chauffe est d'environ 55°C (cf. figure 6).



Figure 6: Chauffe-eau électrique

Les cuisines du rez-de-chaussée et de l'étage sont équipées d'un réfrigérateur, d'une cuisinière avec plaques et four et d'une hotte d'aspiration.



Figure 7: Cuisine du rez-de-chaussée

Les toilettes et les salles de bains sont pourvues de fenêtres et n'ont pas de système de ventilation (cf. figure 8).



Figure 8: Salle de bain

Une seule machine à laver le linge est utilisée pour les deux appartements. Il n'y a pas de sèche-linge.

Le bâtiment utilise uniquement de l'électricité pour tous les postes de consommation. Le bâtiment n'est pas pourvu de compteur individuel pour la consommation d'électricité. Il existe donc une seule valeur globale de consommation annuelle d'électricité pour l'ensemble du bâtiment.

4 Méthodologie

La démarche de rénovation de ce bâtiment s'articule autour de deux axes :

- I. Substitution du système de chauffage et de production d'ECS en conservant l'enveloppe thermique actuelle
- II. Rénovation de l'enveloppe thermique et/ou substitution des installations techniques de chauffage et de production d'ECS.

L'étape commune à ces deux axes consiste à créer un modèle de base, représentant le bâtiment actuel, selon la norme SIA 380/1 [4] en mode optimisation-comparaison avec le logiciel Lesosai 7.4 (version 869) [5]. Ce modèle de base est réalisé sur la base des plans, de documents d'archive, de la norme SIA 381/1 [6] et de visites du bâtiment. Une correction météorologique de la température extérieure selon la norme SIA 381/3 [7] a dû être faite afin d'adapter les températures extérieures de la station météorologique de référence au lieu du bâtiment. De plus, l'utilisation (taux d'occupation) des locaux du rez-de-chaussée et de l'étage étant différente, le bâtiment a été réalisé en deux zones chauffées ceci afin d'adapter le besoin de chaleur pour le chauffage de l'appartement du rez-de-chaussée. Le bâtiment étant équipé d'un seul compteur d'énergie électrique pour l'ensemble du bâtiment, les différents postes de consommation ont été évalués sur la base des normes SIA 380/4 [8] et SIA 385/3 [9] et sur la base du cahier technique (CT) SIA 2024 [10]. Le modèle a été validé en comparant les résultats obtenus aux données de consommation réelle d'électricité du bâtiment. Ce modèle de base permet d'évaluer l'influence des différents scénarios de rénovation sur la demande en énergie finale ($E_{F,hww}$), la consommation d'énergie primaire non-renouvelable (indicateur CED_{NRE}), le potentiel de réchauffement climatique (indicateur GWP) et les coûts.

La détermination du scénario optimal de rénovation des installations techniques de production de chaleur pour le chauffage et l'ECS (axe I) se base sur la comparaison conjointe des performances environnementales et économiques de différents scénarios de substitution du système actuel (chauffage électrique direct). Pour chaque scénario, les coûts des installations techniques (fourniture et pose) et les coûts d'entretien ont été définis sur la base d'offres et d'estimations fournies par des entreprises du domaine. La taxe CO_2 a été définie en considérant les montants définis pour chaque vecteur énergétique par l'Administration fédérale des douanes (AFD). Les subventions cantonales ont été considérées. Les coûts de l'énergie ont été définis selon les tarifs des fournisseurs locaux (électricité), l'indice des prix à la consommation¹ (mazout) et le site internet prixpellets.ch (pellets de bois). Les impacts environnementaux ont été définis sur la base de données de la KBOB [11].

Dans le cadre de l'axe II du projet, différents scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment (toiture et façades) ont été définis. Pour chacun de ces scénarios de rénovation et pour chaque élément de construction, les résultats définis par Lesosai 7.4 (valeur du coefficient de transmission thermique et impacts environnementaux), coûts de réalisation² et subventions fédérales et cantonales susceptibles d'être revendiquées ont été comparés. Cette évaluation préliminaire, au niveau des éléments de construction, a permis de définir un scénario global de rénovation du bâtiment.

Finalement, c'est sur la base de ce scénario global de rénovation du bâtiment que plusieurs paramètres ont pu être évalués, ceci à l'échelle globale du bâtiment. Il s'agit de l'influence du double ou du triple vitrage, de la nécessité de procéder à la rénovation (lourde) du radier et de l'influence de la modification du système de chauffage (tiré de l'analyse faite dans l'axe I).

De plus, les performances environnementales obtenues au travers des différentes analyses sont comparées aux valeurs indicatives du CT SIA 2040 [12] pour les indicateurs CED_{NRE} et GWP.

La méthodologie choisie pour l'évaluation des impacts environnementaux est compatible avec le standard Minergie®-ECO [13] et conforme au CT SIA 2032 [14].

¹ IPC, prix moyens annuels pour 100 l de mazout pour des quantités types, période 2000-2014, OFS

² Les coûts de rénovation des éléments de construction se basent sur les informations fournies par Swisspor dans le cadre du volet 2 du projet "ECO-Reno" [24], des fournisseurs de matériaux, d'architectes, de constructeurs et de la Série de prix pour travaux du bâtiment et génie civil du canton de Vaud [25]. Le coût de l'électricité a été défini selon les tarifs du fournisseur local.

La durée de vie du bâtiment utilisée pour l'évaluation des coûts et des impacts environnementaux est de 60 ans. Cette durée de vie permet de prendre en compte les remplacements futurs. Les durées de vie des installations techniques et des matériaux de l'enveloppe thermique sont conformes au CT SIA 2032 (cf. tableau 1). Signalons que ces durées sont également utilisées pour calculer les facteurs d'annuités dans la détermination des coûts.

| Éléments de construction et installations techniques | Durée de vie [an] |
|------------------------------------------------------|-------------------|
| Toiture | 40 |
| Façade compacte | 30 |
| Façade ventilée | 40 |
| Mur contre non-chauffé | 30 |
| Plancher contre non-chauffé | 30 |
| Radier | 60 |
| Fenêtres | 30 |
| Chaudière + installation solaire | 20 |
| Distribution de chaleur | 30 |
| Ventilation | 30 |
| Isolation du pied de façade | 30 |
| Balcons | 40 |
| Éléments existants supprimés | 60 |

Tableau 1: Durée de vie des éléments de construction et des installations techniques

Quatre remarques sont apportées au tableau 1 :

- La rénovation du radier est une rénovation lourde et contraignante pour les habitants. Il est donc considéré que le radier a la même durée de vie que le bâtiment ;
- L'isolation du pont thermique du pied de façade a une durée de vie identique à la façade de maçonnerie du rez-de-chaussée. Une durée de vie différente n'aurait pas de sens d'un point de vue de la mise en œuvre de remplacement ;
- Le balcon est considéré remplacé en même temps que la rénovation de la façade ventilée ;
- Dans le cas de cette étude, les "éléments existants supprimés" concernent les radiateurs électriques existants. Le coût financier de cette suppression est ramené à la durée de l'étude (60 ans) car ils ne sont enlevés qu'une seule fois.

5 Substitution du système de chauffage et de production d'ECS

L'objectif de cette partie de rapport est de déterminer un scénario optimal de substitution du système de chauffage tout en conservant l'enveloppe thermique du bâtiment dans son état actuel. Il s'agit de comparer, tant d'un point de vue des coûts que des impacts environnementaux, différents scénarios de rénovation du système de production et de distribution de chaleur pour le chauffage et l'ECS.

Les coûts des différents scénarios ont été évalués sur la base d'estimations faites par des prestataires de service, des fournisseurs et le tableur excel du WWF [15]. Tous les coûts sont annualisés. Des facteurs d'annuités ont été définis pour les coûts d'investissements selon la norme SIA 480 [16] en considérant un taux d'intérêt réel à 3.25% sur une période de calcul équivalent à la durée de vie des installations techniques selon le CT SIA 2032 [14] (cf. tableau 1).

Les coûts d'investissement pour la production et la distribution de chaleur, les coûts de l'énergie finale consommée y compris la variation annuelle (cf. tableau 2), les coûts d'entretien de l'installation, la

taxe CO₂ sur les combustibles fossiles sont pris en compte. Les déductions fiscales liées à l'investissement ne sont pas considérées. Les résultats sont présentés avec et sans coûts externes³.

Les subventions cantonales [17] suivantes sont prises en compte :

- pour la création du réseau hydraulique de distribution de chaleur dans le cadre d'un remplacement du chauffage électrique;
- pour le remplacement de la chaudière électrique;
- pour l'installation solaire thermique;

Les subventions octroyées pour la substitution du chauffage électrique sont considérées une seule fois (investissement initial).

Le tableau 2 regroupe les prix de l'énergie ainsi que leur augmentation respective considérée selon la norme SIA 480 [16].

| Vecteur énergétique | Coût HT [ct/kWh] | Variation annuelle [%] selon SIA 480 |
|--------------------------|------------------|--------------------------------------|
| Électricité ⁴ | 21.21 | 0 |
| Mazout ⁵ | 9.33 | 1.5 |
| Pellets ⁶ | 7.5 | 0.5 |

Tableau 2 : Coûts et variation annuelle de l'énergie

Les impacts environnementaux considèrent :

- Les installations techniques remplacées ou ajoutées
- L'énergie finale consommée

Les scénarios utilisant un chauffage à électricité directe ne considèrent pas d'impacts environnementaux liés à la production et à la distribution de chaleur. Ceux-ci ne sont pas disponibles dans les données d'impacts de la KBOB. Cette hypothèse est justifiée par le fait que l'impact de ces systèmes est faible.

L'énergie finale est déterminée en considérant le besoin de chaleur utile (Q_h) du bâtiment dans son état actuel en mode justificatif SIA 380/1 et un besoin de chaleur utile pour l'ECS de 50 [MJ/m²A_E] selon la norme SIA 380/1 [4] (cf. tableau 3).

| Besoin de chaleur utile pour le chauffage Q_h [kWh/an] | Besoin de chaleur utile pour la production d'ECS [kWh/an] |
|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 31'433 | 2'465 |

Tableau 3: Consommations d'énergie utile pour l'évaluation des scénarios de rénovation

5.1 Description des scénarios de substitutions

Les différents scénarios de substitution du chauffage électrique direct sont répertoriés dans le tableau 4. Les scénarios choisis ont été faits sur la base des analyses faites dans le cadre du WP3 du projet ECO-Réno - rénovation de l'enveloppe vs rénovation du chauffage [18].

³ Coûts externes, définition selon la norme SIA 480 :2004 : « Coûts annuels inhérents à l'exploitation de l'ouvrage, qui n'entrent pas dans les coûts du projet, mais sont à la charge de la collectivité »

⁴ Prix simulé via le simulateur en ligne du distributeur local

⁵ Prix évalué sur les années 2000-13 selon l'Indice des prix à la consommation (IPC) fourni par l'Office Fédéral de la Statistique pour une consommation de 3'001-6'000 litres

⁶ Prix moyen du pellet (405.25 CHF par tonne TTC) pour la période mars 2011 et mars 2013 fourni par le site internet prixpellet.ch

| Postes de consommation | Scénario 1 Él + S | Scénario 2 M. | Scénario 3 Pellets | Scénario 4 PAC AE | Scénario 5 M.+ST | Scénario 6 Pellets+ST | Scénario 7 PAC AE+ST |
|------------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Chauffage | Électricité + PV | Mazout | Pellets | PAC air-eau | Mazout | Pellets | PAC AE |
| ECS | Électricité + solaire thermique | Mazout | Pellets | PAC air-eau | Mazout + solaire thermique | Pellets + solaire thermique | PAC AE + solaire thermique |

Tableau 4 : Scénario de substitution du chauffage électrique direct

Le scénario 2 conserve un système de chauffage électrique couplé à une installation solaire photovoltaïque (PV) pour les besoins de chauffage (compensation d'une partie de la consommation) et avec une installation solaire thermique pour la production d'ECS. L'installation PV couvre 13 % du besoin de chaleur utile pour le chauffage (4'100 [kWh/an] – 34.76 [m²] de panneaux photovoltaïques). De manière à simplifier les calculs, le bilan consommation/production électrique sera établi annuellement. L'installation solaire thermique est dimensionnée avec un taux de couverture solaire annuelle de 60% (5 [m²]). L'appoint nécessaire pour le chauffage et la production d'ECS est assuré par le réseau électrique. Seule la subvention pour l'installation solaire thermique est comptabilisée.

Les scénarios 2 à 7 nécessitent une nouvelle distribution de chaleur et de nouveaux émetteurs de chaleur à eau. L'émission de chaleur, se fait par des radiateurs avec une distribution passant dans le bâtiment. Le nombre total de radiateurs pour le bâtiment est de 8.

Les scénarios 2 et 5 substituent le chauffage électrique direct par une chaudière à mazout à condensation. L'ECS est produite entièrement par la chaudière à mazout dans le cadre du scénario 2 alors que celle-ci est produite pour 60% par du solaire thermique (5 [m²]) pour le scénario 5. Aucune subvention n'est allouée pour le scénario 2 alors que le scénario 5 bénéficie d'une subvention pour l'installation solaire thermique.

Les scénarios 3 et 6 substituent le chauffage électrique direct par une chaudière à pellets. L'ECS est produite entièrement par la chaudière à pellet dans le cadre du scénario 3 alors que celle-ci est produite à 60% par du solaire thermique (5 [m²]) pour le scénario 6. Aucune subvention n'est allouée pour le scénario 3 car la puissance de la chaudière (10 [kW]) est inférieure au seuil de subventionnement (≥ 15 [kW]). Le scénario 6 comprend la subvention pour le solaire thermique.

Les scénarios 4 et 7 substituent le chauffage électrique direct par une PAC air-eau. L'ECS est produite entièrement par la PAC air-eau dans le cadre du scénario 4 alors que celle-ci est assurée pour 60% par du solaire thermique (5 [m²]) pour le scénario 7. Le scénario 4 prend en compte la subvention cantonale pour la PAC air-eau et le bonus pour la réalisation de la distribution hydraulique. Le scénario 7 inclut la subvention pour le solaire thermique.

Le tableau 5 regroupe les rendements (η), le coefficient de performance (COP) pour la PAC air-eau et le taux de couverture (Couv.) des différentes installations techniques.

| Postes de consommation | | Scénario 1 Él + S | Scénario 2 M. | Scénario 3 Pellets | Scénario 4 PAC AE | Scénario 5 M.+ST | Scénario 6 Pellets+ST | Scénario 7 PACAE+ST |
|------------------------|------------|----------------------|------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------------|------------------------|
| Chauffage | η [%] | 100 | 90 ¹⁾ | 75 ¹⁾ | | 90 ¹⁾ | 75 ¹⁾ | |
| | COP [-] | | | | 2.03 ²⁾ | | | 2.03 ²⁾ |
| | Couv. [%] | 87 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ECS | η [%] | 100 | 65 ¹⁾ | 50 ¹⁾ | | 65 ¹⁾ | 50 ¹⁾ | |
| | COP [-] | | | | 2.31 ²⁾ | | | 2.31 ²⁾ |
| | Couv. [%] | 40 | 100 | 100 | 100 | 40 | 40 | 40 |

¹⁾ tiré du cahier technique SIA 2040 [12]

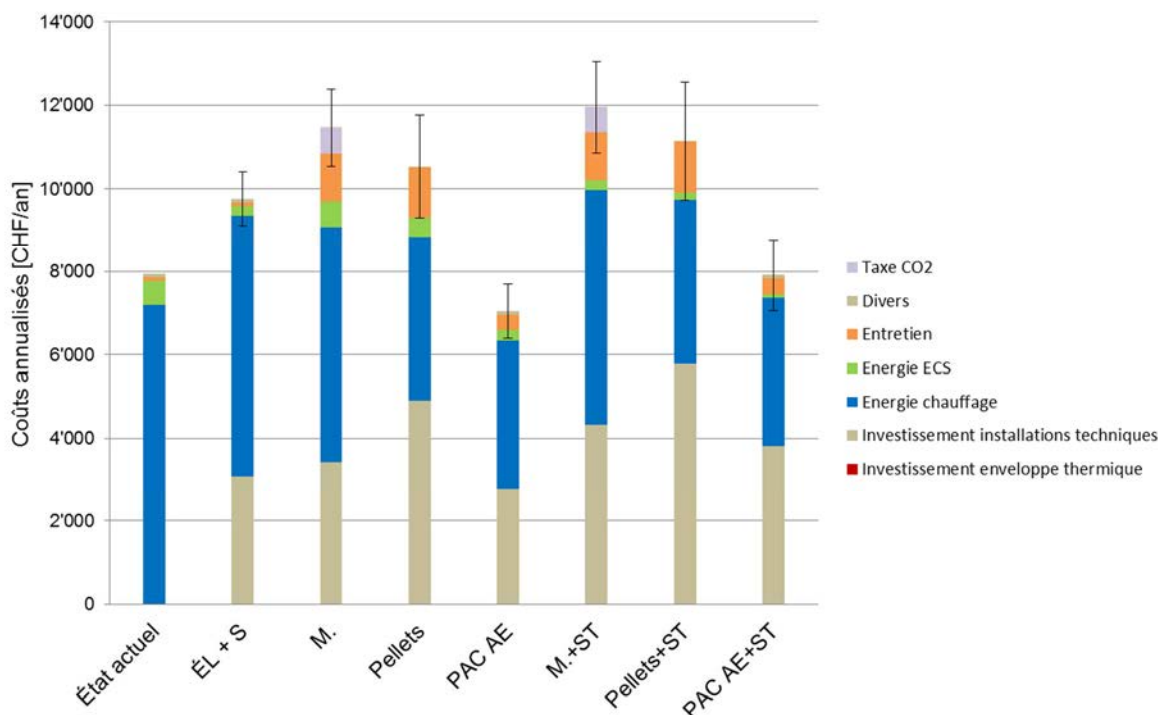
²⁾ Déterminé avec l'outil PACesti [18]

Tableau 5 : Rendements et couvertures des scénarios de substitution du chauffage électrique direct

La part d'électricité provenant des panneaux PV étant pour l'instant négligeable sur le réseau suisse, ce dernier est considéré comme un moyen de stockage. De ce fait, le bilan consommation/production est réalisé sur l'année entière et non mensuellement. Le scénario 1 présente, pour le chauffage, un taux de couverture par l'électricité du réseau de 87% car il est considéré que 13% est couvert par la production photovoltaïque.

5.2 Résultats et analyses des scénarios de substitution

Le graphique 1 présente les coûts annualisés du bâtiment dans son état actuel et les coûts des sept scénarios de rénovation des installations techniques. Une marge d'erreur de 20%⁷ sur les coûts d'investissement des installations techniques (y compris les coûts d'entretien) est visible sur ce graphique (trait noir vertical borné). Les résultats numériques détaillés sont présentés dans l'annexe 1.



Graphique 1 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation selon le type d'installations techniques (sans les coûts externes)

Le graphique 1 montre que :

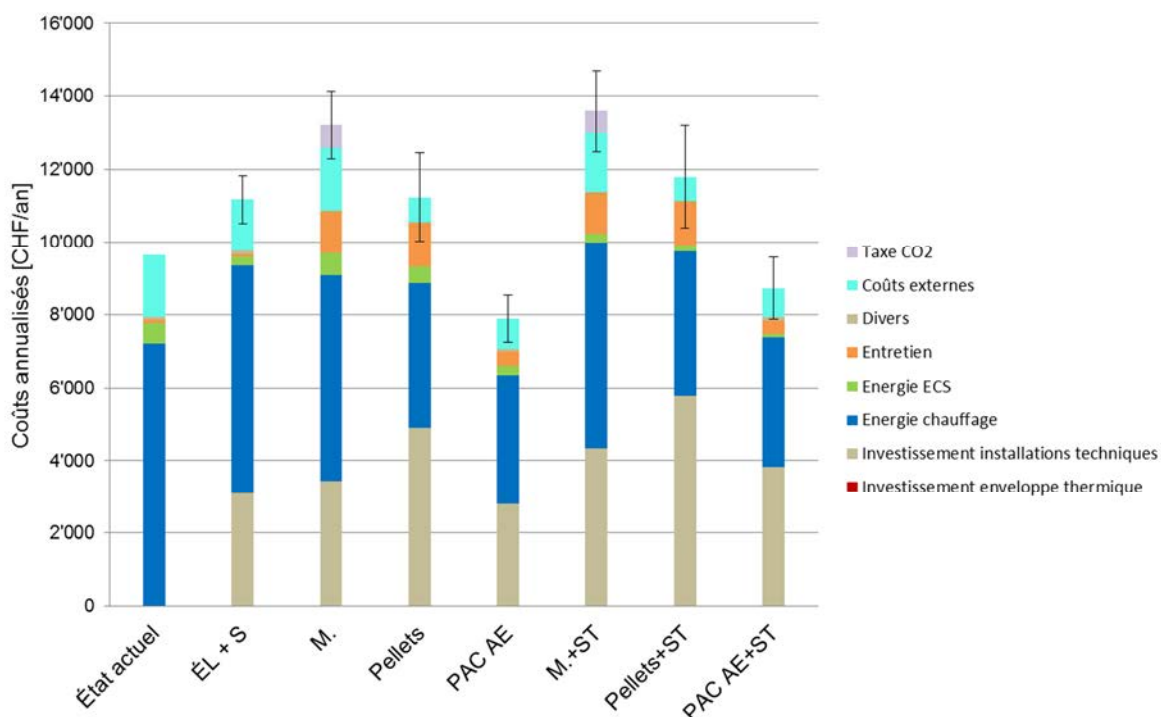
- Seuls les scénarios de substitution par une PAC air-eau présentent des coûts annualisés totaux inférieurs à ceux du bâtiment dans son état actuel ;
- Les scénarios conservant le chauffage électrique ("Él.+S") ou utilisant l'électricité comme vecteur énergétique de chauffage ("PAC AE" et "PAC AE+ST") ont les coûts annualisés les plus faibles, principalement par des coûts d'investissement plus bas pour la rénovation des installations techniques ("Él.+S" et "PAC AE") et des coûts de chauffage également plus bas ("PAC AE" et "PAC AE+ST") ;
- Le coût annualisé lié à la consommation d'énergie de chauffage est diminué par rapport au bâtiment dans son état actuel (de 13% à 51% selon le scénario). Ceci est lié en particulier au coût unitaire du vecteur énergétique. Ce coût représente 35 à 64% des coûts annualisés totaux ;
- Les coûts d'investissement représentent 30 à 52% des coûts annualisés totaux ;
- De fait, les autres coûts sont très faibles par rapport aux coûts annualisés liés à l'énergie de chauffage et aux investissements ;

⁷ cours CRB

- Le gain énergétique total lié à la pose de capteurs solaires thermiques est compris entre 3.9% et 6.3% pour une majoration du capital investi de 18% à 36.4% ;
- L'application d'une marge d'erreur positive de 20% sur les coûts d'investissement, d'entretien et les frais divers augmente encore l'écart entre le coût annualisé total du bâtiment existant et celui des différents scénarios de rénovation (hors "PAC AE") et rapproche le scénario "PAC AE" des coûts annualisés du bâtiment dans son état actuel ;
- Par contre, si cette marge d'erreur tend dans le sens négatif (-20%), les deux scénarios utilisant la PAC air-eau deviennent encore plus avantageux que le bâtiment dans son état actuel.

Sur la base de cette analyse financière, le scénario substituant le chauffage électrique par une PAC air-eau semble être la solution la plus séduisante. En effet, celle-ci présente un coût énergétique faible pour un coût d'investissement réduit. Il ressort également que la pose de capteurs solaires thermiques ou de panneaux photovoltaïques sur un bâtiment mal isolé n'amène que peu de gain énergétique pour un investissement important. Il est donc important d'investir, dans un premier temps, dans des installations techniques permettant la diminution de la consommation d'énergie de chauffage.

Il est également intéressant de comparer ces différentes solutions de rénovation des installations techniques en additionnant les coûts externes (définis selon la norme SIA 480 [16]). Le graphique 2 présente les coûts annualisés des scénarios de rénovation des installations techniques en y additionnant ces coûts externes.



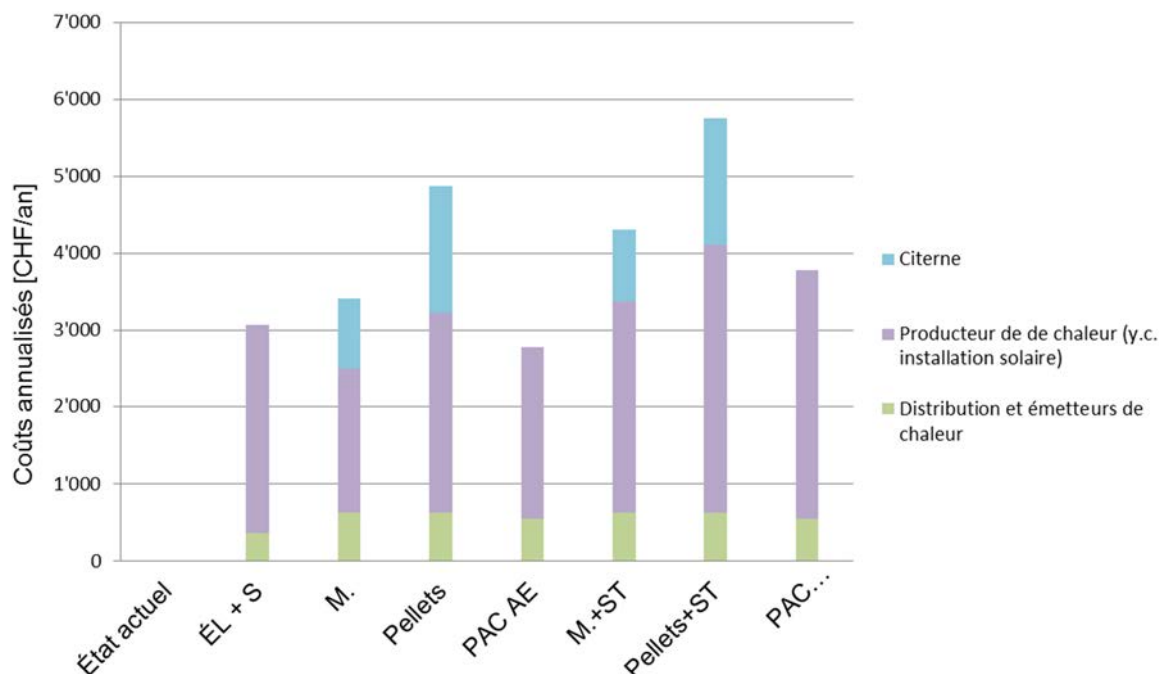
Graphique 2 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation des installations techniques (avec les coûts externes)

Le graphique 2 montre que :

- la prise en compte des coûts externes est favorable uniquement aux scénarios avec une PAC air-eau ou avec une chaudière à pellets. Pour la PAC air-eau, cela est dû à sa faible consommation d'énergie. Pour le pellet, ce faible coût externe est lié au coût externe unitaire (1.5 [ct/kWh] pour le pellet contre 3 [ct/kWh] pour le gaz naturel, 4.5 [ct/kWh] pour le mazout et 5 [ct/kWh] pour l'électricité) ;
- les coûts externes sont différents selon le vecteur énergétique. Pour les scénarios utilisant l'électricité, ils représentent 9 à 13% du coût de l'énergie (chauffage + ECS), pour le mazout, 13% et pour le système à pellets 6%.

En tenant compte des coûts externes, l'attractivité des scénarios "PAC AE" et "PAC AE + ST" est renforcée car ceux-ci minimisent la consommation d'énergie finale du bâtiment.

Le graphique 1 a montré que les coûts d'investissement représentent une part importante des coûts annualisés totaux selon le scénario de rénovation. Le graphique suivant présente la répartition des coûts du capital des différents scénarios.



Graphique 3 : Répartition des coûts annualisés du capital pour les installations techniques

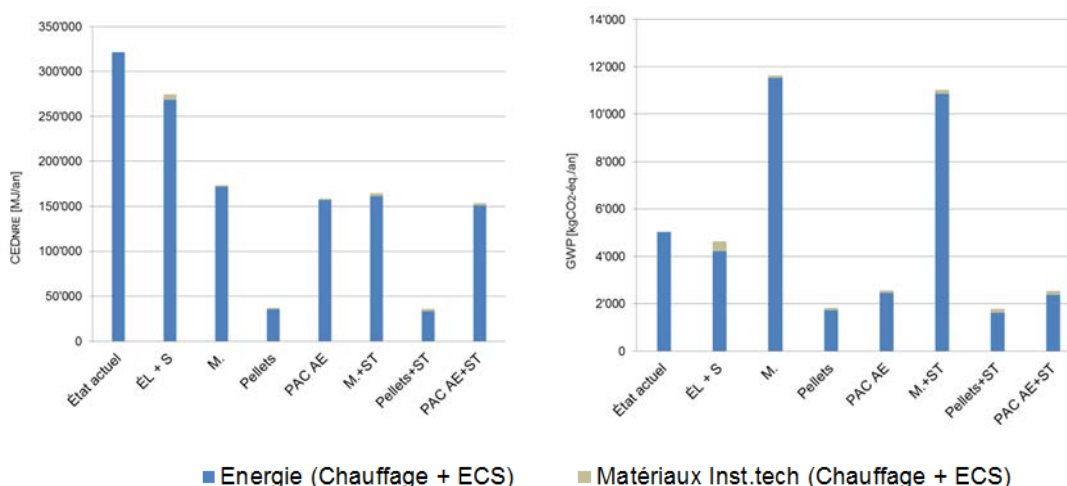
Il ressort du graphique 3 que :

- La solution la plus économe, d'un point de vue des coûts d'investissement, est la substitution du chauffage électrique par une PAC air-eau.
- L'assainissement de la production de chaleur (y compris installation solaire thermique ou PV pour certains scénarios) représente le plus gros poste de dépense (de 53 à 87% selon le scénario) ;
- La réalisation d'un réseau hydraulique de distribution (émetteurs compris) représente 12 à 20% des coûts annualisés totaux ;
- L'installation solaire thermique et/ou PV augmente les coûts de la production de chaleur de 25 à 32% ;
- La mise en place d'une citerne enterrée péjore les scénarios à mazout et pellet. La citerne représente entre 21 et 34% des coûts annualisés selon le scénario ;
- Le scénario couplant chauffage électrique et système solaire ("ÉL.+S") présente des coûts d'investissement plus faible que la solution de substitution du chauffage électrique par une PAC air-eau couplé à une installation solaire thermique ("PAC AE+ST"). Il a été présenté dans l'analyse considérant les coûts d'exploitation (cf. graphique 1) que la solution "PAC AE+ST" présentait des coûts annualisés inférieurs à la solution "ÉL + S". Cela montre qu'il est important de considérer l'ensemble des coûts et non uniquement les coûts d'investissement dans le cadre d'une rénovation d'un habitat individuel.

D'un point de vue économique, les précédentes analyses montrent que la meilleure solution de substitution du chauffage électrique actuel revient à remplacer un chauffage électrique par une PAC air-eau fonctionnant également avec de l'électricité.

L'analyse des impacts environnementaux de chaque scénario présente d'autres conclusions. Le graphique 4 illustre les résultats obtenus pour les deux indicateurs retenus à savoir l'énergie primaire

non-renouvelable (CED_{NRE}) à gauche et le potentiel de réchauffement climatique (GWP) à droite. Les résultats numériques détaillés sont présentés dans l'annexe 2.



Graphique 4 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation des installations techniques

Le graphique 4 montre que :

- Pour l'indicateur CED_{NRE} , l'ensemble des scénarios de rénovation des installations techniques présente des impacts environnementaux plus faibles que ceux du bâtiment dans son état actuel ;
- Pour l'indicateur GWP, à l'exception des scénarios utilisant le mazout comme vecteur énergétique, tous les scénarios présentent un impact environnemental plus faible que celui du bâtiment dans son état actuel. Le mazout est doublement pénalisé par rapport à l'électricité pour cet indicateur : premièrement son impact unitaire et deux fois plus élevé que pour l'électricité et deuxièmement, le rendement des chaudières à mazout est inférieur à celui des systèmes de chauffages électriques (90% pour le chauffage et 65% pour l'ECS contre 100% pour l'électricité) ;
- l'impact environnemental de l'énergie consommée représente 90% des impacts environnementaux totaux, ceci quel que soit l'indicateur observé ;
- Selon les deux indicateurs, le système de chauffage à pellets présente les impacts les plus faibles, ceci malgré un rendement de l'installation technique peu favorable (75% pour le chauffage et 50% pour l'ECS).

Les différents scénarios de rénovation des installations techniques peuvent être représentés sur un système d'axes avec en abscisse les coûts et en ordonnée les impacts environnementaux. La figure 9 présente la méthodologie de cette approche. La méthodologie utilise le bâtiment actuel (scénario de référence) comme base de comparaison pour les autres scénarios. Il s'agit donc d'évaluer le positionnement des différents scénarios par rapport à ce scénario de référence. Ce scénario de référence est caractérisé par un impact environnemental I_r et par un coût C_r . Ces deux paramètres représentent respectivement les axes horizontal et vertical qui permettent de découper l'espace autour du scénario de référence en cadrans.

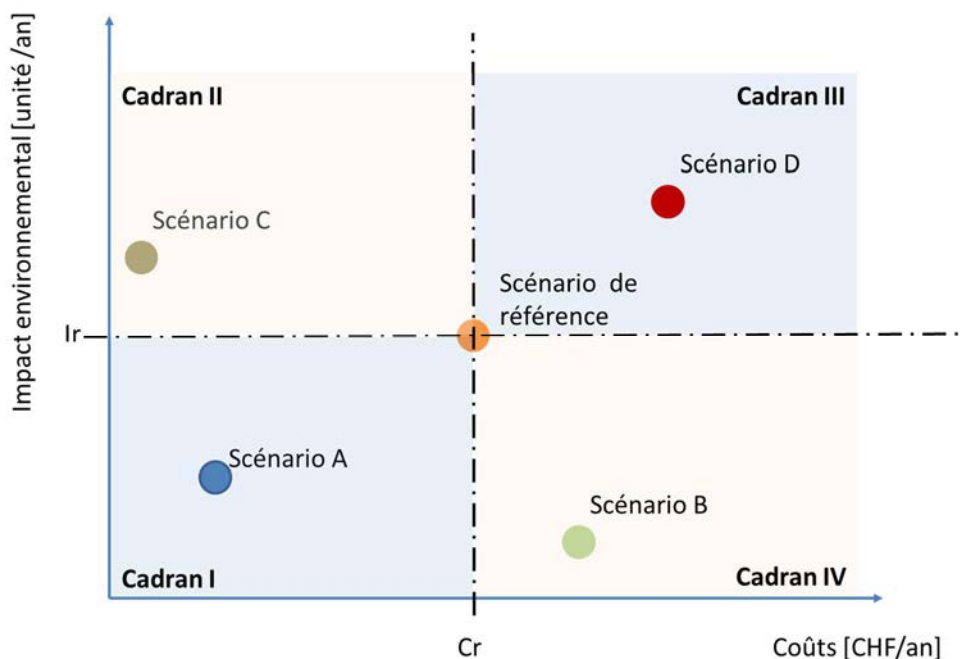
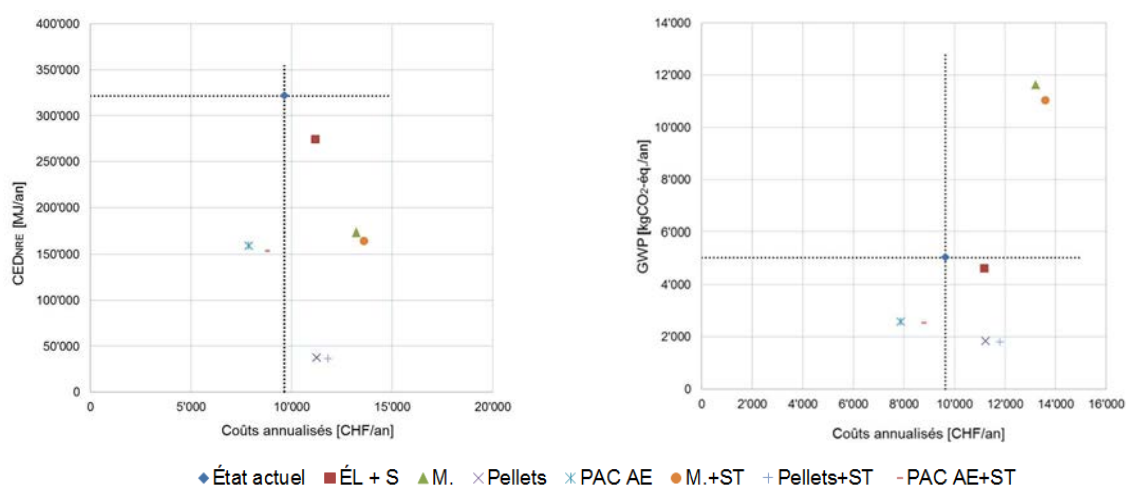


Figure 9: Méthodologie pour la détermination du scénario optimal

Les cadrans représentent des situations bien précises par rapport au scénario de référence :

- le cadran I : situation avec un impact environnemental et économique plus faible que la référence ;
- le cadran II : situation dans laquelle l'impact environnemental est plus élevé que pour le scénario de référence, mais avec des coûts moins importants ;
- le cadran III : situation où les impacts environnementaux et les coûts sont plus élevés que le scénario de référence ;
- le cadran IV : situation avec un impact environnemental moindre que la référence mais avec des coûts plus élevés.

Cette approche permet de recouper les graphiques précédents dans le graphique 5 avec à gauche, CED_{NRE} vs coûts annualisés et à droite GWP vs coûts annualisés.



Graphique 5 : Couplage coûts annualisés et impacts environnementaux (CED_{NRE} et GWP)

Le graphique 5 présente les mêmes résultats que précédemment à savoir que :

- Les solutions substituant le chauffage électrique par une PAC air-eau présentent à la fois des coûts annualisés et des impacts environnementaux plus faibles que le bâtiment dans son état actuel ;
- Les solutions substituant le chauffage électrique par une chaudière à pellets présentent les impacts environnementaux les plus faibles mais un coût supérieur.

5.3 Positionnement par rapport à la société à 2'000 Watts

Le cahier technique (CT) SIA 2040 [12] transcrit les objectifs de la société à 2'000 Watts posés au domaine du bâtiment.

Le CT SIA 2040 fournit des valeurs indicatives (VI) pour les indicateurs CED_{NRE} et GWP, ceci pour les phases "construction", "exploitation" et "mobilité" du bâtiment. Les valeurs indicatives sont données à titre informatives. Seule la somme de ces trois valeurs (construction, exploitation et mobilité) constitue une limite à ne pas dépasser pour que le bâtiment soit conforme aux exigences de la société à 2000 Watts posées au domaine du bâtiment.

- **Construction:** Cette phase comprend la construction du bâtiment, les remplacements et l'élimination du bâtiment en fin de vie. Elle est focalisée sur les matériaux des éléments de construction et des installations techniques. Les impacts environnementaux de cette phase sont calculés sur la base du cahier technique SIA 2032 [14];
- **Exploitation:** La phase "exploitation" est focalisée sur la consommation d'énergie du bâtiment. Les postes de consommation considérés sont la production de chaleur (chauffage et ECS), la ventilation/climatisation, l'éclairage et les équipements d'exploitation. Les impacts environnementaux de cette phase sont calculés sur la base du cahier technique SIA 2031 [19];
- **Mobilité:** Cette phase englobe la mobilité quotidienne liée à l'emplacement du bâtiment. Elle est évaluée sur la base du cahier technique SIA 2039 [20].

L'emplacement du bâtiment ne pouvant être modifié lors d'une rénovation énergétique, seules les phases "construction" et "exploitation" sont évaluées dans cette étude de cas.

Dans notre étude, la détermination de la consommation d'électricité pour les postes autres que le chauffage et l'ECS s'est basée sur les valeurs unitaires par mètre carré fourni dans le CT SIA 2040 [12] chapitres 2.3.4 à 2.3.7. Ainsi, les consommations d'énergie électrique des postes suivants ont été considérées selon la norme :

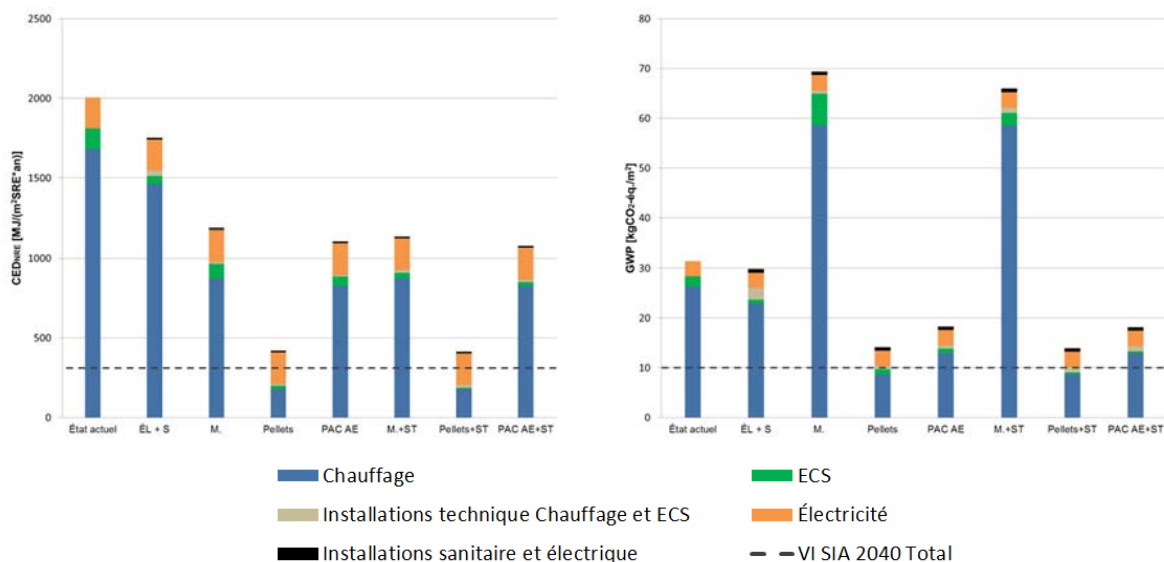
- Auxiliaires pour le chauffage et l'ECS ;
- Eclairage ;
- Equipements d'exploitation

La consommation d'énergie électrique des auxiliaires pour le chauffage et l'ECS est comptabilisée pour toutes les solutions nécessitant la réalisation d'un réseau hydraulique.

Les impacts environnementaux des installations sanitaire et électrique ainsi que de l'énergie électrique consommée sont calculés à partir de la base de données des impacts environnementaux de la KBOB [11].

Les impacts environnementaux de la consommation d'énergie électrique sont comptabilisés pour le bâtiment dans son état actuel, alors que les impacts environnementaux des installations sanitaire et électrique ne sont pas pris en compte car ces installations sont considérées conservées en l'état. Les autres scénarios comptabilisent à la fois les impacts environnementaux de la consommation d'énergie électrique et le remplacement des installations sanitaire et électrique.

Le graphique 6 met en relation les résultats obtenus dans l'étude présentée avec la valeur indicative totale (construction et exploitation) donnée par le CT SIA 2040, ceci pour les indicateurs CED_{NRE} et GWP.



Graphique 6 : Positionnement des scénarios de rénovation des installations techniques par rapport à la valeur indicative totale du CT SIA 2040 [12], CEDNRE à gauche et GWP à droite

Il ressort du graphique 6 que :

- Selon l'indicateur CEDNRE, toutes les solutions permettent de diminuer l'écart avec la valeur indicative totale de la société à 2'000 Watts, mais aucune n'y répond. Il est intéressant de relever que seules les solutions à base de pellets sont proches de la VI totale ;
- Selon l'indicateur GWP, aucun scénario ne répond à la VI totale, même en se focalisant uniquement sur les positions chauffage et ECS ;
- Le poste consommation d'énergie électrique du bâtiment (auxiliaire, ventilation, éclairage et les équipements d'exploitation) engendre entre 11 et 48% des impacts totaux selon l'indicateur CEDNRE et entre 5 et 22% des impacts totaux selon l'indicateur GWP ;
- L'énergie d'exploitation (chauffage, ECS et électricité) engendre entre 93 et 98% des impacts environnementaux totaux selon l'indicateur CEDNRE et 88 à 98% selon l'indicateur GWP ;

Sur la base de ces deux dernières remarques et du positionnement des différents scénarios par rapport à la valeur indicative totale, il semble important, d'un point de vue environnemental, de réduire la consommation du bâtiment en particulier par une amélioration de l'enveloppe thermique, ceci afin de diminuer la consommation d'énergie utile de chauffage.

De plus, la comparaison des différents scénarios par rapport aux valeurs indicatives du CT SIA 2040 montre que le scénario optimal de rénovation ("PAC AE") se situe au-dessus des valeurs indicatives, ceci pour les deux indicateurs. Il semble, dès lors, que pour respecter les VI du CT SIA 2040 la seule substitution du système de chauffage soit insuffisant. La rénovation de l'enveloppe du bâtiment semble nécessaire, ceci au détriment du coût.

6 Scénario de rénovation globale du bâtiment

L'axe II du rapport et décrit dans le présent chapitre concerne la rénovation globale du bâtiment. Ce chapitre se décompose en plusieurs étapes. Dans un premier temps, une analyse détaillée est faite par rapport aux éléments de l'enveloppe thermique du bâtiment, à savoir les façades et la toiture. Cette première analyse permettra de fixer les scénarios optimums de rénovations de ces trois éléments.

Ensuite, avec ces éléments de construction optimums, plusieurs variantes de rénovation globale seront étudiées et comparées. Parmi celles-ci, l'analyse de l'influence d'un double ou d'un triple vitrage, la nécessité de procéder à la rénovation lourde du radier pour finir sur la comparaison entre la rénovation de l'enveloppe avec ou sans rénovation des installations techniques.

6.1 Rénovation des éléments principaux de l'enveloppe thermique

6.1.1 Méthodologie

Les éléments de construction et l'impact des choix de rénovation sur leur valeur du coefficient de transmission thermique (valeur U) est le point de départ de l'analyse. Pour chaque scénario de rénovation, seules les épaisseurs d'isolation permettant de répondre aux valeurs U ponctuelles réglementaires au niveau fédéral (Programme Bâtiments), cantonal (SIA380/1, subventions) et d'association privée (Minergie®) ont été choisies (cf. tableau 6).

| | Exigences (ou recommandations) ponctuelles (valeur U) [W/(m²K)] | | Exigences globales [MJ/(m²·an)] |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------|
| Canton (SIA 380/1) et Minergie® | - Éléments opaques contre l'extérieur ou enterrés à moins de 2 m (toit, murs, sol) | 0.25 | $Q_h \leq 125\%Q_{h,li}^8$ |
| | - Éléments opaques contre non-chauffé ou enterrés à plus de 2 m (mur, sol) | 0.30 | |
| | - Fenêtres et porte-fenêtre contre extérieur | 1.30 | |
| | - Portes contre extérieur | 1.30 | |
| Programme Bâtiments | - Remplacement de fenêtre (intercalaire en plastique ou en acier inoxydable), valeur U du verre | 0.70 | - |
| | - Éléments opaques contre l'extérieur ou enterré à moins de 2 m (toit, murs, sol) | 0.20 | |
| | - Éléments opaques contre non-chauffé ou enterrés à plus de 2 m (mur, sol) | 0.25 | |
| Subvention cantonale additionnelle (VD) | - Toits, murs et sols contre l'extérieur, murs et sols contre terre - enterrés jusqu'à 2 m | 0.15 | |
| | | 0.11 | |
| Minergie-P® | | | $Q_h \leq 80\%Q_{h,li}$ |

Tableau 6 : Exigences thermiques posées à l'enveloppe du bâtiment pour la rénovation

Le label Minergie® n'impose pas d'exigence primaire liée à l'enveloppe du bâtiment, contrairement au label Minergie-P®. Pour le label Minergie®, dans le cas de la rénovation, les exigences cantonales doivent être remplies. Minergie-P® n'impose pas d'exigence ponctuelle, mais impose un besoin de chaleur utile pour le chauffage (Q_h) inférieur ou égal à 80% de la valeur limite SIA ($Q_{h,li}$) (exigence globale) pour un bâtiment neuf. Concrètement, pour atteindre cette exigence globale, les éléments contre l'extérieur doivent s'approcher d'une valeur U de 0.135 [W/(m²·K)].

Les besoins de chaleur utile pour le chauffage (Q_h) sont considérés pour l'évaluation des impacts environnementaux de l'énergie. Le Q_h de la zone chauffée du rez-de-chaussée est considéré pour les murs de maçonnerie. Le Q_h de la zone chauffée de l'étage est pris en compte pour la façade ventilée

⁸ $Q_{h,li}$ représente le besoin de chaleur annuel limite pour le chauffage du bâtiment à construire (construction neuve)

en bois et pour la toiture. La consommation d'énergie électrique finale a été évaluée en prenant un rendement de 100% pour le chauffage électrique.

Le modèle thermique de base du bâtiment et le tracé de l'enveloppe thermique (zone rouge sur figure 10) ont subi des modifications en fonction du scénario de rénovation et de l'épaisseur d'isolation (surface de référence énergétique - A_E -, surface de l'élément de construction, ombrages).

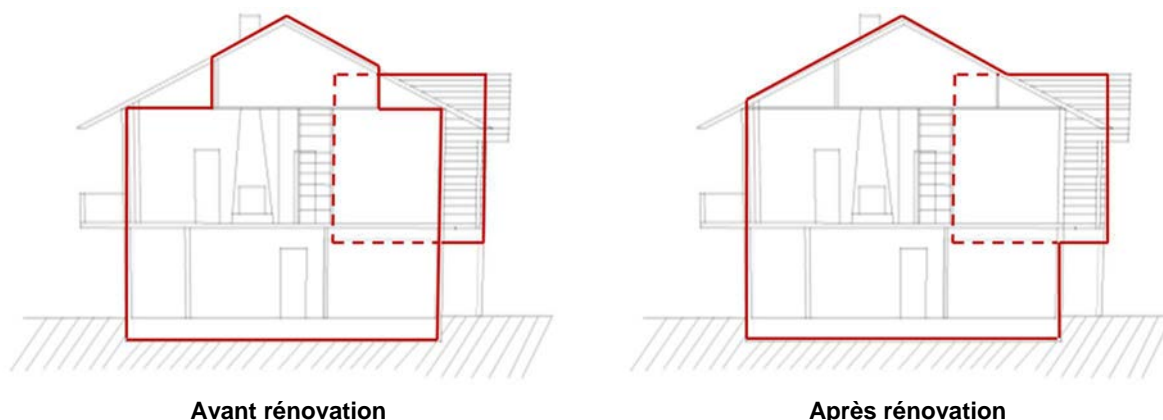


Figure 10 : Zone chauffée avant et après rénovation

Les coûts pris en compte englobent les coûts d'investissement pour la démolition de l'existant devant être changé, les coûts des nouvelles couches de matériaux à mettre en œuvre (fourniture et pose), le coût de la mise en place des échafaudages, les coûts liés aux besoins énergétiques couverts par la consommation d'électricité. Les subventions fédérales ont également été considérées. Les déductions fiscales ne sont pas considérées. Le tarif moyen hors taxe (HT) considéré pour l'électricité est de 21.21 [ct par kWh]⁹. Ce tarif comprend la taxe de base, diverses taxes et la rétribution à Swissgrid. Le canton de Fribourg, à la différence du canton de Vaud, ne distribue pas de subventions cantonales additionnelles en fonction de la performance énergétique - valeur U - des éléments de construction.

Les impacts environnementaux englobent les impacts liés aux nouveaux matériaux de construction mis en œuvre et ceux liés à la consommation d'énergie finale pour le chauffage.

6.1.2 Description des scénarios de rénovation des éléments de l'enveloppe thermique

Plusieurs scénarios de rénovation sont définis pour la toiture et les façades. Pour chaque élément de construction, plusieurs types d'isolants sont étudiés et comparés.

Remarque : Dans les schémas ci-dessous, les nouvelles couches sont représentées en rouge et les couches existantes en noir.

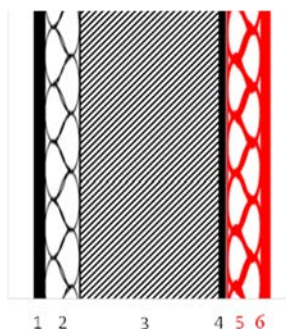
⁹ Tarif déterminé avec le simulateur du Groupe E

6.1.2.1 Façade compacte en maçonnerie crépie

Trois scénarios de rénovation de la façade sont proposés (EPS, fibre de bois et laine de pierre). Aucun de ces scénarios ne nécessite de travaux préparatoires (démolition de l'existant).

Façade compacte en maçonnerie avec isolation en polystyrène expansé (EPS)

La solution est simple. Il s'agit de coller une couche d'isolation sur la façade existante, puis de la crépir.

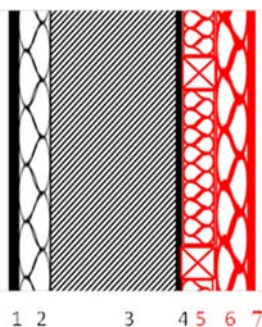


| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|---------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre | 10 | 0.04 |
| 3 | Brique béton | 18 | 0.7 |
| 4 | Crépi | 1 | 0.87 |
| 5 | Polystyrène expansé | variable | 0.031 |
| 6 | Enduit minéral | 1 | 0.87 |

Tableau 7: Description de la façade compacte avec de l'EPS

Façade compacte en maçonnerie avec isolation en fibres de bois

La variante en fibres de bois nécessite de créer un système de coffrage sur la façade existante afin d'y introduire l'isolant. Le coffrage de lattes de 40 [mm] de large est recouvert d'une couche de panneaux isolants rigides qui recevra le crépi.

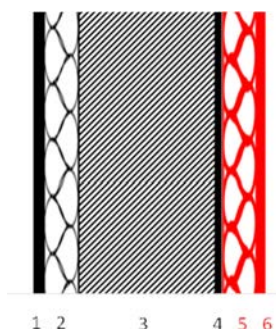


| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre | 10 | 0.04 |
| 3 | Brique béton | 18 | 0.7 |
| 4 | Crépi | 1 | 0.87 |
| 5 | Fibres de bois / Coffrage | variable | 0.038 / 0.13 |
| 6 | Panneaux rigides en fibres de bois | 6 | 0.043 |
| 7 | Enduit minéral | 1 | 0.87 |

Tableau 8: Description de la façade compacte avec isolation en panneaux de fibres de bois

Façade compacte en maçonnerie avec isolation en laine de pierre

Cette variante ressemble à la variante avec l'EPS. Il s'agit de recouvrir (coller) l'ancienne maçonnerie d'une couche de laine de pierre puis d'y ajouter une couche de crépi.



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|-----------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrisage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre | 10 | 0.04 |
| 3 | Brique béton | 18 | 0.7 |
| 4 | Crépi | 1 | 0.87 |
| 5 | Laine de pierre | variable | 0.036 |
| 6 | Enduit minéral | 1 | 0.87 |

Tableau 9: Description de la façade compacte avec des panneaux de laine de pierre

Le tableau 10 présente les épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre pour la façade compacte pour répondre aux exigences sur la valeur U selon le type d'isolant choisi.

| Façade compacte | EPS | | Fibre de bois | | Laine de pierre | |
|--------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|
| Exigence à atteindre | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] |
| SIA 380/1 (SIA) | 3 | 0.25 | - | - | 6 | 0.21 |
| Programme Bâtiments (PB) | 8 | 0.18 | 4 (ép.minimale) | 0.185 | 8 | 0.19 |
| Minergie-P* (MP) | 14 | 0.13 | 14 | 0.13 | 16 | 0.13 |

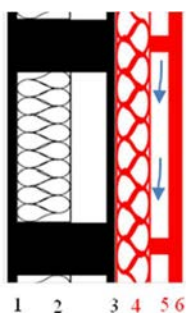
Tableau 10: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade compacte pour les différents types d'isolation selon l'exigence à atteindre

6.1.2.2 Façades ventilées en bois

L'isolation peut se faire soit sur l'existant soit entre les chevrons existants. Quatre scénarios de rénovations sont analysés. Dans chaque variante, le lattage est réalisé avec des lattes de 40/45 [mm]. L'écartement entre les lattes est de 60 [cm].

Façade en bois avec isolation en polystyrène expansé (EPS)

Cette solution, extrêmement simple, consiste à mettre une couche d'isolation sur les lames de chalet existantes, puis à rajouter par-dessus, les couches de lattage et de nouvelles lames de chalet.

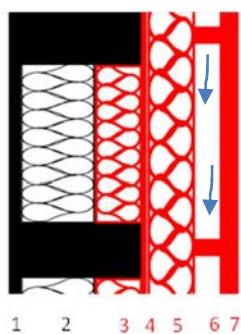


| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|-----------------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrisage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois | 10 / 14 | 0.04 / 0.18 |
| 3 | Lames de chalet | 2.4 | 0.18 |
| 4 | Polystyrène expansé | variable | 0.031 |
| 5 | Lattage bois | 4.5 | 0.13 |
| 6 | Lames de chalet | 2.4 | 0.18 |

Tableau 11: Description de la façade ventilée avec de l'EPS

Façade en bois avec isolation en fibres de bois

Le scénario de rénovation de la façade bois avec une isolation en fibres de bois nécessite le démontage des lames de chalet existantes pour combler l'espace vide par de l'isolant (entre lambourdes) puis l'ajout d'une couche supplémentaire (sur lambourde).



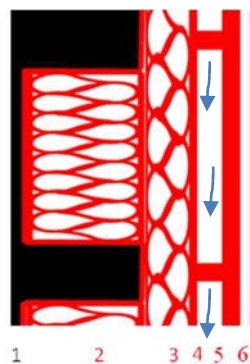
| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|--------------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois | 10 / 14 | 0.04 / 0.18 |
| 3 | Fibres de bois | 4 | 0.038 |
| 4 | Couche d'étanchéité | 0.072 | 0.2 |
| 5 | Fibres de bois | Variable | 0.043 |
| 6 | Lattage | 4.5 | 0.13 |
| 7 | Lames de chalet | 2.4 | 0.18 |

Tableau 12: Description de la façade ventilée avec des panneaux de fibres de bois

Le respect de l'exigence Minergie-P® nécessite la pose d'une épaisseur de 20 [cm] d'isolation (cf. tableau 15). Cette épaisseur doit être faite en deux couches ce qui n'est pas recommandé par les fabricants d'isolants dans cette application. Cette épaisseur ne sera pas conservée pour la suite de l'étude.

Façade en bois avec isolation en laine de verre

Le scénario avec de l'isolation en laine de verre exige non seulement le démontage des lames de chalet existants, mais nécessite également d'enlever la couche d'isolation en laine de verre existante et de compléter le vide par une nouvelle isolation. De plus, une couche d'isolation supplémentaire recouvrant l'ensemble doit être prévue.

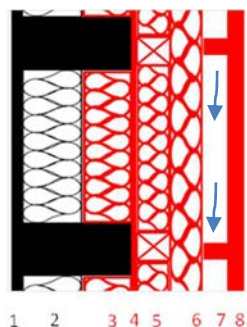


| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|--------------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois | 14 / 14 | 0.035 / 0.18 |
| 3 | Laine de verre | Variable | 0.032 |
| 4 | Coupe-vent à la diffusion | 0.05 | 0.2 |
| 5 | Lattage | 4.5 | 0.13 |
| 6 | Lames de chalet | 2.4 | 0.18 |

Tableau 13: Description de la façade ventilée avec des panneaux de laine de verre

Façade en bois avec isolation en fibres de cellulose

Le scénario avec de la fibre de cellulose ressemble à la variante avec l'isolation en fibres de bois. La différence réside dans l'addition d'une couche de panneaux isolants (pour confiner la fibre de cellulose).



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|--------------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois | 10 / 14 | 0.04 / 0.18 |
| 3 | Fibres de bois | 4 | 0.038 |
| 4 | Couche d'étanchéité | 0.072 | 0.2 |
| 5 | Fibres de cellulose / Coffrage | variable | 0.038 / 0.13 |
| 6 | Fibres de bois | 3.5 | 0.047 |
| 7 | Lattage | 4.5 | 0.13 |
| 8 | Lames de chalet | 2.4 | 0.18 |

Tableau 14: Description de la façade ventilée avec isolation en fibres de cellulose

Une épaisseur de fibres de cellulose inférieure à 10-12 [cm] est déconseillée, même si elle est techniquement réalisable. En effet, l'insufflation dans des volumes aussi petits nécessite la réalisation de nombreux orifices d'insufflation pour garantir une bonne répartition du matériau. Dès lors, seules les variantes avec des épaisseurs égales ou supérieures à 12 [cm] sont conservées.

Le tableau 15 présente les épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre pour toutes les variantes de façades ventilées pour répondre aux exigences sur la valeur U selon le type d'isolant choisi.

| Façade ventilée | EPS | | Fibres de bois | | Laine de verre | | Fibres de cellulose | |
|--------------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Exigence à atteindre | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] |
| SIA 380/1 (SIA) | 6 | 0.215 | 6 | 0.22 | 3 | 0.23 | - | - |
| Programme Bâtiments (PB) | 8 | 0.19 | 8 | 0.2 | 5 | 0.2 | - | - |
| Minergie-P* (MP) | 16 | 0.127 | 20 | 0.13 | 14 | 0.126 | 14 | 0.134 |

Tableau 15: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre sur la façade ventilée pour les différents types d'isolation selon l'exigence à atteindre

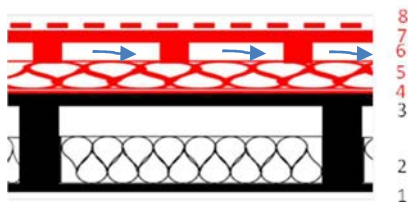
6.1.2.3 Toiture

L'isolation de la toiture peut se faire soit en rajoutant des couches sur l'existant, soit en remplaçant l'ensemble des couches comprises entre chevrons.

Plusieurs types de matériaux isolants sont utilisables dans le cadre de la toiture inclinée : le polyuréthane (PUR), les fibres de bois, la laine de verre et les fibres de cellulose.

Toiture avec une isolation en PUR

Cette variante est réalisée en ajoutant des couches sur l'existant. Une couche de lé de bitume étanche à l'air est posée entre l'ancienne sous-couverture et la nouvelle couche d'isolation. La réalisation de cette rénovation exige le démontage des couches de lattage, contre-lattage et de tuiles pour installer le lé de bitume et la couche d'isolation.

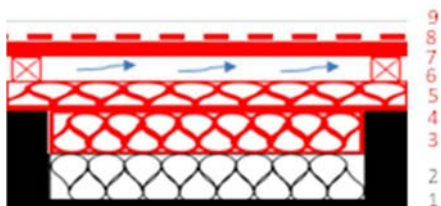


| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|--------------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois | 10/ 16 | 0.04 / 0.18 |
| 3 | Bois | 1.8 | 0.13 |
| 4 | Lé de bitume étanche à l'air | 0.13 | 0.17 |
| 5 | Polyuréthane (PUR) | variable | 0.026 – 0.027 |
| 6 | Lattage | 6 | 0.13 |
| 7 | Contre-lattage | 2.7 | 0.13 |
| 8 | Tuile terre cuite | 2 | 1 |

Tableau 16: Description de la toiture avec isolation en PUR

Toiture avec isolation en fibres de bois

La solution de rénovation de la toiture consiste à ajouter une couche d'isolation sur l'ancienne couche de laine de verre. La solution est présentée dans la figure suivante.



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|--------------------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois | 10 / 16 | 0.04 / 0.18 |
| 3 | Fibres de bois | 6 | 0.038 |
| 4 | Film d'étanchéité à l'air, ouvert à la diffusion | 0.07 | 0.2 |
| 5 | Fibres de bois | variable | 0.043 |
| 6 | Ecran de sous-couverture ouvert à la diffusion | 0.06 | 0.2 |
| 7 | Lattage | 6 | 0.13 |
| 8 | Contre-lattage | 2.7 | 0.13 |
| 9 | Tuile terre cuite | 2 | 1 |

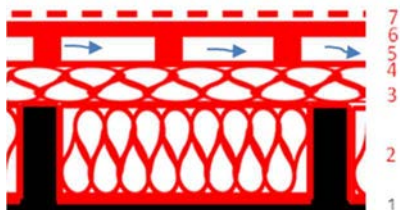
Tableau 17: Description de la toiture avec des panneaux de fibres de bois

Les travaux préparatoires consistent à supprimer les couches de lattage, contre-lattage et de tuiles ainsi que la sous-couverture.

La réalisation d'une épaisseur de 20 cm nécessite l'application de deux couches. Ce type de réalisation à deux couches n'est pas recommandé par les fabricants, il n'est donc pas conservé pour la suite de l'étude.

Toiture avec de la laine de verre

La rénovation de la toiture avec de la laine de verre nécessite d'enlever toutes les couches existantes y compris la couche de laine de verre et de la remplacer par une nouvelle couche de laine de verre. Cette nouvelle couche doit venir à fleur des chevrons, c'est-à-dire à une épaisseur de 16 cm. Une seconde couche de laine de verre vient recouvrir l'ensemble.



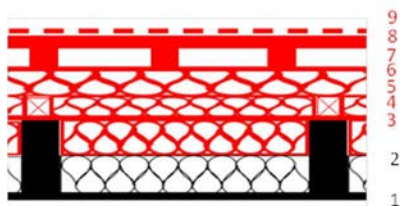
| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois / Pare-vapeur | 10 / 16 / 0.02 | 0.04 / 0.18 / 0.2 |
| 3 | Laine de verre | Variable | 0.035 |
| 4 | Membrane de sous-couverture | 0.08 | 0.2 |
| 5 | Lattage | 6 | 0.13 |
| 6 | Contre-lattage | 2.7 | 0.13 |
| 7 | Tuile terre cuite | 2 | 1 |

Tableau 18: Description de la toiture avec des panneaux de laine de verre

Toiture avec isolation en fibres de cellulose

La solution avec la fibre de cellulose a une base commune avec la solution de rénovation de la toiture avec la fibre de bois.

Cette solution nécessite la réalisation d'un volume de remplissage par la réalisation d'un coffrage par un système de lattage fixé sur les chevrons. La largeur des lattes est de 4 [cm]. La hauteur du lattage varie en fonction de la hauteur de l'isolation à mettre en œuvre. La fermeture du coffrage nécessite l'installation de panneaux rigides en fibres de bois de 3.5 [cm] d'épaisseur. Pour terminer, une couche de lé de sous-toiture ouvert à la diffusion et résistant aux intempéries est posée afin de répondre aux exigences de la norme SIA 232 [21] pour des bâtiments situés à plus de 800 [m] d'altitude.



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.5 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Poutres porteuses en bois / Fibres de bois | 10 / 16 / 6 | 0.04 / 0.18 / 0.038 |
| 3 | Lé d'étanchéité à l'air ouvert à la diffusion | 0.072 | 0.2 |
| 4 | Fibres de cellulose / Coffrage | Variable | 0.038 / 0.13 |
| 5 | Fibres de bois | 3.5 | 0.047 |
| 6 | Écran de sous-couverture ouvert à la diffusion | 0.062 | 0.2 |
| 7 | Lattage | 6 | 0.13 |
| 8 | Contre-lattage | 2.7 | 0.13 |
| 9 | Tuile terre cuite | 2 | 1 |

Tableau 19: Description de la toiture avec isolation en fibres de cellulose

Tout comme pour la façade ventilée, une épaisseur inférieure à 12 [cm] de fibres de cellulose n'est pas recommandée.

Le tableau 20 présente les épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre pour toutes les variantes de toitures pour répondre aux exigences sur la valeur U selon le type d'isolant choisi.

| Toiture | PUR | | Fibres de bois | | Laine de verre | | Fibres de cellulose | |
|--------------------------|---------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Exigence à atteindre | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] | Ep. isolant [cm] | Valeur U [W/(m²K)] |
| SIA 380/1 (SIA) | - | - | 6 | 0.23 | 6 | 0.23 | - | - |
| Programme Bâtiments (PB) | 8 (ép. minimale) | 0.186 | 10 | 0.19 | 10 | 0.19 | - | - |
| Minergie-P® (MP) | 14 | 0.128 | 20 | 0.13 | 20 | 0.13 | 21 | 0.134 |

Tableau 20: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre sur la toiture pour les différents types d'isolation selon l'exigence à atteindre

6.1.3 Résultats et analyses des scénarios de rénovation

6.1.3.1 Démarche pour la sélection des scénarios optimaux

Les résultats pour le mur en maçonnerie (façade compacte), la façade ventilée en bois et la toiture sont présentés ci-dessous. Le scénario optimal de chaque élément de construction sera considéré dans l'étude de la rénovation globale du bâtiment.

Le scénario optimal est défini en mettant en relation les coûts annualisés et les impacts environnementaux de chaque scénario sur un graphique comme montré dans la figure 11 :

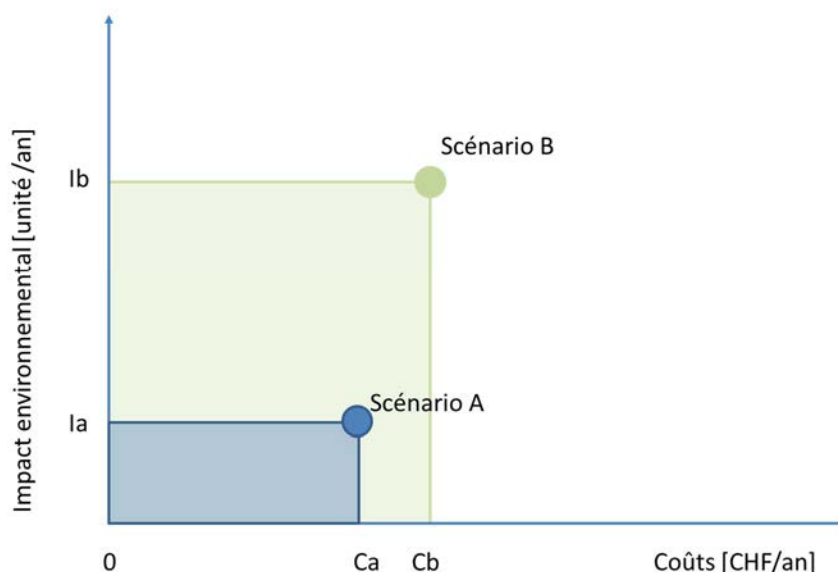


Figure 11 : Méthode pour la détermination du scénario optimal de rénovation des éléments de construction

Le scénario optimal correspond au scénario dont la surface est la plus faible. Dans l'exemple de la figure 11, la surface du scénario A défini par le coût annualisé (C_a) et l'impact annuel (I_a) est plus petite que la surface du scénario B défini par le coût annualisé (C_b) et l'impact annuel (I_b). Le scénario A correspond au scénario optimal.

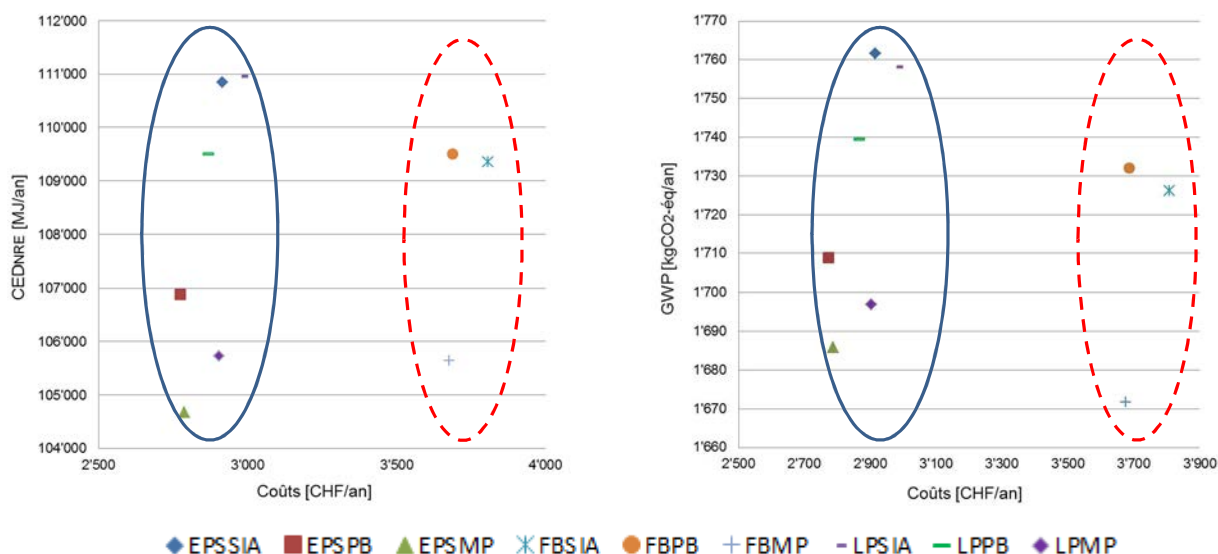
Remarque : Pour chaque élément de construction, les acronymes de chaque scénario sont construits avec l'abréviation de l'isolant couplé à l'exigence thermique. Pour mémoire :

| Nom | Abréviation |
|---------------------|-------------|
| Isolants | |
| Polystyrène expansé | EPS |
| Fibres de bois | FB |
| Laine de pierre | LP |
| Laine de verre | LV |
| Fibres de cellulose | FC |
| Polyuréthane | PUR |
| Exigences | |
| Selon SIA 380/1 | SIA |
| Programme Bâtiments | PB |
| Minergie-P® | MP |

Tableau 21 : Abréviations utilisée dans l'exploitation des résultats

6.1.3.2 Façade compacte en maçonnerie crépie

Le graphique 7 donne les résultats obtenus pour la façade compacte en maçonnerie crépie :



Graphique 7: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade compacte en maçonnerie, à gauche CED_{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts

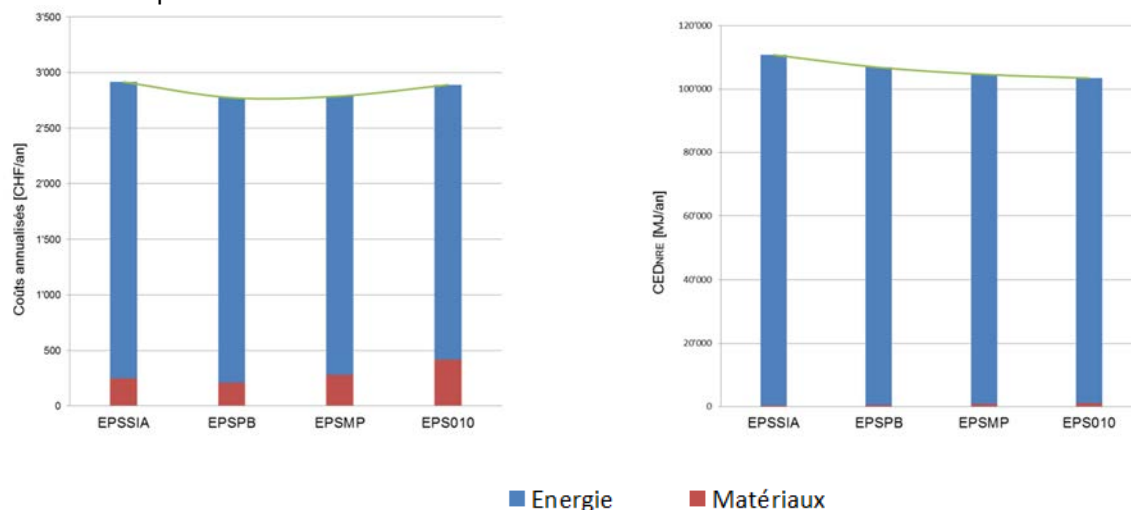
Le graphique 7 montre que :

- Les résultats des différents scénarios se trouvent dans des plages relativement serrées (attention aux graduations des axes qui ne commencent pas à 0) ;
- les scénarios sont répartis en deux groupes distincts. Les scénarios de rénovation avec isolation en fibres de bois (FBPB, FBSIA, FBMP) (zone en trait tillé rouge) et les autres types d'isolants (zone en trait bleu). La différence entre ces deux groupes provient des coûts légèrement supérieurs pour les scénarios utilisant l'isolation à base de fibres de bois (principalement dû aux coûts de la couche de coffrage) ;
- les scénarios répondant aux exigences/recommandations les plus sévères d'un point de vue thermique présentent également les impacts environnementaux les plus faibles. Cela s'explique notamment par la prise en compte de la consommation d'électricité pour le chauffage dans l'analyse.

En appliquant la démarche présentée au Ch.6.1.3.1, le scénario optimal, pour les deux indicateurs, est le scénario à base d'EPS et répondant à l'exigence Minergie-P®, ce scénario sera considéré pour la suite de l'étude.

Le respect d'une exigence ou d'une autre entraîne des épaisseurs d'isolation différentes. Ainsi, les paramètres de calcul du Q_h de la zone chauffée du rez-de-chaussée (A_E , surfaces d'enveloppe et ombrages) sont différents selon l'exigence adoptée.

Une analyse particulière est présentée ci-dessous en se focalisant sur le mur de maçonnerie rénové avec de l'EPS. Le graphique 8 présente les résultats financiers et environnementaux (CED_{NRE}) de la variation de l'épaisseur d'EPS pour ce mur afin d'atteindre des performances énergétiques différentes (SIA, PB, MP et 0.01¹⁰). L'énergie représente le Q_h de la zone chauffée du rez-de-chaussée. Les matériaux représentent les nouvelles couches de matériaux mis en œuvre.



Graphique 8: Variation des coûts (à gauche) et des impacts environnementaux (CED_{NRE} , à droite) en fonction de l'épaisseur d'EPS pour le mur de maçonnerie

Plusieurs remarques peuvent être faites sur la base du graphique 8:

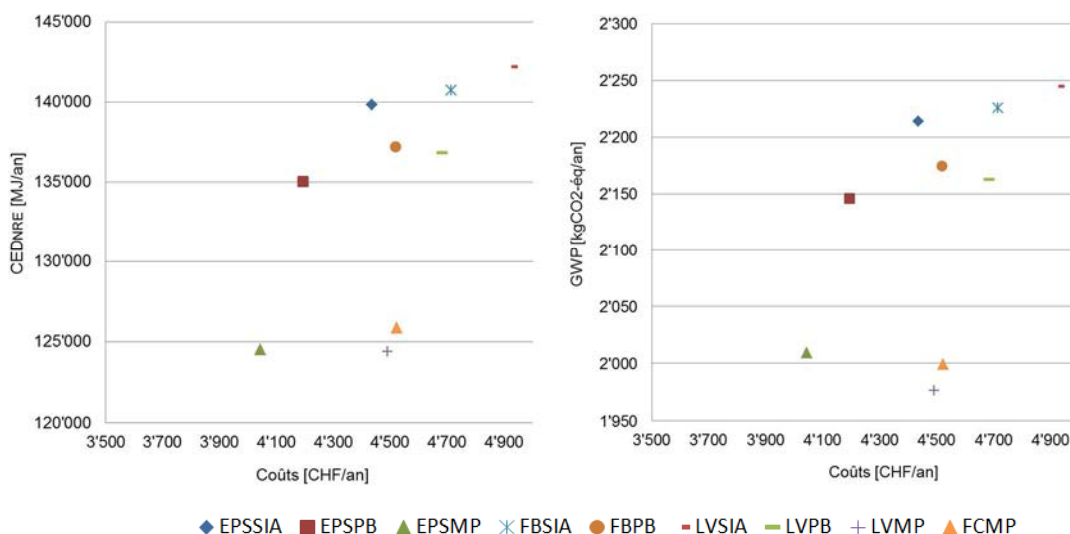
- Les deux représentations montrent une tendance différente. Les coûts annualisés (graphique de gauche) montrent un point d'inflexion (courbe verte) proche de la rénovation répondant au programme Bâtiments, alors que d'un point de vue environnemental (indicateur CED_{NRE}), l'impact diminue continuellement mais s'atténue (courbe verte) en fonction de la valeur U;
- Les coûts liés aux matériaux sont plus faibles pour le scénario EPSPB ce qui démontre l'influence des subventions liées au Programme Bâtiments. Dès que les performances énergétiques augmentent et s'éloignent du niveau de subventionnement, les coûts des matériaux augmentent à nouveau car le subventionnement ne permet plus de contrer les coûts d'investissement. L'octroi de subventions identiques à partir d'une certaine épaisseur d'isolant ne favorise pas les grandes épaisseurs d'isolant. Un système définissant différents seuils de subventionnement en fonction de la performance énergétique (valeur U) favorise la mise en œuvre d'épaisseur d'isolation plus importante (p. ex. canton de Vaud) ;
- L'impact environnemental des matériaux est très faible par rapport à l'impact environnemental de l'énergie. Il est donc important de faire attention au choix du vecteur énergétique pour le chauffage.

Les résultats seraient différents pour un autre bâtiment (type d'isolant, type de façade et vecteur énergétique de chauffage).

¹⁰ Valeur U en $W/(m^2 \cdot K)$, correspondant à une épaisseur d'isolation de 22 [cm]

6.1.3.3 Façade ventilée en bois

Le graphique 9 donne les résultats obtenus pour la façade ventilée en bois :



Graphique 9: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade ventilée, à gauche CED_{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts

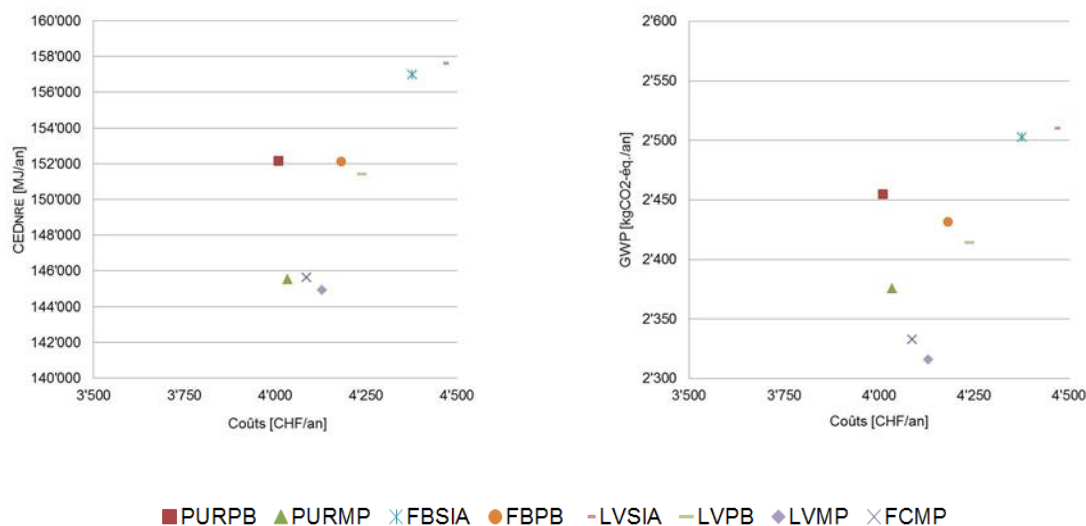
Le graphique 9 montre que :

- L'ensemble des scénarios présente des coûts et des impacts environnementaux proches les uns des autres ;
- Les scénarios répondant à la recommandation Minergie-P® présentent des impacts environnementaux plus faibles que les autres scénarios malgré des impacts liés aux matériaux plus élevés. Cela est dû à une demande plus faible d'énergie pour le chauffage pour répondre à cette recommandation ;

Le scénario optimal est le scénario à base d'EPS répondant à la recommandation thermique Minergie-P®. ceci pour les deux indicateurs environnementaux.

6.1.3.4 Toiture

Le graphique 10 donne les résultats obtenus pour la toiture :



Graphique 10 : Détermination du scénario optimal de rénovation de la toiture, à gauche CED_{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts

Le graphique 10 montre que :

- Les résultats sont proches les uns des autres pour l'ensemble des scénarios ;
- Trois groupes distincts peuvent être définis, en fonction des impacts environnementaux et des coûts. Chaque groupe peut être caractérisé par une exigence ou recommandation selon la performance énergétique :
 - o Le groupe SIA qui présente tant des impacts environnementaux et des coûts les plus élevés ;
 - o Le groupe "Programme Bâtiments" qui présente des coûts et des impacts inférieurs au groupe SIA ;
 - o Le groupe Minergie-P® qui présente des impacts environnementaux les plus faibles alors que les coûts sont les plus bas (à l'exception de la variante PURPB).

Contrairement aux autres éléments de constructions, deux scénarios optimaux ressortent de cette analyse selon l'indicateur considéré. Il s'agit de la variante PURMP pour le CED_{NRE} et de la variante FCMP pour le GWP. Le coût étant légèrement plus bas pour le PUR, c'est cet isolant qui sera considéré pour la suite de l'analyse.

En conclusion à cette première partie de chapitre, les solutions définies comme étant optimales pour les éléments de construction sont l'EPS pour les deux types de façades et le PUR pour la toiture. Les épaisseurs de ces isolants répondent aux recommandations du label Minergie-P®. Ces scénarios seront utilisés dans le scénario de rénovation globale du bâtiment (ch. 6.2).

6.2 Scénario de rénovation globale du bâtiment

6.2.1 Méthodologie

La rénovation globale du bâtiment se fait par étapes et se base sur les résultats du chapitre 5.2 pour les installations techniques et des chapitres 6.1.3.2, 6.1.3.3 et 6.1.3.4 pour l'enveloppe thermique. La rénovation des fenêtres et du radier sont des éléments supplémentaires à considérer. En effet, dans la première partie de l'analyse de l'enveloppe, ceux-ci n'ont pas été considérés car c'est au niveau de la rénovation globale et des performances globales du bâtiment qu'il est intéressant d'observer l'influence de ces deux paramètres.

La surface de référence énergétique varie sensiblement en fonction de la nouvelle épaisseur des murs. La surface de référence énergétique (A_E) totale du bâtiment passe de 177.51 [m²] à 195.6 [m²].

Les hypothèses liés aux coûts sont les mêmes que pour les analyses précédentes (chapitre 5).

Dans le cas de cette rénovation globale, les subventions fédérales et cantonales suivantes sont prises en compte :

- Rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment ;
- Bonus cantonal d'assainissement global de l'enveloppe thermique ;
- Création du réseau hydraulique de distribution de chaleur dans le cadre d'un remplacement du chauffage électrique;
- Remplacement de la chaudière électrique;
- Installation solaire thermique;

Les subventions octroyées pour la substitution du chauffage électrique (au niveau des installations techniques et de l'enveloppe thermique) sont considérées une seule fois (investissement initial).

Les prix de l'énergie ainsi que leur augmentation respective (selon la norme SIA 480 [16]) considérés sont les mêmes que dans le cadre de l'axe I "Substitution du système de chauffage et de production d'ECS".

Les impacts environnementaux considèrent :

- Les couches de matériaux remplacées ou ajoutées
- Les installations techniques remplacées ou ajoutées
- L'énergie finale consommée

L'énergie finale est déterminée en considérant le besoin de chaleur utile (Q_h) des différents scénarios de rénovation selon la norme SIA 380/1 en mode justificatif et un besoin de chaleur utile pour l'ECS de $50 \text{ MJ/m}^2 A_E$ selon la même norme.

6.2.1 Description des scénarios de rénovation globale du bâtiment

Pour rappel, les solutions de rénovation des éléments de l'enveloppe thermique adoptés dans le chapitre 6.1.3 sont résumées dans le Tableau 22.

| Éléments de construction | Type d'isolant | Épaisseur de l'isolation [cm] | Valeur U [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] |
|--------------------------|----------------|-------------------------------|----------------------------------------------|
| Façade compacte | EPS | 14 | 0.132 |
| Façade ventilée | EPS | 16 | 0.126 |
| Toiture | PUR | 14 | 0.128 |

Tableau 22: Scénarios de rénovation des éléments de construction (façades et toiture)

Les fenêtres sont rénovées avec des cadres en bois. L'influence sur le bilan global du bâtiment de la pose d'un double ou d'un triple vitrage est évaluée. Les fenêtres sont conservées à leur position actuelle dans les façades. Les caractéristiques des fenêtres sont données dans le tableau 23.

| Caractéristiques des cadres et vitrages | Double vitrage | Triple vitrage |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|
| Coefficient de transmission thermique du cadre (U_f) [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] | 1.3 | 1.3 |
| Coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g) [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$] | 1 | 0.6 |
| Transmission énergétique perpendiculaire (g_p) [-] | 0.6 | 0.48 |

Tableau 23 : Caractéristiques des fenêtres pour les scénarios de rénovation

La nécessité de rénover le radier est étudiée dans cette partie de rapport. La solution de rénovation énergétique du radier (ensemble du rez-de-chaussée) consiste à utiliser un matériau isolant très performant thermiquement pour un encombrement faible en hauteur (épaisseur max : 35 [mm]). En effet, le radier, dans son état d'origine, contient une isolation EPS de 2 [cm], une chape de 4 [cm] et un carrelage de 0.9 [cm]. L'ensemble de ces couches peuvent être remplacées. Pour atteindre la valeur limite du coefficient de transfert thermique imposée par le canton de Fribourg ($0.25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), la conductivité thermique de l'isolant doit être de $0.0088 \text{ W}/(\text{mK})$. Seuls les isolants sous-vide permettent d'atteindre de tels niveaux de performance.



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Dalle en béton | 20 | 2.1 |
| 2 | Pare-vapeur (feuille PE) | 0.02 | 0.22 |
| 3 | Isolation sous-vide | 3 | 0.007 |
| 4 | Chape à base de résine synthétique | 4.5 | 1.3 |
| 5 | Carrelage | 0.9 | 1.3 |

Tableau 24: Description du radier avec isolation sous-vide

La valeur du coefficient de transmission thermique U du radier rénové atteint 0.22 [W/(m²K)] (valeur supérieure à la valeur limite du Programme Bâtiments (0.20 W/(m²K))).

Les données environnementales n'existent pas pour l'isolation sous-vide. Selon une étude de la FHBB [23], les valeurs d'impacts environnementaux de l'isolation sous-vide sont proches de celles de l'EPS, ces valeurs sont admises pour les calculs.

Compte tenu des considérations faites dans les chapitres précédents, sept configurations ont été retenues pour effectuer l'analyse de la rénovation globale du bâtiment, celles-ci sont résumées dans le tableau 25 et expliquées sous le tableau :

| Scénario | Acronyme | Enveloppe thermique | Type de vitrage | Avec / sans Radier | Installations techniques | Subventions fédérales ou cantonales |
|----------|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Él./Dv | ✓ | Double vitrage | Sans | Chauffage électrique | <ul style="list-style-type: none"> • rénovation de l'enveloppe thermique • bonus d'assainissement global |
| 2 | Él./Tv | ✓ | Triple vitrage | Sans | Chauffage électrique | <ul style="list-style-type: none"> • rénovation de l'enveloppe thermique • bonus d'assainissement global • vitrages |
| 3 | Él./DvR | ✓ | Double vitrage | Avec | Chauffage électrique | <ul style="list-style-type: none"> • rénovation de l'enveloppe thermique • bonus d'assainissement global |
| 4 | Él./TvR | ✓ | Triple vitrage | Avec | Chauffage électrique | <ul style="list-style-type: none"> • rénovation de l'enveloppe thermique • bonus d'assainissement global • vitrages |
| 5 | Él+S/Dv | ✓ | Double vitrage | Sans | Chauffage électrique + solaire (thermique et PV) | <ul style="list-style-type: none"> • rénovation de l'enveloppe thermique • bonus d'assainissement global • installation solaire thermique |
| 6 | PAC AE/- | - | - | Sans | PAC air-eau | <ul style="list-style-type: none"> • substitution du chauffage électrique |
| 7 | PAC AE/Dv | ✓ | Double vitrage | Sans | PAC air-eau | <ul style="list-style-type: none"> • rénovation de l'enveloppe thermique • bonus d'assainissement global • substitution du chauffage électrique |

Tableau 25: Scénarios analysés pour la rénovation globale du bâtiment

Les scénarios 1 à 4 permettent de comparer l'influence des vitrages (double ou triple) et du radier. Pour ces quatre scénarios, la rénovation des éléments opaques de l'enveloppe thermique (façades et toiture) est semblable ainsi que le chauffage par électricité directe (cas de référence). Les scénarios 1 et 2 ne bénéficient pas de la rénovation du radier au contraire des scénarios 3 et 4. Les subventions diffèrent selon le type de vitrage.

Le scénario 5 est semblable au scénario 1 à la différence de la production de chaleur. Dans ce cas, le chauffage électrique est couplé à une installation solaire photovoltaïque (PV) pour les besoins de chauffage (compensation d'une partie de la consommation) et à une installation solaire thermique pour la production d'ECS selon le descriptif du scénario 2 du chapitre substitution du système de chauffage (ch. 5.1).

Les émetteurs de chaleur sont remplacés dans les scénarios 1 à 5.

Le scénario 6 représente uniquement le scénario optimal de rénovation du système de chauffage défini au ch. 5.2. L'enveloppe thermique n'est pas rénovée.

Le scénario 7 correspond au scénario 6 additionné de la rénovation de l'enveloppe (façades et toiture). Le radier n'est pas rénové et des doubles vitrages sont considérés.

Le tableau 26 regroupe les rendements (η), le coefficient de performance (COP) pour la PAC air-eau et le taux de couverture (Couv.) des différentes installations techniques.

| Postes de consommation | | Scénarios 1 à 4 Él./x | Scénario 5 Él+S/Dv | Scénarios 6 et 7 PAC AE/x |
|------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|------------------------------|
| Chauffage | η [%] | 100 | 100 | |
| | COP [-] | | | 2.03 ²⁾ |
| | Couv. [%] | 100 | 72 | 100 |
| ECS | η [%] | 100 | 100 | |
| | COP [-] | | | 2.31 ²⁾ |
| | Couv. [%] | 100 | 40 | 100 |

¹⁾ tiré du cahier technique SIA 2040 [12]

²⁾ Déterminé avec l'outil PACesti [18]

Tableau 26 : Rendements et couvertures des scénarios de rénovation globale de rénovation du bâtiment

La part d'électricité provenant des panneaux PV étant pour l'instant négligeable sur le réseau suisse, ce dernier est considéré comme un moyen de stockage. De ce fait, le bilan consommation/production est réalisé sur l'année entière et non mensuellement. Le scénario 5 présente, pour le chauffage, un taux de couverture par l'électricité du réseau de 72% car il est considéré que 28% est couvert par la production photovoltaïque.

6.3 Résultats et analyses

Une première analyse peut être faite sur les résultats des scénarios 1 à 4. Ainsi, le besoin de chaleur utile pour le chauffage de chaque scénario de rénovation de l'enveloppe thermique est présenté dans le tableau 27.

| Scénarios de rénovation de l'enveloppe | Scénario 1 Él./Dv | Scénario 2 Él./Tv | Scénario 3 Él./DvR | Scénario 4 Él./TvR |
|------------------------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Qh [MJ/m²A _E] | 269.1 | 267.2 | 201.9 | 199.7 |
| Qh,li [MJ/m²A _E] (selon SIA 380/1) | 314.5 | 314.5 | 327.3 | 327.3 |

Tableau 27: Besoin de chaleur pour le chauffage (Qh) des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment comparés aux exigences SIA 380/1 (Qh,li)

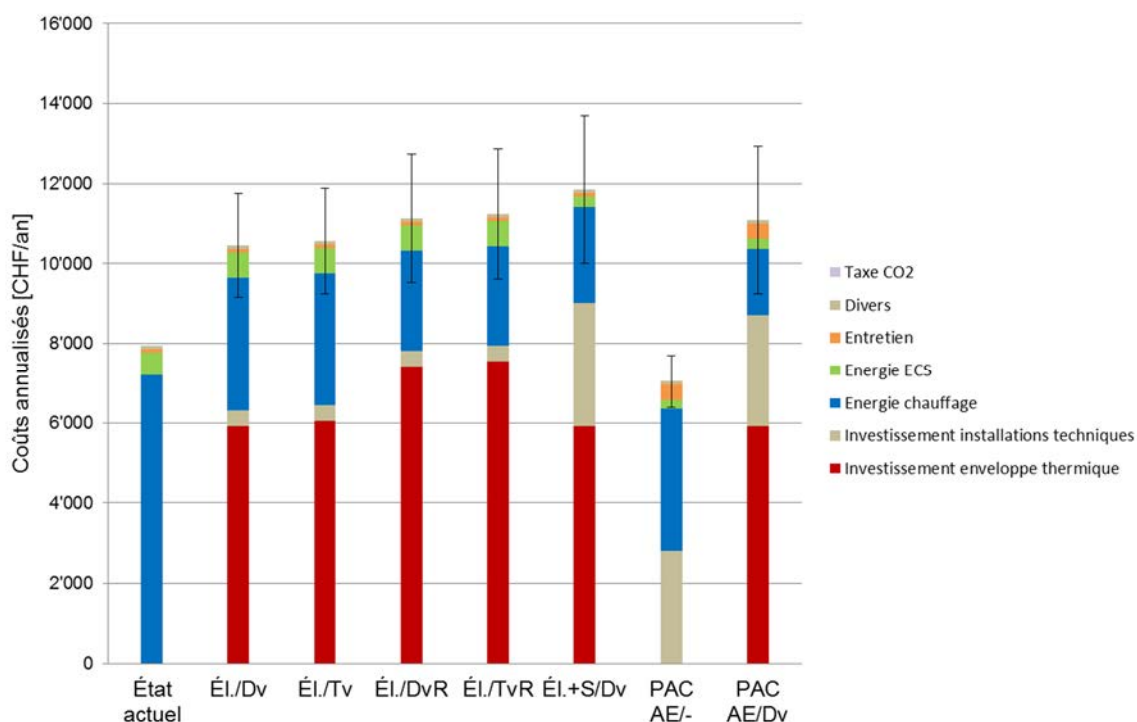
Le tableau 27 montre que :

- l'ensemble des scénarios de rénovation de l'enveloppe répond à l'exigence SIA 380/1 pour la rénovation ;
- Le besoin de chaleur pour le chauffage (Qh) des scénarios de rénovation de l'enveloppe sans le radier "ÉI./Dv" et "ÉI./Tv" se situent environ à 85% de l'exigence de la norme SIA 380/1 alors qu'il se situe à environ 61% de l'exigence lorsque le radier est rénové. Dans ce cas, les valeurs répondent également à l'exigence primaire Minergie-P® posée à l'enveloppe thermique du bâtiment;
- La pose de double ou de triple vitrage n'a que peu d'influence sur les besoins de chaleur pour le chauffage du bâtiment. En effet, les plus grandes déperditions thermiques du double vitrage sont quasiment compensées par des gains solaires supérieurs.

Ces analyses permettent de dire que la rénovation du radier n'est pas nécessaire d'un point de vue thermique pour répondre à la législation. Cependant, sa rénovation permet d'améliorer le Qh d'environ 25%. Ainsi, le choix d'effectuer cette rénovation ou non se basera sur des considérations environnementales, financières et techniques. De même, l'ajout de triple vitrage n'est pas thermiquement intéressant.

Ces considérations ont guidé le choix des scénarios 5 à 7 de la rénovation globale dans lesquels du double vitrage est considéré et aucune rénovation du radier n'est faite.

Le graphique 11 présente les coûts annualisés du bâtiment dans son état actuel et les coûts de tous les scénarios de rénovation. Une marge d'erreur de 20%¹¹ sur les coûts d'investissement (y compris les coûts d'entretien) est visible sur ce graphique (trait noir vertical borné). Les résultats numériques détaillés sont présentés dans l'annexe 3.



Graphique 11: Coûts annualisés des scénarios de rénovation globales comparés au bâtiment dans son état actuel (sans coûts externes)

¹¹ cours CRB

L'analyse du graphique 11 permet de montrer plusieurs points :

- L'ensemble des scénarios incluant une rénovation de l'enveloppe présentent des coûts annualisés totaux supérieurs aux coûts du bâtiment dans son état actuel ;
- La substitution du chauffage électrique par une PAC air-eau sans rénovation de l'enveloppe est la seule solution permettant de diminuer les coûts actuels ;
- L'ensemble des scénarios permettent d'effectuer un gain d'énergie de chauffage par rapport au bâtiment actuel (entre 50 et 77%). Ce gain étant supérieur pour les solutions avec rénovation de l'enveloppe. Par contre, les coûts d'investissement liés à la rénovation de l'enveloppe thermique pèsoient, d'un point de vue financier, ces solutions. Les coûts d'investissement totaux sont deux à trois fois plus élevés ;
- La différence des coûts annualisés entre le double vitrage et le triple vitrage est faible. L'avantage revient au double vitrage, malgré l'octroi de subventions fédérale (30 CHF/m²) et cantonale (35 CHF/m²) et un besoin utile d'énergie pour le chauffage plus faible pour le triple vitrage. La différence provient essentiellement des coûts d'investissement plus élevés pour le triple vitrage ;
- La rénovation supplémentaire du radier augmente les coûts annualisés de 6.5% et ce malgré un besoin d'énergie utile de chauffage moindre (-25%) ;
- L'application d'une marge d'erreur positive de 20% sur les coûts d'investissement, d'entretien et les frais divers augmente l'écart entre le coût annualisé total du bâtiment existant et celui des différents scénarios de rénovation (hors "PAC AE") et rapproche le scénario "PAC AE" des coûts annualisés du bâtiment dans son état actuel ;
- Si cette marge d'erreur tend dans le sens négatif (-20%), le scénario utilisant la PAC air-eau devient encore plus avantageux que le bâtiment dans son état actuel.

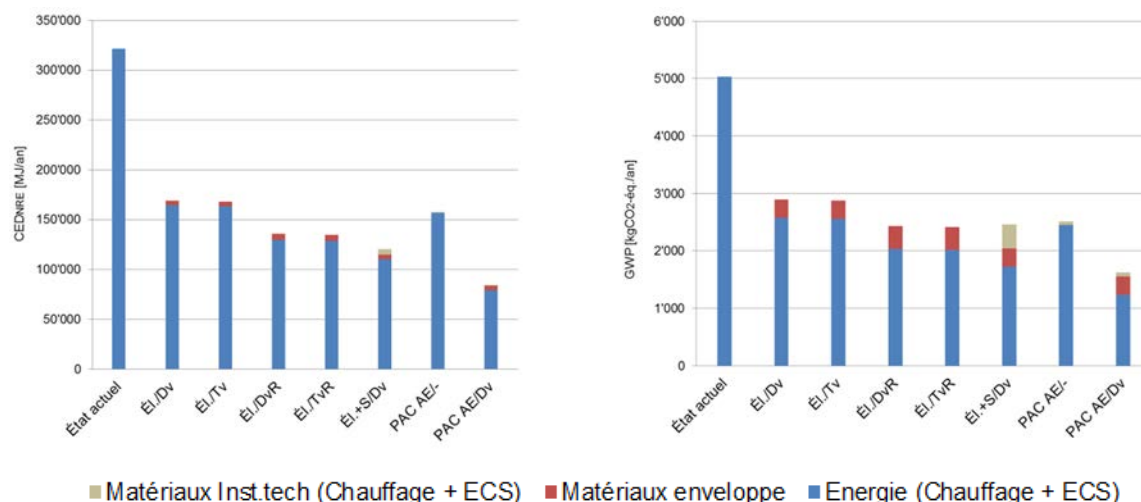
Sur la base de cette analyse financière, il ressort que la rénovation de l'enveloppe thermique présente des coûts annualisés plus élevés que la substitution seule du chauffage électrique par une PAC air-eau et ce malgré un gain de consommation d'énergie plus élevé. De plus, le scénario PAC air-eau sans rénovation de l'enveloppe thermique montre un coût énergétique faible comparativement aux coûts d'investissement. Ainsi, pour ce dernier, chaque franc investi permet d'obtenir un gain énergétique de CHF 1.40, alors que pour les autres scénarios, le même franc permet un gain énergétique compris entre CHF 0.60 et 0.70.

Il est également important de mentionner que les coûts liés à la rénovation des éléments opaques de l'enveloppe thermique contenant des fenêtres (façade ventilée et mur de maçonnerie) induisent des coûts d'investissement annualisés de 2.7 à 5.3 fois supérieurs à ceux des fenêtres, alors que les subventions (fédérale et cantonale) par unité de surface d'éléments sont 1.5 fois supérieures pour les fenêtres. De plus, pour toucher les subventions pour le remplacement des fenêtres, il est nécessaire de rénover l'élément opaque dans lequel se situent les fenêtres. Dès lors, il semble que la répartition du subventionnement entre éléments opaques et translucides ne soit pas optimale. Dans le cadre des mesures d'encouragement à la rénovation, une inversion de la répartition semblerait plus adéquate afin d'obtenir des résultats.

Il est également intéressant de comparer ces différentes solutions de rénovation globale du bâtiment en additionnant les coûts externes¹² (définis selon la norme SIA 480 [16]).

L'analyse des impacts environnementaux de chaque scénario présente d'autres conclusions que l'analyse financière. Le graphique 12 illustre les résultats obtenus pour les deux indicateurs retenus, l'énergie primaire non-renouvelable (CED_{NRE}) à gauche et le potentiel de réchauffement climatique (GWP) à droite. Les résultats numériques détaillés sont présentés dans l'annexe 4.

¹² Coûts externes, définition selon la norme SIA 480 :2004 : « Coûts annuels inhérents à l'exploitation de l'ouvrage, qui n'entrent pas dans les coûts du projet, mais sont à la charge de la collectivité »

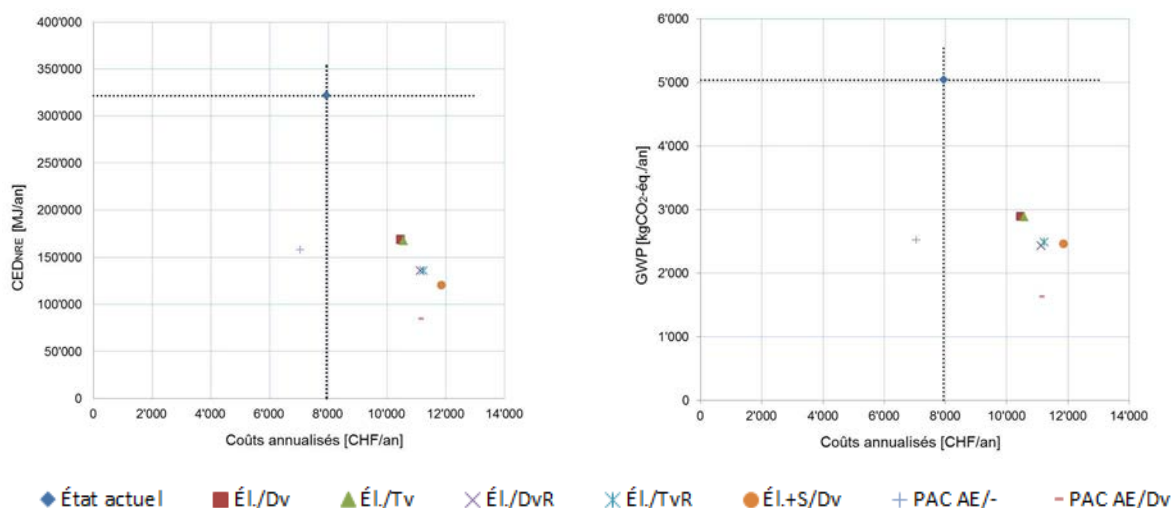


Graphique 12 : Impacts environnementaux (CED_{NRE} et GWP) des scénarios globaux de rénovation du bâtiment

Le graphique 12 montre que :

- Quel que soit le scénario de rénovation, l'impact environnemental du bâtiment est nettement plus faible que celui du bâtiment actuel (entre 47 et 73% de moins pour le CED_{NRE} et entre 43 et 68% de moins pour le GWP);
- L'impact environnemental de lié à l'énergie est bien supérieur à l'impact environnemental des matériaux (enveloppe thermique et installations techniques). Il représente plus de 90% des impacts pour l'indicateur CED_{NRE} et entre 76 et 98% pour l'indicateur GWP ;
- Pour que la rénovation de l'enveloppe thermique soit plus performante que la substitution uniquement du chauffage électrique par la PAC AE, il est nécessaire de faire une rénovation de l'ensemble des éléments de construction, y compris le radier ;
- La rénovation du radier présente un gain environnemental de 20% (CED_{NRE}) et de 15% (GWP) par rapport à une rénovation de l'enveloppe sans rénovation du radier ;
- Le choix du double ou du triple vitrage n'a que peu d'influence sur l'impact environnemental ;
- Selon l'indicateur CED_{NRE}, les solutions couplant la rénovation de l'enveloppe thermique et des installations techniques ("ÉI.+S/Dv" et "PAC AE/Dv") sont les meilleures alternatives ;
- Selon l'indicateur GWP, la solution couplant la rénovation de l'enveloppe thermique et l'installation technique par une PAC air-eau est le meilleur scénario ;

Les résultats financiers et environnementaux ont montré des résultats optimaux différents. Le graphique 13 lie ces deux dimensions afin de définir un scénario optimal tant au niveau des coûts que des impacts environnementaux.



Graphique 13 : Coûts annualisés vs Impacts environnementaux des scénarios globaux de rénovation

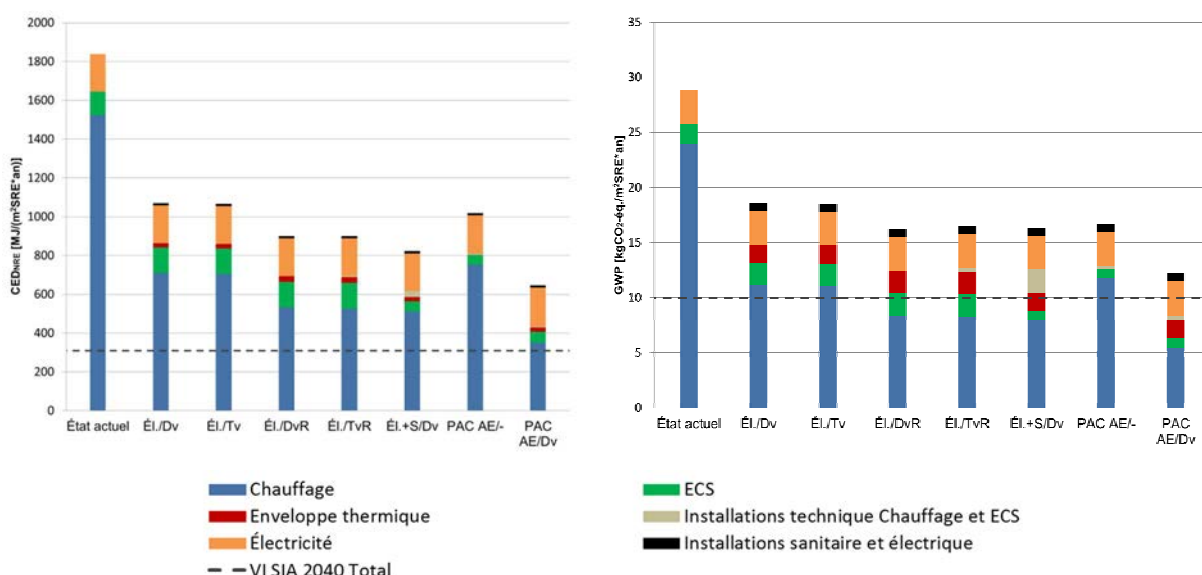
En appliquant la même méthodologie que pour la substitution du chauffage électrique (cf. figure 9), le graphique 13 confirme que :

- La substitution uniquement du système de chauffage par une PAC air-eau ("PAC AE/-") est la seule solution qui présente à la fois des impacts environnementaux et des coûts inférieurs à ceux du bâtiment actuel;
- Le scénario "PAC AE/Dv" présente les impacts environnementaux les plus faibles, mais des coûts annualisés plus important que ceux du bâtiment existant ou que de ceux du scénario "PAC AE".

6.4 Positionnement par rapport à la norme SIA 2040

Les résultats de l'analyse globale de rénovation sont confrontés aux valeurs indicatives du cahier technique (CT) SIA 2040 [12]. La démarche suivie est identique à celle décrite dans le chapitre 5.3.

Le graphique 14 met en relation les résultats obtenus dans l'étude présentée avec la valeur indicative totale (construction et exploitation) donnée par le CT SIA 2040, ceci pour les indicateurs CED_{NRE} et GWP.



Graphique 14 : Positionnement des scénarios globaux de rénovation par rapport à au CT SIA 2040

Le graphique 14 montre que :

- Tous les scénarios de rénovation permettent de diminuer l'écart entre la valeur indicative (VI) et la valeur du bâtiment actuel. Cependant, les valeurs obtenues pour les scénarios sont très au-delà de la valeur indicative, ceci en particulier pour l'indicateur CED_{NRE} . Cela est dû à l'emploi de l'électricité comme vecteur énergétique pour le chauffage ;
- Selon l'indicateur CED_{NRE} , l'ensemble des scénarios présente un impact environnemental supérieur à la VI totale même en se focalisant uniquement sur les positions chauffage et ECS ;
- Selon l'indicateur GWP, seul le scénario "PAC AE/Dv" répond à la VI totale lorsque seuls les aspects liés au chauffage et à l'ECS (énergie et matériaux) sont considérés ;
- Le poste consommation d'énergie électrique du bâtiment (auxiliaire, éclairage et les équipements d'exploitation) engendre entre 18 et 31% des impacts totaux selon l'indicateur CED_{NRE} et entre 16 et 26% des impacts totaux selon l'indicateur GWP ;
- L'énergie d'exploitation (chauffage, ECS et électricité) engendre entre 92 et 99% des impacts environnementaux totaux selon l'indicateur CED_{NRE} et 73 à 94% selon l'indicateur GWP ;

Sur la base de cette analyse, il ressort que le respect de la valeur indicative totale nécessite à la fois la rénovation de l'enveloppe thermique et des installations techniques de chauffage et d'ECS. La

rénovation de l'enveloppe thermique doit concerner l'ensemble des éléments de construction (y compris le radier). La rénovation du chauffage électrique est également nécessaire et ce par une substitution de ce dernier par une ressource renouvelable (par exemple une chaudière à pellet comme vu dans le chapitre 5.3). En effet, la substitution du chauffage électrique par une PAC air-eau, que ce soit avec ou sans rénovation de l'enveloppe thermique, ne permet pas de répondre à la valeur indicative totale.

Le couplage d'une chaudière à pellet avec une enveloppe thermique performante permettrait de s'approcher de très près de la valeur indicative selon l'indicateur CED_{NRE} et de répondre à cette valeur pour l'indicateur GWP. Cependant cette variante entraînerait un coût très élevé étant donné qu'il a été démontré que la rénovation de l'enveloppe thermique était onéreuse et que la solution à pellet augmente les coûts d'investissement par rapport à la PAC air-eau de 75%.

7 Conclusion

La première partie du rapport s'est concentrée sur la comparaison de différents scénarios de rénovation du chauffage électrique direct (chauffage et ECS) tout en conservant l'enveloppe thermique actuelle. L'analyse financière montre que la solution de substitution du chauffage électrique par une PAC air-eau présente un rapport favorable entre les économies financière liées à la consommation d'énergie et les coûts d'investissement. Le couplage avec des panneaux solaires (thermiques et photovoltaïques) n'amène que peu de gain énergétique pour un investissement important. Par contre, d'un point de vue environnemental, même si la solution de substitution par une PAC air-eau permet de diminuer les impacts du bâtiment dans son état actuel, la solution de substitution par une chaudière à pellet est bien meilleure. Cette solution permet de diminuer de 8.65 fois l'impact environnemental de l'indicateur CED_{NRE} et de 2.75 fois celui de l'indicateur GWP. Cependant, lorsque les résultats sont mis en rapport avec les exigences du CT SIA 2040 et en tenant compte de la consommation d'électricité des autres postes (éclairage, équipements d'exploitation, etc.) et des installations techniques associées, aucun scénarios de rénovation du bâtiment ne répond à la valeur indicative totale (exploitation + construction) selon les indicateurs CED_{NRE} et GWP.

La deuxième partie du rapport s'est concentrée sur la rénovation globale du bâtiment. Une première étape a optimisé le choix de rénovation thermique des principaux éléments de construction (façades et toiture) selon des critères thermiques, financier et environnementaux. La pose d'une isolation supplémentaire de 14 [cm] de PUR dans la toiture, de 16 [cm] d'EPS dans la façade ventilée et de 14 [cm] d'EPS dans le mur de maçonnerie ont été retenus. Globalement, la rénovation de ces éléments de construction correspond à la valeur U nécessaire pour répondre à l'exigence posée à l'enveloppe thermique de Minergie-P®.

Ensuite, et sur la base des résultats obtenus précédemment, l'étude s'est focalisée sur l'influence tant environnementale que financière de différents scénarios de rénovation. Ces scénarios ont permis de sonder l'influence du degré de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment (double ou triple vitrage, avec ou sans rénovation du radier) et de peser l'influence de la rénovation avec ou sans substitution des installations techniques.

Il ressort de cette étude de cas, que d'un point de vue financier, les scénarios subissant une rénovation de l'enveloppe thermique présentent des coûts annualisés plus élevés que ceux du bâtiment dans son état actuel mais également plus élevés que ceux inhérents à la substitution seule du chauffage électrique par une PAC air-eau, et ce, malgré un gain de consommation d'énergie pour le chauffage.

Globalement, la pose de double vitrage est plus avantageuse que la solution avec du triple vitrage, ceci, malgré les subventions fédérales et cantonales allouées pour ce dernier.

La prise en compte de la rénovation du radier dans la rénovation de l'enveloppe thermique permet de diminuer la consommation d'énergie de chauffage. Par contre, l'ajout de cette rénovation augmente les coûts annualisés de la rénovation de l'enveloppe thermique d'environ 6.5%.

D'un point de vue environnemental, les résultats sont bien différents. Si tous les scénarios de rénovation globale du bâtiment diminuent d'au moins de moitié les impacts environnementaux du bâtiment par rapport à son état actuel, le scénario optimal est celui qui propose une substitution du chauffage électrique par une PAC air-eau couplée avec la rénovation d'enveloppe thermique. Les impacts environnementaux CED_{NRE} et GWP sont plus faibles pour la rénovation de l'enveloppe thermique par rapport uniquement à la substitution du chauffage électrique par une PAC air-eau seulement si l'ensemble des éléments de construction de l'enveloppe sont rénovés. A nouveau, la différence entre le double et le triple vitrage est faible. Par contre, contrairement aux aspects financiers, présente un bilan légèrement meilleur. La prise en compte de la rénovation du radier permet de diminuer entre 15 et 20% les impacts environnementaux. Cependant, lorsque les résultats sont mis en rapport avec les exigences du CT SIA 2040 et en tenant compte de la consommation d'électricité des autres postes et des installations techniques associées, aucun scénarios de rénovation globale du bâtiment ne répond à la valeur indicative totale selon les deux indicateurs retenus.

En conclusion à cette étude, il est possible d'affirmer les points suivants :

- La rénovation de l'enveloppe thermique semble, en premier lieu, inévitable pour viser une utilisation rationnelle de l'énergie.
- D'un point de vue économique, les meilleures solutions de substitution du chauffage électrique, consistent à conserver un chauffage avec l'électricité comme vecteur énergétique. Les solutions étant soit de rénover uniquement l'enveloppe thermique du bâtiment, soit de coupler le chauffage électrique avec des installations solaires ou en substituant le chauffage électrique par une PAC air-eau avec ou sans rénovation de l'enveloppe.
- Le choix d'une bonne rénovation d'enveloppe de bâtiment permet de s'approcher des objectifs environnementaux du CT SIA 2040 à la condition de la coupler avec des installations techniques présentant de faibles impacts environnementaux.
- Les aides étatiques pour la rénovation de l'enveloppe thermique sont mal réparties entre les éléments opaques (toiture, façade et plancher) et les éléments translucides (vitrage) afin de promouvoir la rénovation énergétique des bâtiments. En effet, les coûts liés à la rénovation des éléments opaques de l'enveloppe thermique contenant des fenêtres (façade ventilée et mur de maçonnerie) induisent des coûts d'investissement annualisés de 2.7 à 5.3 fois supérieurs aux fenêtres, alors que les subventions (fédérale et cantonale) au m² d'éléments sont 1.5 fois supérieures pour les fenêtres que pour les éléments opaques. De plus, pour toucher les subventions pour le remplacement des fenêtres, il est nécessaire de rénover l'élément opaque dans lequel se situent les fenêtres.

Cette étude montre que la substitution du chauffage électrique se justifie d'un point de vue environnemental, mais à quel prix ? Les coûts élevés d'investissement notamment pour la rénovation de l'enveloppe par rapport aux subventions allouées (entre 8 - 11% des coûts d'investissements) peut être un frein important à la rénovation énergétique. A cela s'ajoute que la déduction fiscale ne s'opère que pour l'année d'investissement alors que les investissements réalisés le sont pour 30 à 40 ans, ce qui peut également représenter un frein à la rénovation.

8 Références

- [1] C. des services cantonaux de l'énergie Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie, "Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC)," 2014.
- [2] Andreas Kemmler et al., "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2011 nach Verwendungszwecken," 2012.
- [3] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - PARTIE D - WP3.1 et 3.2 : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique - Systèmes existants de chauffage électrique et analyse des solutions possibles pour leur substitution," 2015.
- [4] "SIA 380/1 - L'énergie thermique dans le bâtiment." 2009.
- [5] "LESOSAI 7, certifications et bilans écologiques et énergétiques de bâtiments." .
- [6] "SIA 381/1 - Caractéristiques de matériaux de construction." 1980.
- [7] "SIA 381/3 - Les degrés-jours en Suisse," 1982.
- [8] "SIA 380/4 - L'énergie électrique dans le bâtiment." 2006.
- [9] "SIA 385/3 - Alimentation du bâtiment en eau chaude sanitaire." 1991.
- [10] "SIA 2024 - Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et les installations du bâtiment." 2006.
- [11] "Données des écobilans dans la construction, KBOB," 2012.
- [12] "SIA 2040 - La voie SIA vers l'efficacité énergétique." 2011.
- [13] Minergie, *Manuel pour le calcul de l'énergie grise des bâtiments Minergie-A, minergie-ECO, Minergie-P-ECO et Minergie-A-ECO.* .
- [14] "SIA 2032 - L'énergie grise des bâtiments." 2010.
- [15] WWF, "Comparaison des coûts annuels des systèmes de chauffage (avec alimentation en eau chaude) pour les installations de 30-60 kW." 2005.
- [16] "SIA 480 - Calcul de rentabilité pour les investissement dans le bâtiment." 2004.
- [17] "Etat de Fribourg - subventions." [Online]. Available: http://www.fr.ch/sde/fr/pub/programmes_dencouragement_.htm.
- [18] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - WP3 : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique," 2015.
- [19] "PACesti v 6.5." 2011.
- [20] "SIA 2031 - Certificat énergétique des bâtiments." 2008.
- [21] "SIA 2039 - Mobilité - Consommation énergétique des bâtiments en fonction de leur localisation." 2011.
- [22] "SIA 232 - Toitures inclinées." 2000.

- [23] Institut für Energie FHBB /ESU services, "Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP)." 2003.
- [24] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-RENO - PARTIE C - WP2: Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations," 2015.
- [25] Fédération vaudoise des Entrepreneurs, "Série de prix pour travaux du bâtiment et génie civil." 2012.

9 Annexes

Annexe 1 : Coûts annualisés des installations techniques

Annexe 1.a Coûts d'investissement des scénarios de substitution des installations techniques

| Coûts d'investissement | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Scénario de rénovation de l'enveloppe du bâtiment | Durée d'amortissement [an] | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | ÉL + S | M. | Pellets | PAC AE | M.+ST | Pellets+ST | PAC AE+ST |
| | | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF |
| | | Etat actuel | Etat actuel | Etat actuel | Etat actuel | Etat actuel | Etat actuel | Etat actuel | Etat actuel |
| Producteur de de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | 0 | 40'014 | 27'000 | 37'800 | 33'264 | 40'594 | 51'300 | 48'708 |
| Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | 0 | 6'912 | 12'000 | 12'000 | 12'000 | 12'000 | 12'000 | 12'000 |
| Citerne | 60 | 0 | 0 | 24'300 | 43'205 | 0 | 24'300 | 43'205 | 0 |
| Suppression de l'existant | 60 | 0 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 |
| Subventions [CHF] | | | | | | | | | |
| Subventions pour Producteur de de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | | 2'000 | | | 3'000 | 2'000 | 2'000 | 5'000 |
| Subventions pour Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | | | | | 3'000 | | | 3'000 |
| Subventions pour Citerne | 60 | | | | | | | | |
| Subventions pour Suppression de l'existant | 60 | | | | | | | | |
| Coût TTC après subventions [CHF] | | | | | | | | | |
| Producteur de de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | 0 | 38'014 | 27'000 | 37'800 | 30'264 | 38'594 | 49'300 | 43'708 |
| Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | 0 | 6'912 | 12'000 | 12'000 | 9'000 | 12'000 | 12'000 | 9'000 |
| Citerne | 60 | 0 | 0 | 24'300 | 43'205 | 0 | 24'300 | 43'205 | 0 |
| Suppression de l'existant | 60 | 0 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 |
| Investissement net initial après subventions | CHF | 0 | 45'617 | 63'991 | 93'697 | 39'955 | 75'585 | 105'197 | 53'399 |
| Investissement net à 20 ans après subventions | CHF | 0 | 38'014 | 27'000 | 37'800 | 33'264 | 38'594 | 49'300 | 46'708 |
| Investissement net à 30 ans après subventions | CHF | 0 | 6'912.0000 | 12'000.0000 | 12'000 | 12'000 | 12'000 | 12'000 | 12'000 |
| Investissement net à 40 ans après subventions | CHF | 0 | 38'014 | 27'000 | 37'800 | 33'264 | 38'594 | 49'300 | 46'708 |
| Annuité [CHF] | | | | | | | | | |
| Producteur de de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | 0 | 2'706 | 1'857 | 2'600 | 2'219 | 2'746 | 3'483 | 3'235 |
| Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | 0 | 364 | 632 | 632 | 553 | 632 | 632 | 553 |
| Citerne | 60 | 0 | 0 | 926 | 1'646 | 0 | 926 | 1'646 | 0 |
| Suppression de l'existant | 60 | 0 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| Coût du capital | CHF/an | 0 | 3'097 | 3'441 | 4'904 | 2'799 | 4'330 | 5'787 | 3'815 |

Annexe 1.b Coûts de l'énergie des scénarios de substitution des installations techniques

| Coût de l'énergie de chauffage et ECS TTC | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------|--------------------|---------------------|
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | ÉL + S | M. | Pellets | PAC AE | M.+ST | Pellets+ST | PAC AE+ST |
| Vecteur énergétique | | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mazout EL | Granulés (pellets) | Mix consommateur CH | Mazout EL | Granulés (pellets) | Mix consommateur CH |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour le chauffage | kWh/an | 31'433 | 27'333 | 31'433 | 31'433 | 31'433 | 31'433 | 31'433 | 31'433 |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour l'ECS | kWh/an | 2'465 | 2'465 | 2'465 | 2'465 | 2'465 | 2'465 | 2'465 | 2'465 |
| Taux de couverture solaire pour l'ECS [%] | % | 0% | 60% | 0% | 0% | 0% | 60% | 60% | 60% |
| Taux de couverture de l'appoint électrique pour le chauffage | % | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Taux de couverture de l'appoint électrique pour l'ECS | % | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Fraction utile chauffage [-] | - | 1.00 | 1.00 | 0.90 | 0.75 | 2.03 | 0.90 | 0.75 | 2.03 |
| Fraction utile ECS [-] | - | 1.00 | 1.00 | 0.65 | 0.50 | 2.31 | 0.65 | 0.50 | 2.31 |
| Consommation finale chauffage | kWh/an | 31'433.33 | 27'333.33 | 34'925.93 | 41'911.11 | 15'484.40 | 34'925.93 | 41'911.11 | 15'484.40 |
| Consommation finale d'énergie pour l'ECS | kWh/an | 2'465.42 | 986.17 | 3'792.95 | 4'930.83 | 1'067.28 | 1'517.18 | 1'972.33 | 426.91 |
| Consommation annuelle d'énergie finale totale | kWh/an | 33'899 | 28'320 | 38'719 | 46'842 | 16'552 | 36'443 | 43'883 | 15'911 |
| Énergie chauffage (y.c. variation du coût de l'énergie) | CHF/an | 7'200 | 6'261 | 5'645 | 3'950 | 3'547 | 5'645 | 3'950 | 3'547 |
| Énergie ECS (y.c. variation du coût de l'énergie) | CHF/an | 565 | 226 | 613 | 465 | 245 | 245 | 186 | 98 |

Annexe 1.c Coûts d'entretien, taxe CO2, externe et divers des scénarios de substitution des installations techniques

| Frais d'entretien TTC | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | ÉL + S | M. | Pellets | PAC AE | M.+ST | Pellets+ST | PAC AE+ST |
| Détartrage | CHF/an | 85 | 85 | | | | | | |
| Service et réparation annuel | CHF/an | | | 600 | 700 | 350 | 600 | 700 | 350 |
| Contrôle des fumées | CHF/an | | | 40 | | | 40 | | |
| Ramonage | CHF/an | | | 250 | 250 | | 250 | 250 | |
| Révision citeme | CHF/an | | | 180 | 180 | | 180 | 180 | |
| Entretien | CHF/an | 92 | 92 | 1'156 | 1'220 | 378 | 1'156 | 1'220 | 378 |
| Autres coûts annuels (divers) TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | ÉL + S | M. | Pellets | PAC AE | M.+ST | Pellets+ST | PAC AE+ST |
| Location compteur | CHF/an | 78 | 78 | | | 78 | | | 78 |
| Divers | CHF/an | 84 | 84 | 0 | 0 | 84 | 0 | 0 | 84 |
| Taxe CO2 TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | ÉL + S | M. | Pellets | PAC AE | M.+ST | Pellets+ST | PAC AE+ST |
| Taxe incitative CO2 | CHF/an | 0 | 0 | 616 | 0 | 0 | 579 | 0 | 0 |
| Taxe CO2 | CHF/an | 0 | 0 | 616 | 0 | 0 | 579 | 0 | 0 |
| Coûts externes TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | ÉL + S | M. | Pellets | PAC AE | M.+ST | Pellets+ST | PAC AE+ST |
| Coûts externes selon SIA 480 | ct/kWh | 5.0 | 5.0 | 4.5 | 1.5 | 5.0 | 4.5 | 1.5 | 5.0 |
| Coûts externes | CHF/an | 1'695 | 1'416 | 1'742 | 703 | 828 | 1'640 | 658 | 796 |

Annexe 2 : Impacts environnementaux des scénarios de substitution des installations techniques

| | Scénario de référence | | | Scénario 1 | | | Scénario 2 | | | Scénario 3 | | | Scénario 4 | | | Scénario 5 | | | Scénario 6 | | | Scénario 7 | | |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|
| | État actuel | | | ÉL+S | | | M. | | | Pellets | | | PAC AE | | | M.+ST | | | Pellets+ST | | | PAC AE+ST | | |
| | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] |
| Total Technique | 2'236 | 2'009 | 128 | 8'941 | 7'953 | 549 | 4'096 | 3'789 | 235 | 4'096 | 3'789 | 235 | 4'096 | 3'789 | 235 | 5'361 | 4'919 | 308 | 5'361 | 4'919 | 308 | 5'361 | 4'919 | 308 |
| Production de chaleur | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 473.9 | 442.1 | 26.9 | 473.9 | 442.1 | 26.9 | 473.9 | 442.1 | 26.9 | 473.9 | 442.1 | 26.9 | 473.9 | 442.1 | 26.9 | 473.9 | 442.1 | 26.9 |
| Distribution de chaleur | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1'385.9 | 1'338.6 | 80.9 | 1'385.9 | 1'338.6 | 80.9 | 1'385.9 | 1'338.6 | 80.9 | 1'385.9 | 1'338.6 | 80.9 | 1'385.9 | 1'338.6 | 80.9 | 1'385.9 | 1'338.6 | 80.9 |
| Installations sanitaires | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 875.5 | 827.9 | 52.7 |
| Installations électriques | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 |
| Capteurs solaire | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6'704.9 | 5'944.3 | 421.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1'265.0 | 1'130.0 | 72.3 | 1'265.0 | 1'130.0 | 72.3 | 1'265.0 | 1'130.0 | 72.3 |
| Ventilation | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total Energie | 372'331 | 321'558 | 5'036 | 311'050 | 268'634 | 4'207 | 172'633 | 171'536 | 11'526 | 206'174 | 35'394 | 1'722 | 181'797 | 157'007 | 2'459 | 162'487 | 161'453 | 10'849 | 193'152 | 33'159 | 1'613 | 174'764 | 150'932 | 2'364 |
| Chauffage | 345'252 | 298'172 | 4'670 | 300'219 | 259'280 | 4'061 | 155'722 | 154'732 | 10'397 | 184'471 | 31'668 | 1'541 | 170'075 | 146'883 | 2'300 | 155'722 | 154'732 | 10'397 | 184'471 | 31'668 | 1'541 | 170'075 | 146'883 | 2'300 |
| ECS | 27'079 | 23'387 | 366 | 10'832 | 9'355 | 147 | 16'911 | 16'804 | 1'129 | 21'703 | 3'726 | 181 | 11'723 | 10'124 | 159 | 6'765 | 6'722 | 452 | 8'681 | 1'490 | 72 | 4'689 | 4'050 | 63 |
| Éclairage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| Équipement électrique | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| Total technique chauffage et ECS | 0 | 0 | 0 | 6'705 | 5'944 | 422 | 1'860 | 1'781 | 108 | 1'860 | 1'781 | 108 | 1'860 | 1'781 | 108 | 3'125 | 2'911 | 180 | 3'125 | 2'911 | 180 | 3'125 | 2'911 | 180 |
| Total énergie chauffage et ECS | 372'331 | 321'558 | 5'036 | 311'050 | 268'634 | 4'207 | 172'633 | 171'536 | 11'526 | 206'174 | 35'394 | 1'722 | 181'797 | 157'007 | 2'459 | 162'487 | 161'453 | 10'849 | 193'152 | 33'159 | 1'613 | 174'764 | 150'932 | 2'364 |
| Total système de chauffage et ECS (énergie+matériaux BITS) | 372'331 | 321'558 | 5'036 | 317'755 | 274'579 | 4'629 | 174'493 | 173'316 | 11'634 | 208'034 | 37'175 | 1'830 | 183'657 | 158'787 | 2'567 | 165'611 | 164'364 | 11'029 | 196'277 | 36'069 | 1'793 | 177'889 | 153'843 | 2'544 |

Annexe 3 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation globale du bâtiment

Annexe 3.a Coûts d'investissement des scénarios de rénovation globale du bâtiment

| Coûts d'investissement | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Scénario de rénovation de l'enveloppe du bâtiment | Durée d'amortissement [an] | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él./Dv | Él./Tv | Él./DvR | Él./TvR | Él.+S/Dv | PAC AE/- | PAC AE/Dv |
| | | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF |
| État actuel | | Dv | Tv | DvR | TvR | Dv | Etat actuel | Dv | |
| Producteur de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40'014 | 33'264 | 33'264 |
| Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | 0 | 6'912 | 6'912 | 6'912 | 6'912 | 6'912 | 12'000 | 12'000 |
| Suppression de l'existant | 60 | 0 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 |
| Façade ventilée | 40 | 0 | 48'946 | 48'946 | 48'946 | 48'946 | 48'946 | 0 | 48'946 |
| Mur de maçonnerie | 30 | 0 | 12'034 | 12'034 | 12'034 | 12'034 | 12'034 | 0 | 12'034 |
| Toiture | 40 | 0 | 36'979 | 36'979 | 36'979 | 36'979 | 36'979 | 0 | 36'979 |
| Fenêtre DV | 30 | 0 | 13'554 | 0 | 13'554 | 0 | 13'554 | 0 | 13'554 |
| Fenêtre TV | 30 | 0 | 0 | 16'729 | 0 | 16'729 | 0 | 0 | 0 |
| Mur de maçonnerie contre non-chauffé | 30 | 0 | 632 | 632 | 632 | 632 | 632 | 0 | 632 |
| Dalle étage contre garage | 30 | 0 | 2'194 | 2'194 | 2'194 | 2'194 | 2'194 | 0 | 2'194 |
| Radier | 60 | 0 | 0 | 0 | 39'678 | 39'678 | 0 | 0 | 0 |
| Suppression du balcon | 60 | 0 | 28'836 | 28'836 | 28'836 | 28'836 | 28'836 | 0 | 28'836 |
| Pont thermique du pied de façade | 30 | 0 | 4'320 | 4'320 | 4'320 | 4'320 | 4'320 | 0 | 4'320 |
| Subventions [CHF] | | | | | | | | | |
| Subventions pour Producteur de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | | | | | | 2'000 | 3'000 | 3'000 |
| Subventions pour Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | | | | | | | 3'000 | 3'000 |
| Subventions pour Suppression de l'existant | 60 | | | | | | | | |
| Subventions pour Façade ventilée | 40 | | 7'223 | 7'223 | 7'223 | 7'223 | 7'223 | | 7'223 |
| Subventions pour Mur de maçonnerie | 30 | | 4'127 | 4'127 | 4'127 | 4'127 | 4'127 | | 4'127 |
| Subventions pour Toiture | 40 | | 4'739 | 4'739 | 4'739 | 4'739 | 4'739 | | 4'739 |
| Subventions pour Fenêtre DV | 30 | | | | | | | | |
| Subventions pour Fenêtre TV | 30 | | | 1'333 | | 1'333 | | | |
| Subventions pour Mur de maçonnerie contre non-chauffé | 30 | | 240 | 240 | 240 | 240 | 240 | | 240 |
| Subventions pour Dalle étage contre garage | 30 | | 408 | 408 | 408 | 408 | 408 | | 408 |
| Subventions pour Radier | 60 | | | | | | | | |
| Subventions pour Suppression du balcon | 60 | | | | | | | | |
| Subventions pour Pont thermique du pied de façade | 30 | | | | | | | | |
| Coût TTC après subventions [CHF] | | | | | | | | | |
| Producteur de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38'014 | 30'264 | 30'264 |
| Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | 0 | 6'912 | 6'912 | 6'912 | 6'912 | 6'912 | 9'000 | 9'000 |
| Suppression de l'existant | 60 | 0 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 | 691 |
| Façade ventilée | 40 | 0 | 41'724 | 41'724 | 41'724 | 41'724 | 41'724 | 0 | 41'724 |
| Mur de maçonnerie | 30 | 0 | 7'907 | 7'907 | 7'907 | 7'907 | 7'907 | 0 | 7'907 |
| Toiture | 40 | 0 | 32'240 | 32'240 | 32'240 | 32'240 | 32'240 | 0 | 32'240 |
| Fenêtre DV | 30 | 0 | 13'554 | 0 | 13'554 | 0 | 13'554 | 0 | 13'554 |
| Fenêtre TV | 30 | 0 | 0 | 15'396 | 0 | 15'396 | 0 | 0 | 0 |
| Mur de maçonnerie contre non-chauffé | 30 | 0 | 392 | 392 | 392 | 392 | 392 | 0 | 392 |
| Dalle étage contre garage | 30 | 0 | 1'786 | 1'786 | 1'786 | 1'786 | 1'786 | 0 | 1'786 |
| Radier | 60 | 0 | 0 | 0 | 39'678 | 39'678 | 0 | 0 | 0 |
| Suppression du balcon | 60 | 0 | 28'836 | 28'836 | 28'836 | 28'836 | 28'836 | 0 | 28'836 |
| Pont thermique du pied de façade | 30 | 0 | 4'320 | 4'320 | 4'320 | 4'320 | 4'320 | 0 | 4'320 |
| Investissement net initial après subventions | CHF | 0 | 138'362 | 140'204 | 178'040 | 179'883 | 176'376 | 39'955 | 170'714 |
| Investissement net à 20 ans après subventions | CHF | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38'014 | 33'264 | 33'264 |
| Investissement net à 30 ans après subventions | CHF | 0 | 34'871.2500 | 36'713.4500 | 34'871 | 36'713 | 34'871 | 12'000 | 39'959 |
| Investissement net à 40 ans après subventions | CHF | 0 | 73'964 | 73'964 | 73'964 | 73'964 | 111'978 | 33'264 | 107'228 |
| Annuité [CHF] | | | | | | | | | |
| Producteur de chaleur (y.c. installation solaire) | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2'706 | 2'219 | 2'219 |
| Distribution et émetteurs de chaleur | 30 | 0 | 364 | 364 | 364 | 364 | 364 | 553 | 553 |
| Suppression de l'existant | 60 | 0 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| Façade ventilée | 40 | 0 | 1'879 | 1'879 | 1'879 | 1'879 | 1'879 | 0 | 1'879 |
| Mur de maçonnerie | 30 | 0 | 417 | 417 | 417 | 417 | 417 | 0 | 417 |
| Toiture | 40 | 0 | 1'452 | 1'452 | 1'452 | 1'452 | 1'452 | 0 | 1'452 |
| Fenêtre DV | 30 | 0 | 714 | 0 | 714 | 0 | 714 | 0 | 714 |
| Fenêtre TV | 30 | 0 | 0 | 846 | 0 | 846 | 0 | 0 | 0 |
| Mur de maçonnerie contre non-chauffé | 30 | 0 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 0 | 27 |
| Dalle étage contre garage | 30 | 0 | 105 | 105 | 105 | 105 | 105 | 0 | 105 |
| Radier | 60 | 0 | 0 | 0 | 1'511 | 1'511 | 0 | 0 | 0 |
| Suppression du balcon | 60 | 0 | 1'098 | 1'098 | 1'098 | 1'098 | 1'098 | 0 | 1'098 |
| Pont thermique du pied de façade | 30 | 0 | 228 | 228 | 228 | 228 | 228 | 0 | 228 |
| Coût du capital | CHF/an | 0 | 6'309 | 6'441 | 7'821 | 7'953 | 9'016 | 2'799 | 8'717 |

Annexe 3.b Coûts de l'énergie des scénarios de rénovation globale du bâtiment

| Coût de l'énergie de chauffage et ECS TTC | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él./Dv | Él./Tv | Él./DvR | Él./TvR | Él.+S/Dv | PAC AE/- | PAC AE/Dv |
| Vecteur énergétique | | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour le chauffage | kWh/an | 31'433 | 14'622 | 14'518 | 10'973 | 10'851 | 10'522 | 31'433 | 14'622 |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour l'ECS | kWh/an | 2'465 | 2'717 | 2'717 | 2'717 | 2'717 | 2'717 | 2'465 | 2'717 |
| Taux de couverture solaire pour l'ECS [%] | % | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 60% | 0% | 0% |
| Taux de couverture de l'appoint électrique pour le chauffage | % | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Taux de couverture de l'appoint électrique pour l'ECS | % | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Fraction utile chauffage [-] | - | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.03 | 2.03 |
| Fraction utile ECS [-] | - | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 2.31 | 2.31 |
| Consommation finale chauffage | kWh/an | 31'433.33 | 14'622.22 | 14'517.50 | 10'972.50 | 10'851.11 | 10'522.22 | 15'484.40 | 7'203.07 |
| Consommation finale d'énergie pour l'ECS | kWh/an | 2'465.42 | 2'716.67 | 2'716.67 | 2'716.67 | 2'716.67 | 1'086.67 | 1'067.28 | 1'176.05 |
| Consommation annuelle d'énergie finale totale | kWh/an | 33'899 | 17'339 | 17'234 | 13'689 | 13'568 | 11'609 | 16'552 | 8'379 |
| Énergie chauffage (y.c. variation du coût de l'énergie) | CHF/an | 7'200 | 3'350 | 3'326 | 2'513 | 2'486 | 2'410 | 3'547 | 1'650 |
| Énergie ECS (y.c. variation du coût de l'énergie) | CHF/an | 565 | 622 | 622 | 622 | 622 | 249 | 245 | 269 |

Annexe 3.c Coûts d'entretien, taxe CO2, externe et divers des scénarios de substitution des installations techniques

| Frais d'entretien TTC | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él./Dv | Él./Tv | Él./DvR | Él./TvR | Él.+S/Dv | PAC AE/- | PAC AE/Dv |
| Détartrage | CHF/an | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | | |
| Service et réparation annuel | CHF/an | | | | | | | 350 | 350 |
| Contrôle des fumées | CHF/an | | | | | | | | |
| Ramonage | CHF/an | | | | | | | | |
| Révision citerne | CHF/an | | | | | | | | |
| Entretien | CHF/an | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 378 | 378 |
| Autres coûts annuels (divers) TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él./Dv | Él./Tv | Él./DvR | Él./TvR | Él.+S/Dv | PAC AE/- | PAC AE/Dv |
| Location compteur | CHF/an | 78 | 78 | 78 | 78 | 78 | 78 | 78 | 78 |
| Divers | CHF/an | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84 |
| Taxe CO2 TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él./Dv | Él./Tv | Él./DvR | Él./TvR | Él.+S/Dv | PAC AE/- | PAC AE/Dv |
| Taxe incitative CO2 | CHF/an | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Taxe CO2 | CHF/an | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Coûts externes TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él./Dv | Él./Tv | Él./DvR | Él./TvR | Él.+S/Dv | PAC AE/- | PAC AE/Dv |
| Coûts externes selon SIA 480 | ct/kWh | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Coûts externes | CHF/an | 1'695 | 867 | 862 | 684 | 678 | 580 | 828 | 419 |

Annexe 4 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation globale du bâtiment

| | Scénario de référence | | | Scénario 1 | | | Scénario 2 | | | Scénario 3 | | | Scénario 4 | | | Scénario 5 | | | Scénario 6 | | | Scénario 7 | | |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------------|
| | État actuel | | | Él./Dv | | | Él./Tv | | | Él./DvR | | | Él./TvR | | | Él.+S/Dv | | | PAC AE/- | | | PAC AE/Dv | | |
| | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2-ég/an] |
| Total Technique | 2'236 | 2'009 | 128 | 2'464 | 2'213 | 141 | 2'464 | 2'213 | 141 | 2'464 | 2'213 | 141 | 3'544 | 3'250 | 203 | 9'169 | 8'158 | 562 | 3'242 | 2'974 | 186 | 3'665 | 3'365 | 210 |
| Production de chaleur | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 211.8 | 197.6 | 12.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 200.6 | 187.1 | 11.4 | 250.5 | 233.7 | 14.2 |
| Distribution de chaleur | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 868.4 | 838.8 | 50.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 805.8 | 778.3 | 47.0 | 950.5 | 918.1 | 55.5 |
| Installations sanitaires | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 964.7 | 912.3 | 58.1 | 964.7 | 912.3 | 58.1 | 964.7 | 912.3 | 58.1 | 964.7 | 912.3 | 58.1 | 964.7 | 912.3 | 58.1 | 875.5 | 827.9 | 52.7 | 964.7 | 912.3 | 58.1 |
| Installations électriques | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'499.0 | 1'301.1 | 82.6 | 1'499.0 | 1'301.1 | 82.6 | 1'499.0 | 1'301.1 | 82.6 | 1'499.0 | 1'301.1 | 82.6 | 1'499.0 | 1'301.1 | 82.6 | 1'360.4 | 1'180.8 | 75.0 | 1'499.0 | 1'301.1 | 82.6 |
| Capteurs solaire | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 6'704.9 | 5'944.3 | 421.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Ventilation | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total Energie | 372'331 | 321'558 | 5'036 | 190'444 | 164'474 | 2'576 | 189'293 | 163'481 | 2'560 | 150'357 | 129'853 | 2'034 | 149'023 | 128'702 | 2'016 | 127'508 | 110'120 | 1'725 | 181'797 | 157'007 | 2'459 | 92'033 | 79'483 | 1'245 |
| Chauffage | 345'252 | 298'172 | 4'670 | 160'605 | 138'704 | 2'172 | 159'455 | 137'711 | 2'157 | 120'518 | 104'083 | 1'630 | 119'184 | 102'932 | 1'612 | 115'572 | 99'812 | 1'563 | 170'075 | 146'883 | 2'300 | 79'116 | 68'327 | 1'070 |
| ECS | 27'079 | 23'387 | 366 | 29'839 | 25'770 | 404 | 29'839 | 25'770 | 404 | 29'839 | 25'770 | 404 | 29'839 | 25'770 | 404 | 11'936 | 10'308 | 161 | 11'723 | 10'124 | 159 | 12'917 | 11'156 | 175 |
| Éclairage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| Équipement électrique | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 |
| Total technique chauffage et ECS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1'080 | 1'036 | 63 | 6'705 | 5'944 | 422 | 1'006 | 965 | 58 | 1'201 | 1'152 | 70 |
| Total énergie chauffage et ECS | 372'331 | 321'558 | 5'036 | 190'444 | 164'474 | 2'576 | 189'293 | 163'481 | 2'560 | 150'357 | 129'853 | 2'034 | 149'023 | 128'702 | 2'016 | 127'508 | 110'120 | 1'725 | 181'797 | 157'007 | 2'459 | 92'033 | 79'483 | 1'245 |
| Total système de chauffage et ECS (énergie+matériaux BITS) | 372'331 | 321'558 | 5'036 | 190'444 | 164'474 | 2'576 | 189'293 | 163'481 | 2'560 | 150'357 | 129'853 | 2'034 | 150'103 | 129'738 | 2'078 | 134'212 | 116'064 | 2'146 | 182'804 | 157'972 | 2'517 | 93'234 | 80'635 | 1'314 |
| Total installations sanitaire et électriques | 2'236 | 2'009 | 128 | 2'464 | 2'213 | 141 | 2'464 | 2'213 | 141 | 2'464 | 2'213 | 141 | 2'464 | 2'213 | 141 | 2'464 | 2'213 | 141 | 2'236 | 2'009 | 128 | 2'464 | 2'213 | 141 |



Projet ECO-Reno - Rénovation à faible impacts environnementaux dans le domaine de l'habitation

PARTIE F

WP 3 : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique

WP 3.3.b : Application sur une étude de cas d'habitat collectif

Résumé

L'étude de cas présentée dans ce rapport concerne la rénovation de l'enveloppe thermique et des installations techniques d'un habitat collectif situé dans le canton de Vaud. Ce bâtiment mal isolé est actuellement chauffé par un système de radiateurs électriques directs. Plusieurs scénarios de rénovation ont été investigués. Dans un premier temps, une rénovation globale de l'enveloppe a été étudiée avec la pose d'une isolation conséquente dans la toiture, remplacement des fenêtres existantes par des fenêtres performantes, et installation d'une façade ventilée avec une meilleure isolation. Puis, sur la base de cette première rénovation, différentes solutions d'installations techniques ont été étudiées afin de procéder à l'assainissement du chauffage électrique direct pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Une analyse détaillée de ces deux scénarios a été effectuée selon différents critères, à savoir financiers, environnementaux (évaluation de la consommation d'énergie primaire non renouvelable "CED_{NRE}" et émissions de gaz à effet de serre "GWP") et techniques.

Les résultats du premier scénario (solution globale de rénovation de l'enveloppe) ont montré qu'il était possible de diminuer drastiquement la consommation d'énergie de chauffage du bâtiment tout en n'alourdissant pas les coûts d'investissement. Si le coût d'investissement reste le facteur principal de choix, il est alors préférable de choisir des éléments de construction dont les valeurs U correspondent aux valeurs seuils pour obtenir les subventions. Globalement, la rénovation globale de l'enveloppe correspond à des exigences énergétiques comprises entre celles du Programme Bâtiments et de Minergie-P®. Sur la base de ce premier scénario, différentes solutions d'installations techniques ont été analysées afin de procéder à l'assainissement du chauffage électrique direct pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire. L'analyse financière complète (enveloppe thermique comprise) montre qu'aucune des solutions présentent des coûts annualisés totaux inférieurs aux coûts du bâtiment en conservant le système de chauffage électrique. Cependant, les solutions de remplacement avec une pompe à chaleur air-eau ou à gaz présentent des coûts annualisés totaux relativement proches des coûts du bâtiment actuel en dépit de l'ajout d'une distribution hydraulique au bâtiment. Au niveau environnemental, la diminution importante de la consommation d'énergie liée à la rénovation de l'enveloppe permet de faire baisser les impacts CED_{NRE} et GWP de toutes les solutions envisagées. Cependant, lorsque les résultats sont comparés avec les exigences du CT SIA 2040, aucun scénarios de rénovation du bâtiment ne répond à la valeur indicative totale (exploitation + construction) selon l'indicateur CED_{NRE}. Seules les solutions avec un chauffage à pellets et une PAC air-eau se situent au-dessous de la valeur indicative totale pour l'indicateur GWP.

En conclusion, cette étude montre que la rénovation énergétique de l'enveloppe thermique couplée à la substitution du chauffage électrique par un autre vecteur est avantageuse d'un point de vue environnemental. Cependant, les coûts ne sont pas maîtrisés pour la plupart des solutions étudiées. Les coûts élevés pour la rénovation de l'enveloppe, la nouvelle distribution de chaleur et la production de chaleur par rapport aux subventions allouées (équivalent à 8 - 10% des coûts totaux) peuvent être un frein important à la rénovation énergétique et ce, même si une partie des coûts peut être reportée sur les loyers.

Abstract

The case study presented in this report concerns the renovation of the thermal envelope and the retrofitting of the technical installations of a multi-family dwelling. This poorly insulated building is currently heated by direct electrical heating. Several renovation scenarios were investigated. Firstly, a global renovation of the envelope was studied by placing a considerable amount of insulation in the roof, replacing existing windows with energy-efficient ones and use of a rear ventilated façade with sound insulation. Secondly, based on this first renovation, different solutions of technical systems were studied in order to replace the direct electrical heating system for space heating and domestic hot water. A detailed analysis of these scenarios was carried out according to a set of criteria including financial, environmental (non-renewable primary energy demand "CED_{NRE}" and greenhouse gases emissions "GWP") and technical requirements.

Results from the first scenario have shown that it is possible to dramatically reduce the space heating energy consumption of the building while keeping up investment costs.. If investment cost remains the main factor for decision makers, then it is advisable to choose building components for which the U values meet the renovation subsidy threshold. In general, the renovation of the thermal envelope corresponds to the energy requirements stipulated in the Swiss Federal and cantonal building programme and Minergie-P®. The complete financial analyse of the second renovation scenario (including the thermal envelope) shows that none of the options have total annual cost advantage over the current building costs. However, solutions integrating an air-water or a gas heat pump present total annual costs relatively close to those of the current building, despite the need to add a hydraulic distribution system to the building. Solutions keeping the electric heaters also have total annual costs similar to the ones of the existing building. As far as environmental considerations are concerned, the important decrease of the energy consumption resulting from the envelope renovation has allowed lowering the primary energy impacts and greenhouse gas emissions of all possible solutions. Nevertheless, when compared to the requirements of the standard CT SIA 2040, no single renovation building scenario met the recommended total value (operation and construction) for the CED_{NRE} indicator. In addition, only solutions using pellet heating systems and air-water heat pumps are below the recommended total value for the GWP indicator.

Overall, this study has shown that renovation of the thermal envelope together with the retrofitting of the electrical heating by replacing the energy vector is advantageous from an environmental point of view. However, the costs to perform these refurbishments remain an important obstacle. In comparison to the awarded renovation subsidies (around 8-10% of the total cost), the high costs of the envelope renovation and the new heating distribution system could hinder energy renovation of buildings, even if some of these costs could be passed on to the tenants.

Table des matières

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RÉSUMÉ..... | 3 |
| ABSTRACT | 4 |
| LISTE D'ABRÉVIATIONS | 6 |
| LISTE DES FIGURES..... | 7 |
| LISTE DES GRAPHIQUES | 7 |
| LISTE DES TABLEAUX | 8 |
| 1 OBJECTIF DU TRAVAIL..... | 9 |
| 2 DESCRIPTIF DU BÂTIMENT | 9 |
| 3 METHODOLOGIE..... | 12 |
| 4 RÉNOVATION DE L'ENVELOPPE THERMIQUE DU BÂTIMENT | 13 |
| 4.1 Description des scénarios de rénovation des éléments de l'enveloppe thermique | 15 |
| 4.1.1 Toiture | 16 |
| 4.1.2 Façade compacte avec de l'EPS | 16 |
| 4.1.3 Façade ventilée avec de l'EPS | 17 |
| 4.1.4 Façade ventilée avec de la laine de verre | 18 |
| 4.1.5 Plancher | 18 |
| 4.1.6 Fenêtres | 19 |
| 4.2 Résultats et analyses des scénarios de rénovation | 19 |
| 4.2.1 Toiture | 19 |
| 4.2.2 Façade | 20 |
| 4.2.3 Rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment | 22 |
| 5 SUBSTITUTION DU SYSTÈME DE CHAUFFAGE ET DE PRODUCTION D'ECS | 27 |
| 5.1 Description des scénarios de substitutions | 28 |
| 5.2 Résultats et analyses des scénarios de substitution | 30 |
| 6 POSITIONNEMENT PAR RAPPORT À LA SOCIÉTÉ À 2'000 WATTS..... | 35 |
| 7 CONCLUSIONS..... | 39 |
| 8 RÉFÉRENCES..... | 41 |
| 9 ANNEXES | 42 |
| Annexe 1: Coûts de rénovation de l'enveloppe thermique | 42 |
| Annexe 2: Impacts environnementaux des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment | 44 |
| Annexe 3: Coûts annualisés des installations techniques | 45 |

Liste d'abréviations

| | | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| AE | Air-eau | [-] |
| A _E | Surface de référence énergétique | [m ²] |
| AFD | Administration fédérale des douanes | [-] |
| CED _{NRE} | Energie primaire considérant seulement l'énergie non-renouvelable | [MJ/an] |
| COP | Coefficient de performance | [-] |
| CT | Cahier technique | [-] |
| ECS | Eau chaude sanitaire | [-] |
| EF, _{hww} | Demande en énergie finale pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire | [MJ/an] |
| EPS | Polystyrène expansé | [-] |
| G | Transmission énergétique totale | [-] |
| gp | Transmission énergétique perpendiculaire | [-] |
| GWP | Potentiel de réchauffement climatique (global warming potential) | [kgCO ₂ -éq/an] |
| HT | Hors taxe | [-] |
| KBOB | Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics | [-] |
| LV | Laine de verre | [-] |
| m | Longueur | [m] |
| M-P | Minergie-P® | [-] |
| PCI | Pouvoir calorifique inférieur | [kWh/unité] |
| PrgBât. | Programme Bâtiments | [-] |
| PV | Photovoltaïque | [-] |
| Q _{h,li} | Valeur limite SIA 380/1 du besoin de chaleur utile pour le chauffage | [MJ/an] |
| TTC | Toute taxe comprise | [-] |
| Q _h | Besoin d'énergie utile pour le chauffage | [MJ/an] |
| U | Coefficient de transmission thermique | [W/(m ² K)] |
| U _f | Coefficient de transmission thermique du cadre de fenêtre | [W/(m ² K)] |
| U _g | Coefficient de transmission thermique du vitrage | [W/(m ² K)] |
| Vaud S1 | Premier seuil de subventionnement du canton de Vaud posé à une valeur U de 0.15 [W/(m ² K)] | [-] |
| Vaud S2 | Second seuil de subventionnement du canton de Vaud posé à une valeur U de 0.11 [W/(m ² K)] | [-] |
| VD | Canton de Vaud | [-] |
| VI | Valeurs indicatives CT SIA 2040 [1] | [-] |

Liste des figures

| | |
|----------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Situation géographique du bâtiment..... | 9 |
| Figure 2 : Façade nord..... | 9 |
| Figure 3 : Isolation entre chevrons..... | 10 |
| Figure 4 : Fenêtre en bois, façade nord..... | 10 |
| Figure 5 : Radiateur électrique..... | 10 |
| Figure 6 : Chauffe-eau électriques..... | 11 |
| Figure 7 : Compteurs électrique..... | 11 |
| Figure 8 : Zone chauffée avant et après rénovation | 15 |

Liste des graphiques

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graphique 1 : Détermination du scénario optimal de rénovation de la toiture, à gauche CED _{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts..... | 20 |
| Graphique 2 : Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade – Façade compacte avec de l'EPS, à gauche CED _{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts | 21 |
| Graphique 3: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade – Façade ventilée avec de l'EPS, à gauche CED _{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts..... | 21 |
| Graphique 4: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade – Façade ventilée avec de la laine de verre, à gauche Coûts vs CED _{NRE} et à droite Coûts vs GWP..... | 22 |
| Graphique 5: Coûts annualisés des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment | 23 |
| Graphique 6: Répartition du coût annualisé d'investissement des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment | 24 |
| Graphique 7 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation globale du bâtiment (CED _{NRE} à gauche et GWP à droite)..... | 25 |
| Graphique 8 : Impacts environnementaux (CED _{NRE} et GWP) des éléments de construction des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment | 26 |
| Graphique 9 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation selon le type d'installations techniques (sans coûts externes)..... | 30 |
| Graphique 10 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation des installations techniques (avec coûts externes) | 32 |
| Graphique 11 : Coûts annualisés du capital | 33 |
| Graphique 12 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation des installations techniques, CED _{NRE} à gauche et GWP à droite..... | 34 |
| Graphique 13 : Positionnement des scénarios par rapport à la valeur indicative totale du CT SIA 2040 [1], CED _{NRE} à gauche et GWP à droite | 36 |
| Graphique 14: Positionnement des scénarios par rapport à la valeur indicative "Exploitation" du CT SIA 2040, CED _{NRE} à gauche et GWP à droite | 37 |
| Graphique 15: Positionnement des scénarios par rapport à la valeur indicative "Construction" du..... | 38 |

Liste des tableaux

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Durée de vie des éléments de construction et des installations techniques | 13 |
| Tableau 2 : Résumé des exigences selon différents acteurs pour l'enveloppe du bâtiment (rénovation) ... | 14 |
| Tableau 3 : Description de la toiture | 16 |
| Tableau 4: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en toiture selon l'exigence à atteindre | 16 |
| Tableau 5: Description de la façade compacte..... | 16 |
| Tableau 6: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade compacte avec de l'EPS selon l'exigence à atteindre | 17 |
| Tableau 7: Description de la façade ventilée avec de l'EPS | 17 |
| Tableau 8: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade ventilée avec de l'EPS selon l'exigence à atteindre | 17 |
| Tableau 9: Description de la façade ventilée avec de la laine de verre | 18 |
| Tableau 10: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade ventilée avec de la laine de verre selon l'exigence à atteindre | 18 |
| Tableau 11 : Description de la rénovation du plancher avec de l'EPS..... | 18 |
| Tableau 12 : Caractéristiques techniques des vitrages | 19 |
| Tableau 13 : Résumé des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment adoptés..... | 22 |
| Tableau 14 : Besoin de chaleur pour le chauffage (Q_h) des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment comparés aux exigences SIA 380/1 [3] | 23 |
| Tableau 15 : Coûts et variation annuelle de l'énergie..... | 28 |
| Tableau 16 : Scénarios de substitution du chauffage électrique direct | 28 |
| Tableau 17 : Rendements et couvertures des scénarios de substitution du chauffage électrique direct | 30 |

1 Objectif du travail

La réalisation des lignes directrices de la stratégie 2050 de la Confédération, via le MoPEC [2] et les réglementations cantonales sur l'énergie, augmentent la pression exercée sur les propriétaires de bâtiments (individuels ou collectifs) utilisant l'électricité comme vecteur énergétique pour la production de chaleur pour le chauffage et/ou pour la préparation de l'eau chaude sanitaire (ECS).

La substitution du chauffage électrique par un autre système nécessite souvent des investissements conséquents, notamment dans les bâtiments fonctionnant à l'électricité directe (p. ex. avec des ventilo-convecteurs). Dès lors, il s'agit de savoir, si, à long terme, il est préférable de substituer le chauffage électrique par un autre système, de rénover l'enveloppe thermique en conservant le chauffage électrique ou encore d'appliquer ces deux mesures conjointement, ceci d'un point de vue économique et environnemental.

2 Descriptif du bâtiment

Le bâtiment analysé est une habitation collective, construite au début des années 80. Il est situé dans le village de Savigny (VD) en Suisse. Le bâtiment se situe à une altitude de 797 m, et est orienté nord-sud (figure 1– zone rouge).



Figure 1 : Situation géographique du bâtiment

Le bâtiment est constitué d'un sous-sol partiellement enterré et de 3 étages (rez-de-chaussée, 1^{er} et 2^{ème} étage).

Le sous-sol comprend les caves, les locaux techniques ainsi qu'une surface de jeux. Les 3 étages supérieurs sont dédiés à l'habitat (8 appartements de 4.5 pièces au rez-de-chaussée et 1^{er} étage et 4 appartements en duplex de 5.5 pièces au 2^{ème} étage).



Figure 2 : Façade nord

Le bâtiment est constitué d'une structure en béton avec isolation de fibres de verre (8 cm) extérieure et d'une toiture à pans inclinés avec charpente en bois et isolation de fibres de verre (10 cm) entre chevrons; isolation en mauvais état (cf. figure 3).



Figure 3 : Isolation entre chevrons

Les fenêtres et portes-fenêtres du bâtiment sont d'origine. Elles sont en bois avec un double vitrage isolant pour le rez-de-chaussée, le premier et une partie du second étage. Les fenêtres du séjour, de la cuisine et de la mezzanine du deuxième étage ont été rénovées et remplacées en 1995 par des fenêtres en cadre PVC avec un vitrage double isolant (valeur U globale considérée : entre 2.85 et 3.17 $[W/m^2K]$).



Figure 4 : Fenêtre en bois, façade nord

Le chauffage du bâtiment est assuré par un chauffage électrique (panneaux convectifs avec thermostat de réglage incorporé (figure 5)). Les appartements du dernier étage sont pourvus, de plus, d'une cheminée de salon à foyer ouvert.



Figure 5 : Radiateur électrique

La production d'eau chaude sanitaire est garantie par 2 chauffe-eau électriques de 1'500 litres chacun (cf. figure 6).



Figure 6 : Chauffe-eau électriques

Chaque appartement a son propre compteur individuel d'électricité. Celui-ci regroupe la consommation électrique pour le chauffage, l'éclairage, les appareils électriques et la cuisson. Ce compteur individuel ne comptabilise pas la consommation électrique de la production d'eau chaude sanitaire qui est totalisée sur un des deux compteurs électriques communs du bâtiment.



Figure 7 : Compteurs électrique

Finalement, un système de ventilation dédié uniquement à l'extraction de l'air vicié de chaque appartement par les toilettes et la hotte de cuisine complète les installations techniques de ce bâtiment. Chaque appartement est relié à un monobloc d'extraction par une conduite principale.

3 Méthodologie

La démarche de rénovation de ce bâtiment se base tout d'abord sur une rénovation énergétique de l'enveloppe thermique du bâtiment (en maintenant le système de production de chaleur existant) puis par l'analyse du remplacement des installations techniques. En effet, au vu de l'état de vétusté du bâtiment, un scénario de rénovation dédié uniquement aux installations techniques en conservant l'enveloppe actuelle n'est guère raisonnable.

L'étape préliminaire du travail a consisté à créer un modèle de base du bâtiment existant, selon la norme SIA 380/1 [3]. Ce travail s'est fait avec le logiciel Lesosai 7.4 (version 869) [4] en mode optimisation-comparaison¹. Ce modèle de base a été réalisé sur la base de plans, de documents d'archive, de l'étude EPIQR [5], de la norme SIA 381/1 [6] et des observations faites lors de visites du bâtiment. Une correction météorologique de la température extérieure selon la norme SIA 381/3 [7] a dû être faite afin d'adapter les températures extérieures de la station météorologique de référence au lieu du bâtiment. De plus, le bâtiment étant équipé de compteurs individuels par appartement et ne séparant pas la consommation dédiée au chauffage des autres postes de consommation d'électricité (éclairage et autres équipements électriques), les différents postes de consommation ont été évalués sur la base des normes SIA 380/4 [8] et SIA 385/3 [9] et sur la base du cahier technique (CT) SIA 2024 [10]. Le modèle a été validé en comparant les résultats obtenus aux données de consommation réelle d'électricité du bâtiment. Ainsi, ce modèle de base permet d'évaluer l'influence des différents scénarios de rénovation sur la demande en énergie finale ($E_{F,hww}$), la consommation d'énergie primaire non-renouvelable (CED_{NRE}), le potentiel de réchauffement climatique (GWP) et les coûts.

Différents scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment (toiture et façade) ont été définis. Pour chacun de ces scénarios de rénovation et pour chaque élément de construction, les résultats définis par Lesosai 7.4 (valeur du coefficient de transmission thermique et impacts environnementaux), les coûts de réalisation² et les subventions fédérales et cantonales susceptibles d'être revendiquées ont été comparés. Signalons, qu'à ce stade, les coûts liés au besoin d'énergie utile de chauffage (coûts de l'énergie) ne sont pas pris en compte car ceux-ci sont à la charge du locataire et non pas du propriétaire dont l'objectif prioritaire est de minimiser les coûts d'investissement lié au choix constructif de rénovation. La prise en compte de ceux-ci interviendra lors de la comparaison des scénarios globaux de rénovation du bâtiment. Par contre, les impacts environnementaux liés aux besoins d'énergie utile de chauffage sont considérés car l'évaluation de l'impact environnemental d'un bâtiment doit se faire de manière globale incluant les matériaux et la consommation d'énergie (CT 2032 Ch.2.4.6 p. 12 [11]).

Ainsi, un scénario optimal de rénovation couplant impacts sur l'environnement et coûts a pu être défini pour chaque élément de construction. Cette évaluation préliminaire a permis de définir plusieurs scénarios globaux de rénovation du bâtiment, de comparer ces scénarios entre eux et d'évaluer leur performance par rapport à celles du bâtiment existant.

La détermination du scénario optimal de rénovation des installations techniques de production de chaleur pour le chauffage et l'ECS s'est basée sur la comparaison conjointe des performances environnementales et économiques de différents scénarios de substitution du système actuel (chauffage électrique direct). Pour chaque scénario, les coûts des installations techniques (fourniture et pose) et les coûts d'entretien ont été définis sur la base d'offres et d'estimations faites par des entreprises du domaine. Pour les combustibles concernés, la taxe CO₂ a été définie en considérant les montants définis pour chaque vecteur énergétique par l'Administration fédérale des douanes (AFD). Les subventions cantonales ont été considérées. Les coûts de l'énergie ont été définis selon les tarifs des fournisseurs locaux pour l'électricité et le gaz naturel, selon l'indice des prix à la consommation³ pour le mazout et selon le site internet *prixpellets.ch* pour les pellets de bois.

¹ Ce mode de calcul, défini par la norme SIA 380/1, permet de réaliser et de vérifier un bilan thermique par rapport à des valeurs de consommation effective du bâtiment

² Les coûts de rénovation des éléments de construction se basent sur les informations fournies par Swisspor dans le cadre du volet 2 du projet « ECO-Reno [14] » et sur des offres. Le coût de l'électricité a été défini selon les tarifs du fournisseur local.

³ IPC, prix moyens annuels pour 100 [l] de mazout pour des quantités types, période 2000-2013, Office Fédéral de la Statistique

Les impacts environnementaux ont été définis au moyen de la base de données de la KBOB [12]. Ils sont exprimés en mégajoule par an [MJ/an] pour le CED_{NRE} et en kilogramme de CO₂ équivalent par an [kgCO₂-eq/an] pour le GWP.

Les performances environnementales (CED_{NRE} et GWP) sont comparées aux valeurs indicatives du CT SIA 2040 [1].

La méthodologie choisie pour l'évaluation des impacts environnementaux, est compatible avec le standard Minergie®-ECO et est conforme au CT SIA 2032 [11].

La durée de vie du bâtiment utilisée pour l'évaluation des coûts et des impacts environnementaux est de 60 ans. Les durées de vie des installations techniques et des matériaux de l'enveloppe thermique sont conformes au CT SIA 2032 [11] (cf. tableau 1). Signalons que ces durées sont également utilisées pour calculer les facteurs d'annuités dans la détermination des coûts.

| Éléments de construction et installations techniques | Durée de vie [an] |
|------------------------------------------------------|-------------------|
| Toiture | 40 |
| Façade compacte | 30 |
| Façade ventilée | 40 |
| Plancher | 30 |
| Fenêtres | 30 |
| Chaudière + installation solaire | 20 |
| Distribution de chaleur | 40 |
| Ventilation | 30 |
| Cheminée | 30 |
| Raccordement au gaz | 30 |
| Stockage | 30 |
| Local technique | 60 |
| Éléments existants supprimés | 60 |

Tableau 1 : Durée de vie des éléments de construction et des installations techniques

Deux remarques doivent être apportées par rapport au tableau 1 :

- La distribution de chaleur étant principalement noyée dans l'isolation périphérique en façade, sa durée de vie est estimée à 40 ans au lieu de 30 ans comme précisée dans le CT SIA 2032 ;
- Dans le cas d'étude, les "éléments existants supprimés" concernent les radiateurs électriques existants. Le coût financier de cette suppression est ramené à la durée de l'étude (60 ans) car ils ne sont enlevés qu'une seule fois.

Les calculs englobent le nombre de remplacements nécessaires des matériaux de l'enveloppe thermique et des installations techniques (durées variables) sur la durée de vie du bâtiment (60 ans).

4 Rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment

Pour chaque scénario de rénovation, seules les épaisseurs d'isolation permettant de répondre aux valeurs ponctuelles réglementaires du coefficient de transmission thermique U au niveau fédéral (Programme Bâtiments [13]), cantonal (SIA 380/1 [3], et/ou subventions) et d'associations privées (Minergie®) ont été choisies (cf. tableau 2).

| | Exigences (ou recommandations) ponctuelles (valeur U) [W/(m²K)] | | Exigences globales [MJ/(m²·an)] |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------|
| Canton (SIA 380/1) et Minergie® | - Éléments opaques contre l'extérieur ou enterrés à moins de 2 m (toit, murs, sol) | 0.25 | $Q_h \leq 125\%Q_{h,li}^4$ |
| | - Éléments opaques contre non-chauffé ou enterrés à plus de 2 m (mur, sol) | 0.30 | |
| | - Fenêtres et porte-fenêtres contre extérieur | 1.30 | |
| | - Portes contre extérieur | 1.30 | |
| Programme Bâtiments | - Remplacement de fenêtre (intercalaire en plastique ou en acier inoxydable), valeur U du verre | 0.70 | - |
| | - Éléments opaques contre l'extérieur ou enterré à moins de 2 m (toit, murs, sol) | 0.20 | |
| | - Éléments opaques contre non-chauffé ou enterrés à plus de 2 m (mur, sol) | 0.25 | |
| Subvention cantonale additionnelle (VD) | - Toits, murs et sols contre l'extérieur, murs et sols contre terre - enterrés jusqu'à 2 m | 0.15 | |
| | | 0.11 | |
| Minergie-P® | | | $Q_h \leq 80\%Q_{h,li}$ |

Tableau 2 : Résumé des exigences selon différents acteurs pour l'enveloppe du bâtiment (rénovation)

Le label Minergie® n'impose pas d'exigence primaire liée à l'enveloppe du bâtiment, contrairement au label Minergie-P®. Pour le label Minergie®, dans le cas de la rénovation, les exigences cantonales doivent être remplies. Minergie-P® n'impose pas d'exigence ponctuelle, mais, impose un besoin de chaleur utile pour le chauffage (Q_h) inférieur ou égal à 80% de la valeur limite SIA ($Q_{h,li}$) (exigence globale) pour un bâtiment neuf. Concrètement, pour atteindre cette exigence globale, les éléments contre l'extérieur doivent s'approcher d'une valeur U de 0.135 [W/(m²·K)].

Le canton de Vaud octroie des subventions supplémentaires au Programme Bâtiments [13] selon la valeur U atteinte par l'élément de construction. Les valeurs U de 0.15 et de 0.11 [W/(m²K)] permettent de recevoir, respectivement, une subvention totale (subvention du Programme Bâtiments compris) de CHF 50.-/m² et de CHF 70.-/m², celles-ci pouvant être majorées de CHF 15.- /m² en cas de substitution du chauffage électrique par un autre système.

Le modèle thermique de base du bâtiment et le tracé de l'enveloppe thermique ont subi des modifications en fonction du scénario de rénovation et de l'épaisseur d'isolation (surface de référence énergétique - A_E -, surface des éléments de construction, ombrages).

⁴ $Q_{h,li}$ représente le besoin de chaleur annuel limite pour le chauffage du bâtiment à construire (construction neuve)

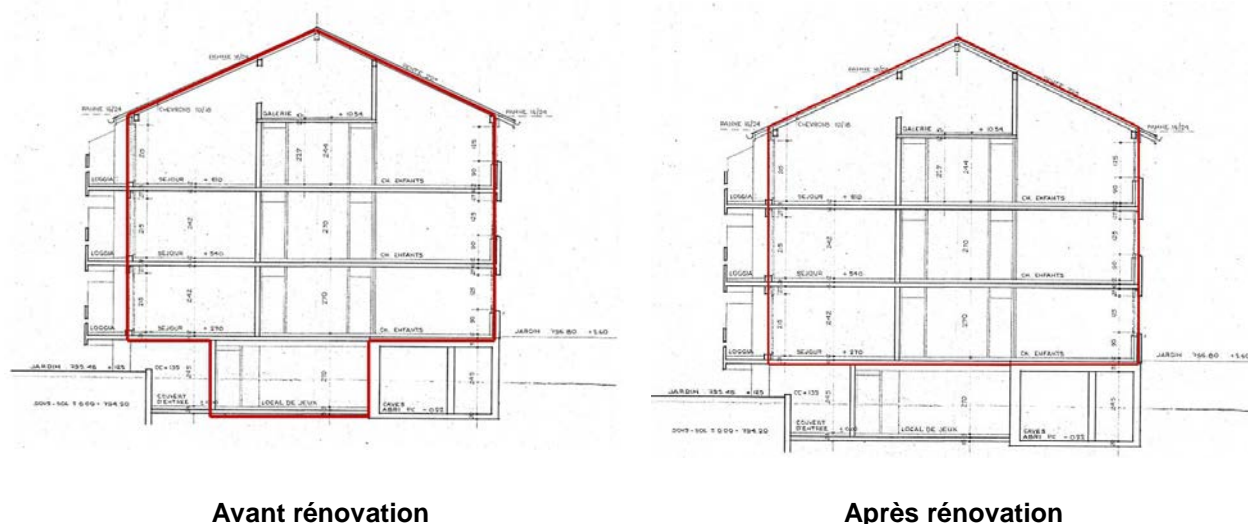


Figure 8 : Zone chauffée avant et après rénovation

Il est important de signaler qu'après rénovation, les locaux situés au rez-de-chaussée seront considérés comme non-chauffés. Cette modification du tracé de l'enveloppe thermique du bâtiment a une conséquence directe sur l'Ae qui est plus petite après rénovation qu'avant (-27 m²).

Les coûts considérés englobent les coûts liés aux matériaux, à la main-d'œuvre, aux échafaudages, aux subventions. Ils sont exprimés en franc par an [CHF/an].

Les impacts environnementaux englobent les impacts liés uniquement aux nouveaux matériaux de construction mis en œuvre et ceux liés à la consommation d'énergie finale pour le chauffage.

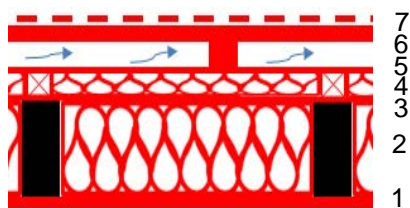
4.1 Description des scénarios de rénovation des éléments de l'enveloppe thermique

La toiture, les façades, les fenêtres et le plancher du rez-de-chaussée (contre extérieur et contre non-chauffé) ont fait l'objet d'une évaluation du potentiel de rénovation. La liste ci-après décrit les scénarios considérés par élément et les chapitres suivants détaillent chaque élément :

- Toiture : un seul scénario de rénovation a été défini sur la base de l'état actuel. Il s'agit de la mise en œuvre d'une isolation entre et sur chevron avec de la laine de verre (cf. ch.4.1.1) ;
- Façades : trois scénarios de rénovation sont comparés. Il s'agit de la mise en œuvre d'une façade compacte isolée avec du polystyrène expansé (EPS) (cf. ch. 4.1.2), d'une façade ventilée avec de l'EPS (cf. ch. 4.1.3) et d'une façade ventilée avec de la laine de verre (LV) (cf. ch.4.1.4) ;
- Plancher : un seul scénario de rénovation a été défini en fonction de l'encombrement en hauteur. Il s'agit de la mise en place d'un panneau multicouche avec une isolation en EPS (cf. ch. 4.1.5) ;
- Fenêtres : un seul scénario de rénovation a été défini. Il s'agit de la pose de fenêtres avec cadre en PVC et triple vitrage pour les orientations Nord, Est et Ouest et double vitrage au Sud (cf. ch. 4.1.6).

Remarque : Dans les schémas ci-dessous, les nouvelles couches sont représentées en rouge et les couches existantes en noir.

4.1.1 Toiture



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|--------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Lambrissage | 1.25 | 0.14 |
| 2 | Laine de verre / Chevron | 18 | 0.032 / 0.13 |
| 3 | Pare-vapeur | 0.02 | 0.2 |
| 4 | Laine de verre / Lattage bois | variable | 0.032 / 0.13 |
| 5 | Sous-couverture | 0.05 | 0.2 |
| 6 | Contre-latte / vide d'aération | 6 | - |
| 7 | Tuile en terre cuite / Lattage | 2 | - |

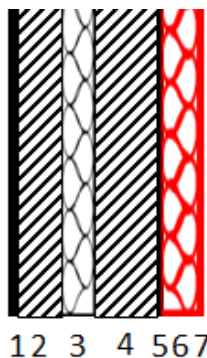
Tableau 3 : Description de la toiture

Le tableau 4 présente les épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre pour répondre aux exigences sur la valeur U.

| Ep. isolant [cm] | Valeur U de la toiture [W/(m²K)] | Exigence à atteindre |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 4 | 0.18 | Programme Bâtiments (PrgBât.) |
| 8 | 0.15 | Seuil 1 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S1) |
| 10 | 0.13 | Minergie-P (M-P) |
| 18 | 0.11 | Seuil 2 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S2) |

Tableau 4: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en toiture selon l'exigence à atteindre

4.1.2 Façade compacte avec de l'EPS



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|---------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Enduit au plâtre | 1 | 0.7 |
| 2 | Panneau de plâtre | 6 | 0.04 |
| 3 | Laine de verre | 8 | 0.044 |
| 4 | Béton | 15 | 2.1 |
| 5 | Enduit au plâtre | 1 | 0.7 |
| 6 | Polystyrène expansé (EPS) | variable | 0.031 |
| 7 | Enduit minéral | 0.8 | 0.7 |

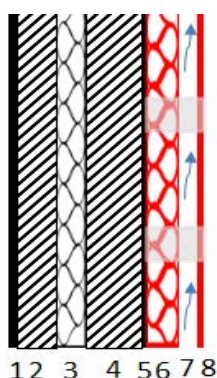
Tableau 5: Description de la façade compacte

Le tableau 6 présente les épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre pour répondre aux exigences sur la valeur U.

| Ep. isolant [cm] | Valeur U de la toiture [W/(m²K)] | Exigence à atteindre |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 10 | 0.18 | Programme bâtiment (PrgBât.) |
| 14 | 0.15 | Seuil 1 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S1) |
| 16 | 0.135 | Minergie-P® (M-P) |
| 22 | 0.11 | Seuil 2 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S2) |

Tableau 6: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade compacte avec de l'EPS selon l'exigence à atteindre

4.1.3 Façade ventilée avec de l'EPS



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|-----------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Enduit au plâtre | 1 | 0.7 |
| 2 | Panneau de plâtre | 6 | 0.04 |
| 3 | Laine de verre | 8 | 0.044 |
| 4 | Béton | 15 | 2.1 |
| 5 | Enduit au plâtre | 1 | 0.7 |
| 6 | Polystyrène expansé (EPS) | variable | 0.031 |
| 7 | Vide d'aération /lattage vertical | 3 | - |
| 8 | Plaque fibro-ciment ⁵ | 0.4 | 0.48 |

Tableau 7: Description de la façade ventilée avec de l'EPS

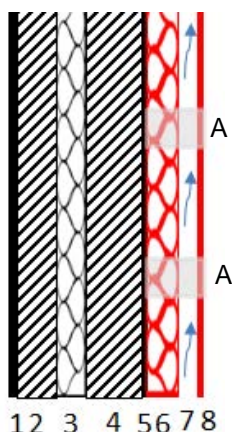
Le tableau 8 présente les épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre pour répondre aux exigences sur la valeur U.

| Ep. isolant [cm] | Valeur U de la toiture [W/(m²K)] | Exigence à atteindre |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 10 | 0.18 | Programme Bâtiments (PrgBât.) |
| 14 | 0.15 | Seuil 1 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S1) |
| 16 | 0.135 | Minergie-P® (M-P) |
| 22 | 0.11 | Seuil 2 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S2) |

Tableau 8: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade ventilée avec de l'EPS selon l'exigence à atteindre

⁵ Les caractéristiques physiques (conductivité thermique et densité) sont tirées de la norme SIA 381/1 [6] pour les panneaux amiante-ciment. L'épaisseur provient du produit "ardoise de façade" de Swisspearl®. Les données d'impacts environnementaux qui correspondent le mieux, selon la liste du KBOB 2012, sont celles pour le bardeau de fibro-ciment.

4.1.4 Façade ventilée avec de la laine de verre



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|-------------------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Enduit au plâtre | 1 | 0.7 |
| 2 | Panneau de plâtre | 6 | 0.04 |
| 3 | Laine de verre | 8 | 0.044 |
| 4 | Béton | 15 | 2.1 |
| 5 | Enduit au plâtre | 1 | 0.7 |
| 6 | Laine de verre (LV) | variable | 0.032 |
| 7 | Vide d'aération /fixation mécanique | 3 | - |
| 8 | Plaque fibro-ciment | 0.4 | 0.48 |

Tableau 9: Description de la façade ventilée avec de la laine de verre

Le bardage est maintenu par des fixations mécaniques de type « Phoenix WDK » (notées A dans l'image ci-dessus).

Le tableau 10 présente les épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre pour répondre aux exigences sur la valeur U.

| Ep. isolant [cm] | Valeur U de la toiture [W/(m²K)] | Exigence à atteindre |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 10 | 0.18 | Programme Bâtiments (PrgBât.) |
| 14 | 0.15 | Seuil 1 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S1) |
| 16 | 0.135 | Minergie-P® (M-P) |
| 22 | 0.11 | Seuil 2 de subventionnement du Canton de Vaud (Vaud S2) |

Tableau 10: Épaisseurs d'isolation à mettre en œuvre en façade ventilée avec de la laine de verre selon l'exigence à atteindre

4.1.5 Plancher



| N° détail | Matériaux | Epaisseur [cm] | Conductivité thermique [W/(m·K)] |
|-----------|---------------------------|----------------|----------------------------------|
| 1 | Chape | 12 | 1.4 |
| 2 | Béton armé | 16 | 1.8 |
| 3 | Panneau bois-ciment | 0.5 | 0.12 |
| 4 | Polystyrène expansé (EPS) | variable | 0.031 |
| 5 | Panneau bois-ciment | 0.5 | 0.12 |

Tableau 11 : Description de la rénovation du plancher avec de l'EPS

La description du plancher ci-dessus représente la base commune pour les planchers contre locaux non-chauffés et contre l'air extérieur. Le plancher contre l'extérieur nécessite l'ajout d'un vide d'aération confiné derrière un couvert métallique (passage des câbles électriques et pose des luminaires).

Compte tenu de la place disponible dans les locaux (sans diminution de la hauteur des portes (local vélo, portes d'entrée)), l'épaisseur maximale de pose d'isolation est de 9 [cm]. La valeur U obtenue se situe à 0.28 [W/(m²·K)] pour le plancher contre l'extérieur et à 0.31 [W/(m²·K)] pour le plancher contre non-chauffé.

D'autres solutions auraient été possibles (plafond ventilé ou crépis), mais les performances n'auraient pas été meilleures.

4.1.6 Fenêtres

Un seul scénario de rénovation des fenêtres est considéré. Il s'agit du remplacement des fenêtres existantes par des fenêtres avec cadre PVC et triple vitrage dans les orientations Nord, Est et Ouest du bâtiment et avec double vitrage au Sud. Les caractéristiques techniques des fenêtres sont regroupées dans le tableau 12.

| | Fenêtres nord, est et ouest | Fenêtres sud |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|--------------|
| Coefficient de transmission thermique du cadre (U_f) [$W/(m^2 \cdot K)$] | 1.3 | 1.3 |
| Coefficient de transmission thermique du vitrage (U_g) [$W/(m^2 \cdot K)$] | 0.6 | 1.1 |
| Transmission énergétique totale (G) [-] | 0.5 | 0.63 |
| Transmission énergétique perpendiculaire (g_p) [-] | 0.55 | 0.7 |

Tableau 12 : Caractéristiques techniques des vitrages

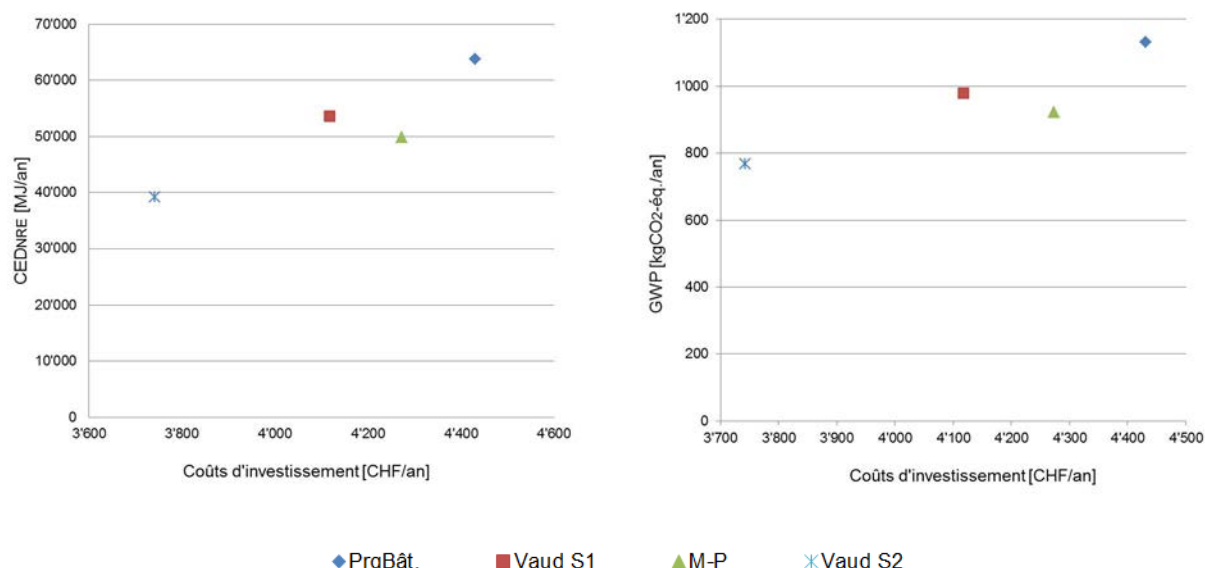
4.2 Résultats et analyses des scénarios de rénovation

Dans cette partie du projet, les coûts d'investissement totaux sont ramenés à des coûts annualisés en divisant l'investissement total net (après subvention) par la durée de vie de l'élément de construction car les éléments de construction ont des durées de vie différentes. Les intérêts sur l'investissement ont été pris en compte uniquement dans la partie du rapport dédiée à la comparaison des scénarios de rénovation globale du bâtiment (ch. 4.2.3 p.22 et ch.5 p. 27).

4.2.1 Toiture

Le scénario optimal de rénovation de la toiture est défini en analysant les coûts de construction (matériaux et pose), les subventions et les impacts environnementaux (matériaux de construction et besoin de chaleur final du bâtiment). Les coûts de déconstruction de l'existant et les déductions fiscales ne sont pas pris en compte. Sur demande du propriétaire, les coûts liés à l'énergie ne sont pas considérés car ils ne jouent pas un rôle direct dans le plan de financement de la rénovation.

Le graphique 1 présente les résultats les impacts environnementaux (matériaux et énergie) en fonction des coûts d'investissement liés aux matériaux (subventions comprises).



Remarque aux graphiques : comme mentionné dans la méthodologie (cf. ch. 3), cette représentation considère uniquement les coûts d'investissement des matériaux mais englobe les impacts des matériaux et de l'énergie de chauffage

Graphique 1 : Détermination du scénario optimal de rénovation de la toiture, à gauche CED_{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts

Ces graphiques montrent que, dans le cas de cette toiture, plus la valeur U est performante, moins l'impact environnemental est grand et plus les coûts sont bas. Ces tendances peuvent s'expliquer par :

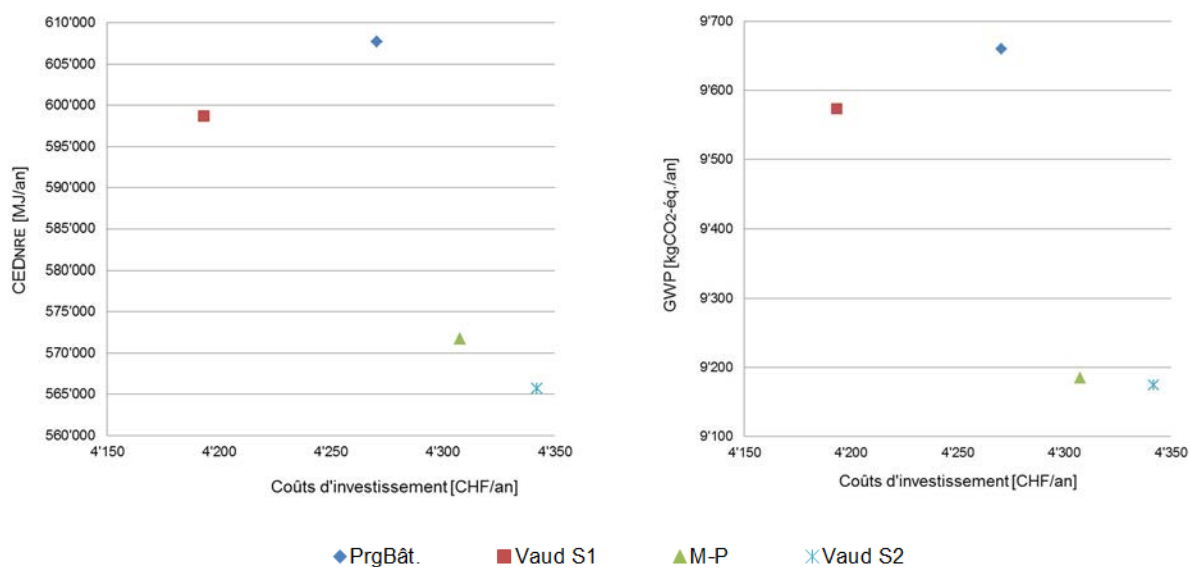
- *Aspect environnemental* : La diminution des déperditions thermiques de la toiture entraîne une forte réduction des impacts environnementaux liés à la consommation d'énergie (dans ce cas, chauffage électrique), réduction plus grande que les impacts liés aux matériaux ajoutés. Signalons que cette tendance s'inversera à partir d'un certain niveau d'isolation (cf. rapport WP2 [14]) ;
- *Aspect financier* : les seuils de subventions (fonction de la valeur U) jouent leurs rôles de levier en favorisant la rénovation performante. De plus, ces graphiques montrent qu'il est préférable de se situer juste en-dessous de la valeur U des seuils de subventionnement qu'un peu plus bas, à l'image de la solution Minergie-P® qui, avec une valeur U de 0.13 [W/(m²K)] est située entre les deux valeurs seuils (0.15 et 0.11 [W/(m²K)]) et qui présente un coût supérieur (~3.8%) à la variante "Vaud S1, U = 0.15 [W/m²K]".

Dans la suite de cette étude, la valeur U de la toiture rénovée considérée est de 0.11 [W/ (m²·K)]. Cette valeur U correspond au seuil de subvention "Vaud S2".

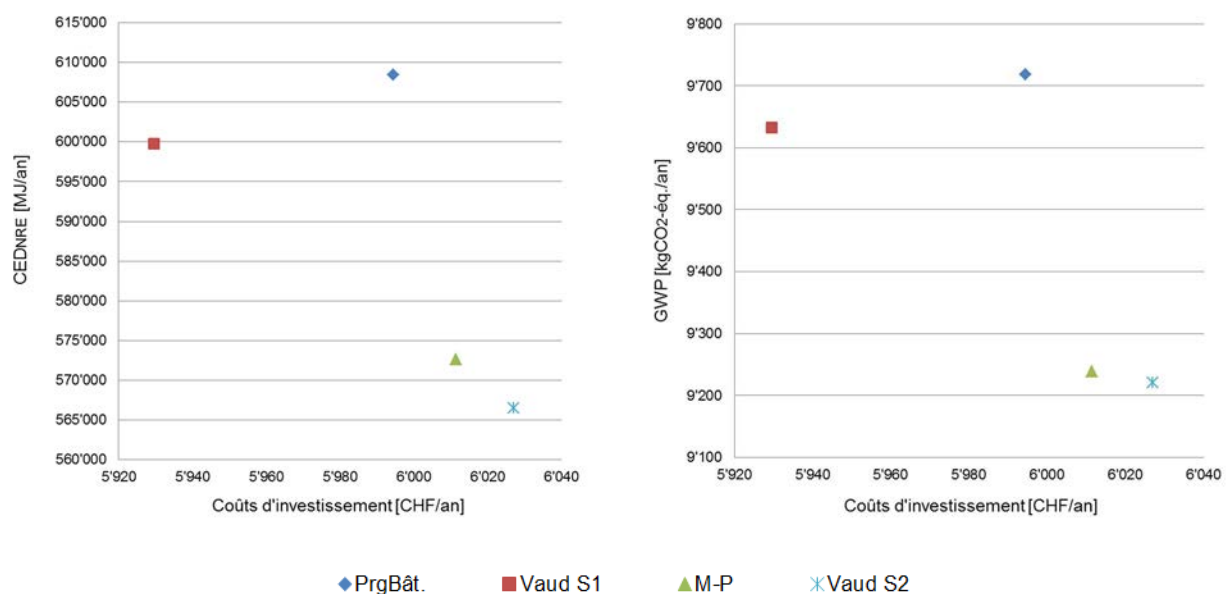
4.2.2 Façade

Trois scénarios optimaux de rénovation de la façade sont définis (un par type de rénovation) en considérant les coûts de construction de la façade (fourniture et pose), les subventions (fédérale et cantonale) et les impacts environnementaux (matériaux de construction et besoin de chaleur final du bâtiment). Les coûts de déconstruction de l'existant, les déductions fiscales et les coûts liés à l'énergie ne sont pas pris en compte.

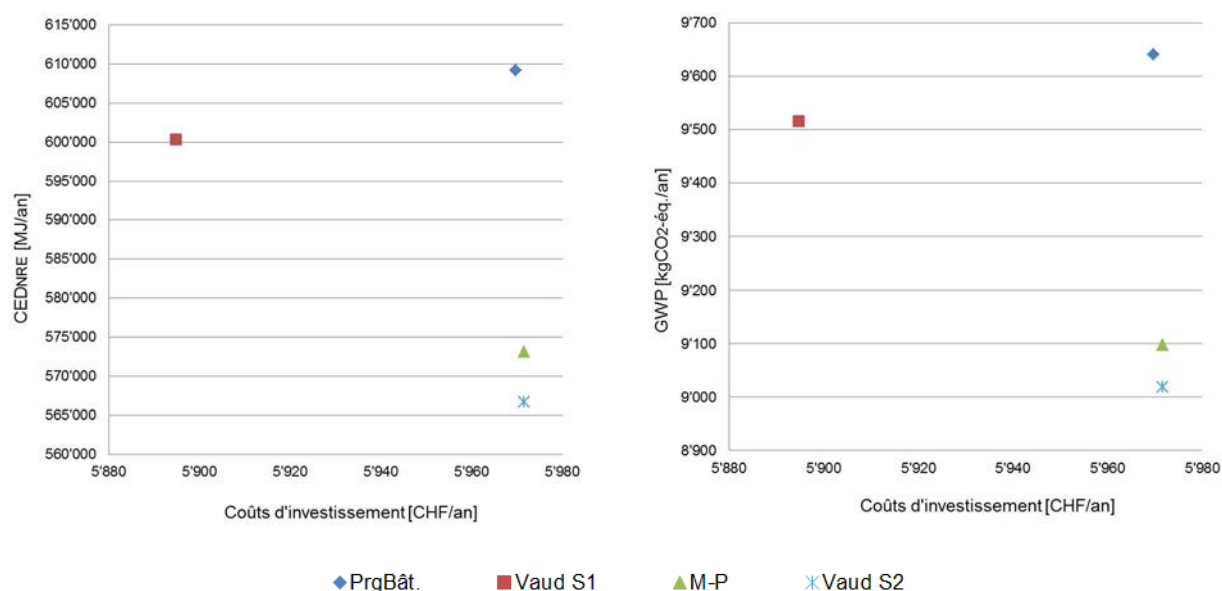
Les graphiques 2 à 4 présentent les impacts environnementaux (matériaux et énergie) en fonction des coûts d'investissement liés aux matériaux (subventions comprises).



Graphique 2 : Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade – Façade compacte avec de l'EPS, à gauche CED_{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts



Graphique 3: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade – Façade ventilée avec de l'EPS, à gauche CED_{NRE} vs Coûts et à droite GWP vs Coûts



Graphique 4: Détermination du scénario optimal de rénovation de la façade – Façade ventilée avec de la laine de verre, à gauche Coûts vs CED_{NRE} et à droite Coûts vs GWP

Les graphiques 2 à 4 montrent des tendances similaires quel que soit le type de façade. Comme pour la toiture, plus la valeur du coefficient de transmission U est performante, plus les impacts environnementaux sont faibles. Par contre, pour les coûts, l'influence des seuils de subventionnements cantonaux en fonction de la valeur U (U de 0.15 et 0.11 [W/(m²K)]) sont importants sur le coût global de rénovation de la façade. De plus, il semble que plus la valeur U de l'élément de construction s'éloigne du premier seuil de subventionnement cantonal (valeur U de 0.15 [W/(m²K)]), moins le subventionnement joue son rôle de levier pour la rénovation énergétique. C'est ici que l'apport du calcul des impacts environnementaux s'avère être important, en effet, l'analyse unique du coût mettrait, pour la façade ventilée, les scénarios "PrgBât" et "Vaud S2" sur un quasi pied d'égalité, alors que la visualisation des impacts environnementaux justifierait grandement le choix de la solution "Vaud S2".

Cependant, dans notre étude, les coûts étant le facteur limitant pour la réalisation de la rénovation, le scénario ayant le coût annuel le plus faible est choisi, soit une façade avec une valeur U de 0.15 [W/(m²K)]. Cette valeur U correspond au seuil de subvention "Vaud S1".

4.2.3 Rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment

Sur la base des chapitres 4.1.5, 4.1.6, 4.2.1 et 4.2.2, trois scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment sont définis (tableau 13).

| Élément d'enveloppe | Scénario 1 Compacte | Scénario 2 Ventilée LV | Scénario 3 Ventilée EPS |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Toiture | U=0.11 [W/ (m ² .K)] | | |
| Façade | Compacte U=0.15 [W/ (m ² .K)] | Ventilée + laine de verre U=0.15 [W/ (m ² .K)] | Ventilée + EPS U=0.15 [W/ (m ² .K)] |
| Plancher | U= 0.28 et 0.31 [W/ (m ² .K)] | | |
| Fenêtres | Nord, est et ouest : Triple vitrage Sud : Double vitrage | | |

Tableau 13 : Résumé des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment adoptés

La détermination des coûts des différents scénarios se base sur des offres d'entreprises spécialisées pour le bâtiment concerné, des prix de fournisseurs ainsi que sur la série de prix pour travaux du bâtiment et génie civil du canton de Vaud [15]. Le prix de l'électricité considéré est de 19.97 ct/kWh (HT) selon les prix du

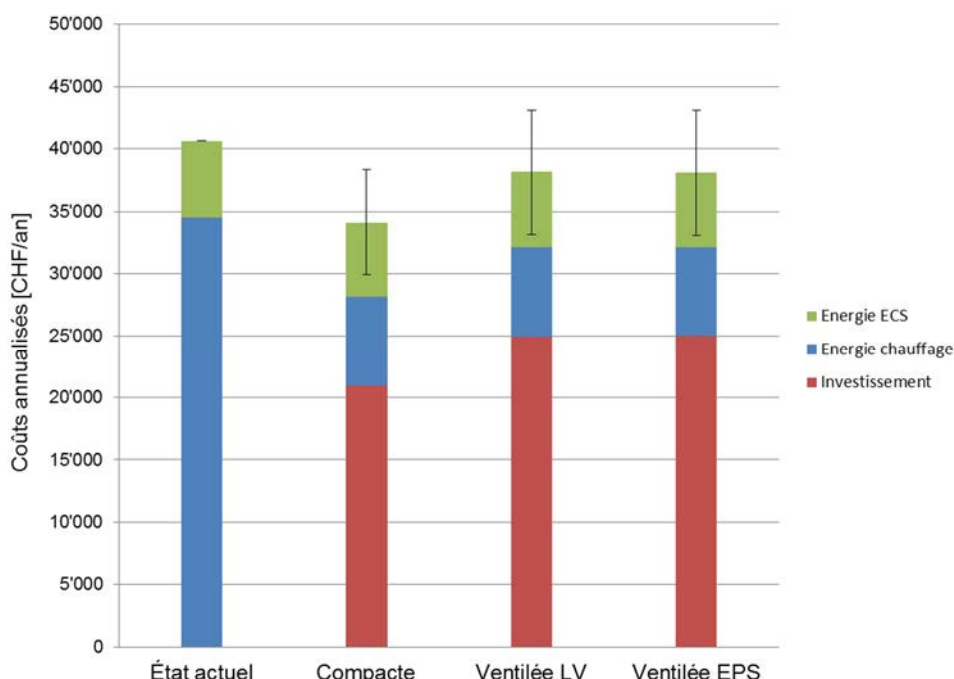
fournisseur local⁶. Les coûts annualisés sont déterminés, pour chaque élément de construction, selon la norme SIA 480 [16] en considérant un taux d'intérêt réel à 3.25%. La période de calcul du facteur d'annuité de chaque élément de construction est identique à la durée de vie utilisée pour les calculs d'écobilan (cf. tableau 1, p.13). Les subventions fédérales (Programme Bâtiments) et cantonales pour la rénovation de l'enveloppe thermique sont prises en compte à la fois à l'investissement initial et lors des remplacements.

La simulation des trois scénarios de rénovation au moyen de LESOSAI [4] montre qu'ils répondent à l'exigence SIA 380/1 justificatif [3] posée au besoin de chaleur utile pour le chauffage (cf. tableau 14).

| Besoin de chaleur utile pour le chauffage et exigence SIA 380/1 | Scénario 1 Compacte | Scénario 2 Ventilée LV | Scénario 3 Ventilée EPS |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Exigence SIA 380/1 ($Q_{h,li}$) [MJ/m ²] | 149.7 | 149.4 | 149.4 |
| Besoin de chaleur utile pour le chauffage (Q_h) [MJ/m ²] | 91.0 | 90.1 | 89.0 |

Tableau 14 : Besoin de chaleur pour le chauffage (Q_h) des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment comparés aux exigences SIA 380/1 [3]

Le graphique 5 présente les coûts annualisés du bâtiment dans son état actuel et les coûts des trois scénarios de rénovation globale de l'enveloppe thermique du bâtiment. Une marge d'erreur de 20% sur les coûts d'investissement est admise. Les résultats numériques sont présentés dans l'annexe 1. De plus, le coût lié à la production d'ECS a été ajouté à ces graphiques afin d'observer le poids de ce poste de consommation sur le coût total.



Graphique 5: Coûts annualisés des scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment

Ce graphique montre que :

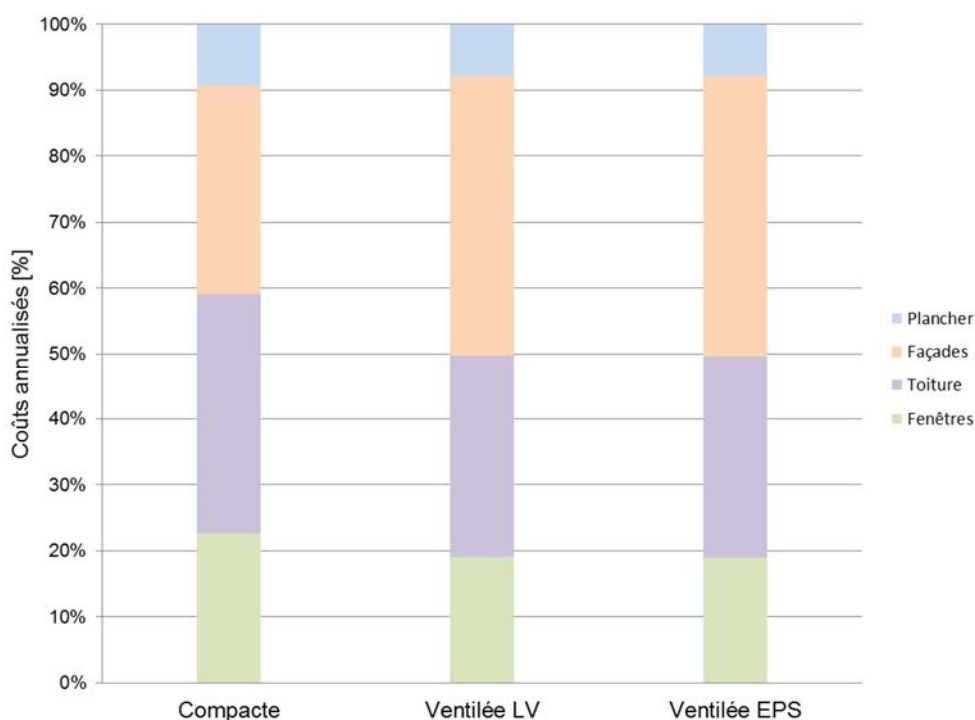
- Les coûts totaux annuels des trois scénarios de rénovation globale de l'enveloppe du bâtiment sont plus faibles que ceux liés au bâtiment dans son état actuel;
- Les coûts annuels liés au besoin de chaleur pour le chauffage sont diminués d'un facteur env. 4.8 pour les trois scénarios de rénovation par rapport à l'état actuel;
- Les coûts annuels liés au besoin de l'ECS représentent 45% des coûts annuels totaux de l'énergie pour les trois scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique, alors qu'ils représentent 15% des

⁶ Selon le simulateur en ligne de la Romande Énergie

coûts annuels totaux de l'énergie dans le cadre du bâtiment avant rénovation. Signalons, de plus, que le calcul du besoin de chaleur pour l'ECS s'est basé sur la valeur de $75 \text{ MJ/m}^2\text{A}_E$ (cf. norme SIA 380/1 [3]). La rénovation entraînant une modification du tracé de l'enveloppe thermique du bâtiment (rez-inférieur hors de l'enveloppe), la surface de référence énergétique s'en trouve diminuée (-27 m^2). Ainsi, les besoins de chaleur utile pour l'ECS ont diminués alors que le nombre d'habitants de l'immeuble n'a pas changé avant et après rénovation. Cette situation traduit une limitation à l'utilisation de la norme.

La relative faible différence entre le coût total des scénarios de rénovations et le coût total avant rénovation nécessite une analyse d'incertitude sur la détermination des coûts. Dans l'étude présentée, les coûts d'investissement ne comprennent pas le démontage de l'existant, la gestion des déchets et la réalisation constructive des détails propres à ce bâtiment. Selon le cours CRB [17], en phase d'étude préliminaire, une marge d'erreur de plus ou moins 20% est applicable sur la détermination du coût de ces travaux. En considérant cette marge d'erreur sur les coûts d'investissement (cf. graphique 5), seule la rénovation avec une façade compacte reste dans tous les cas meilleure que l'état actuel. Les autres variantes se situant dans une plage proche de la situation actuelle.

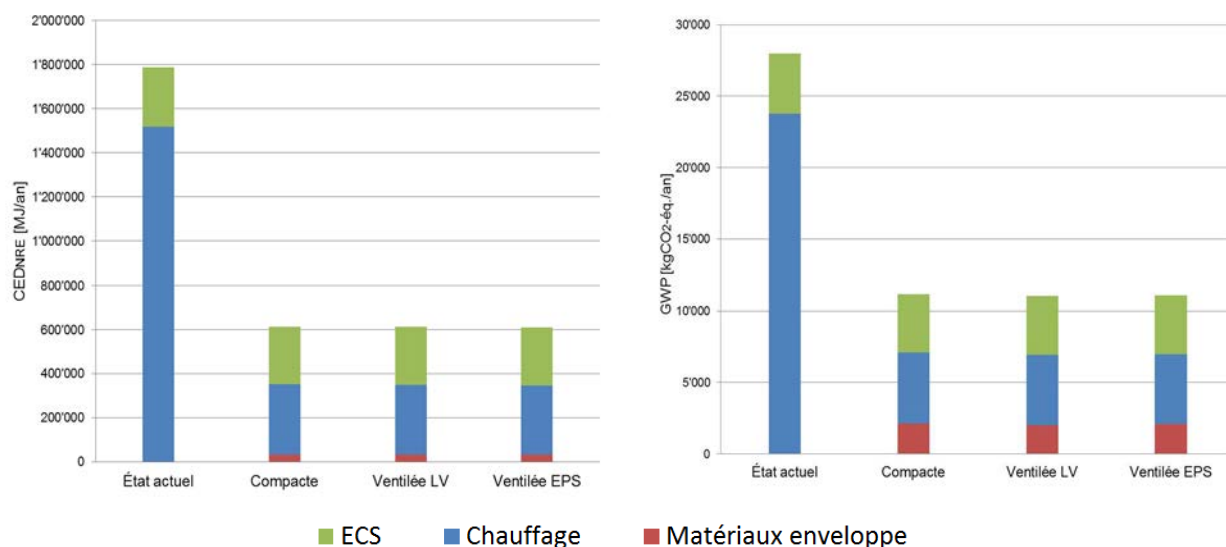
Le graphique 6 montre la répartition en % des coûts d'investissement en fonction des éléments de construction pour les trois scénarios de rénovation.



Graphique 6: Répartition du coût annualisé d'investissement des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment

La façade représente entre 32 et 43% des coûts annuels de l'enveloppe thermique alors que l'ensemble des autres éléments (similaires entre les différents scénarios) représentent entre 57 et 68% du total.

Le graphique 7 présente la comparaison des différents scénarios de rénovation de l'enveloppe du bâtiment par rapport au bâtiment actuel selon l'impact de l'énergie grise (CED_{NRE}) et du potentiel de réchauffement climatique (GWP). Les résultats numériques sont présentés dans l'annexe 2.

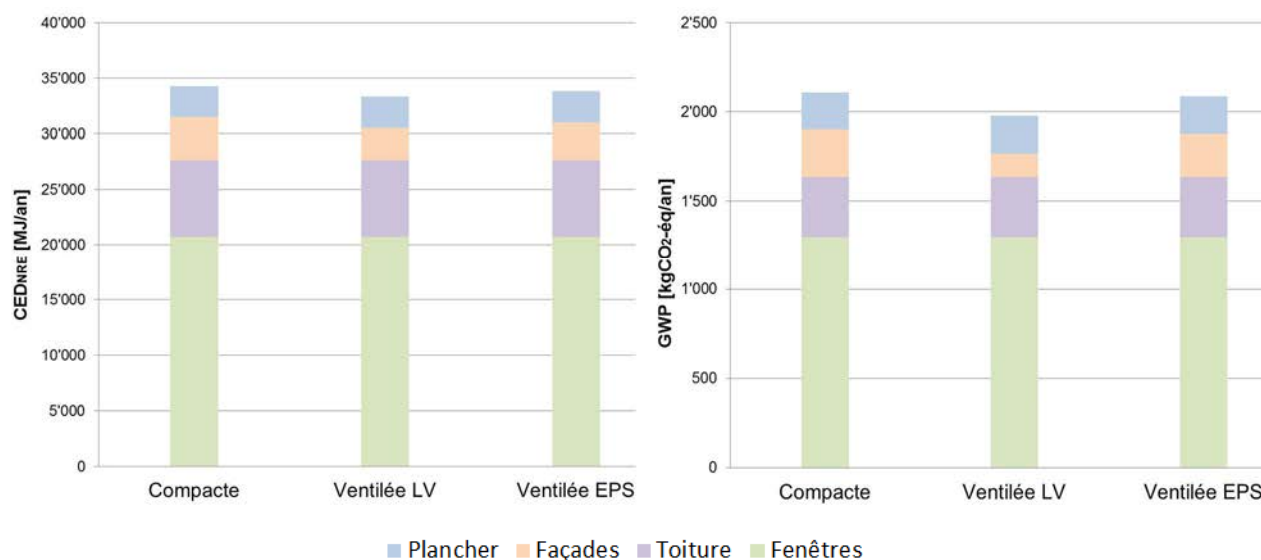


Graphique 7 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation globale du bâtiment (CED_{NRE} à gauche et GWP à droite)

Le graphique 7 montre que :

- Les résultats pour l'indicateur CED_{NRE} et GWP présentent les mêmes tendances.
- Quel que soit le scénario de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment, l'impact environnemental du bâtiment est nettement plus faible que celui du bâtiment actuel (respectivement 60 et 65% de moins pour le GWP et CED_{NRE});
- L'impact environnemental des matériaux de construction, pour les scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment, est très faible par rapport à l'impact lié à la consommation d'énergie totale (~6%) et d'énergie du chauffage (~11%) en ce qui concerne l'indicateur CED_{NRE}. L'impact des matériaux est plus marqué d'un point de vue du GWP par rapport à l'impact lié à la consommation d'énergie totale (~23%) et d'énergie du chauffage (~42%). Cela est dû à la donnée d'impact de la KBOB pour l'électricité qui présente une valeur d'impact pour le GWP très basse alors que la valeur d'impact pour le CED_{NRE} est élevée ;
- L'impact environnemental des trois scénarios de rénovation est quasiment identique. En effet, l'impact des matériaux de construction est faible par rapport à l'impact lié à l'énergie, la performance énergétique des différents éléments de construction est identique (toiture, planchers et fenêtres) ou proche (façade) et l'impact de l'ECS est le même;
- L'impact environnemental lié à l'ECS représente ~45% de l'impact environnemental (CED_{NRE} ou GWP) de l'énergie consommée, ce qui est conséquent.

Le graphique 8 montre les impacts environnementaux (CED_{NRE} à gauche et GWP à droite) des différents éléments de construction pour les trois scénarios de rénovation.



Graphique 8 : Impacts environnementaux (CED_{NRE} et GWP) des éléments de construction des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment

Il ressort de ces graphiques que :

- L'impact global des matériaux de l'enveloppe thermique des trois scénarios de rénovation est à peu près équivalent d'un point de vue du CED_{NRE} et du GWP ;
- L'impact environnemental des éléments de construction identiques (toiture, fenêtres et plancher) dans les trois scénarios de rénovation représente la part la plus importante des impacts environnementaux globaux dans chacun des scénarios de rénovation (~90%) ;
- Les fenêtres (env. 62%) et la toiture (env. 18%) représentent 80% de l'impact environnemental des éléments de l'enveloppe thermique. Le cadre de fenêtre en matière plastique représente 45% de l'impact total pour une fraction de cadre comprise entre 20 et 25%. La surface totale de fenêtres du bâtiment est de 289 [m²] (soit 38.6% de la surface des façades) ;
- L'impact environnemental lié uniquement à la façade est légèrement plus élevé pour la façade compacte que les façades ventilées. Cela provient du nombre de remplacement considéré sur la durée de vie du bâtiment. Pour rappel, la durée de vie de la façade compacte est de 30 ans alors que la durée de vie pour les façades ventilées est de 40 ans. Cette différence de durée de vie a une influence sur le nombre de remplacements et les impacts liés. En effet, le calcul selon la norme SIA 2032 [11] et Minergie®-Eco considère un nombre de remplacements fractionnaires et non entier ce qui amène à considérer un remplacement pour la façade compacte et un demi remplacement pour les façades ventilées.

Finalement, le type de façade n'a que peu d'influence sur l'impact environnemental de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment.

En conclusion à ce chapitre sur la rénovation de l'enveloppe, il ressort de l'analyse quantitative que le scénario avec la façade compacte semble être la solution la plus favorable. En effet, il est difficile de départager les solutions d'un point de vue environnemental mais, l'aspect économique est quelque peu plus clair et fait ressortir la façade compacte. Cependant, certains aspects techniques ne sont pas à négliger :

- La façade compacte crépie peut demander plus d'entretien que la façade ventilée (développement d'algues, de champignons et de lichens)⁷;
- Les deux types de façade permettent de faire passer le réseau de distribution de chaleur pour le chauffage et la ventilation dans l'isolation. Cependant, la façade ventilée minimise l'intervention en cas de panne et permet, dans le cas d'utilisation avec de la laine de verre, de mieux enrober la distribution de chauffage passant dans l'isolation que l'EPS.

⁷ Façades, la bonne enveloppe, Flumroc, 2013

Cette étude a été présentée au propriétaire du bâtiment qui, en considérant les coûts, les impacts environnementaux et les considérations techniques, a opté pour le scénario de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment avec une façade ventilée isolée (scénario 2 "Ventilée LV") avec de la laine de verre.

Ce choix nous semble sensé, malgré une plus-value financière, il engendre un impact environnemental plus faible au niveau des éléments de construction (matériaux) et équivalent en considérant l'ensemble du bâtiment (énergie et matériaux). De plus, les aspects techniques sont importants et à ne pas négliger dans un tel choix.

5 Substitution du système de chauffage et de production d'ECS

L'objectif est de déterminer un scénario optimal de substitution du système de chauffage électrique actuel. Il s'agit de comparer, tant d'un point de vue des coûts que des impacts environnementaux, différents scénarios de rénovation du système de production et de distribution de chaleur pour le chauffage et l'ECS.

Les coûts des différents scénarios ont été évalués sur la base d'offres, d'estimations par des prestataires de service et sur la base du tableur excel fourni par le WWF [18]. Les subventions cantonales vaudoises sont considérées. Tous les coûts sont annualisés. Des facteurs d'annuités ont été définis pour les coûts d'investissements selon la norme SIA 480 [16] en considérant un taux d'intérêt réel à 3.25% sur une période de calcul équivalente à la durée de vie des installations techniques selon le CT SIA 2032 [11] (cf. tableau 1).

Les coûts d'investissement pour la production et la distribution de chaleur, les coûts de l'énergie finale consommée y compris la variation annuelle (cf. tableau 15), les coûts d'entretien de l'installation, la taxe CO₂ sur les combustibles fossiles sont pris en compte. Les déductions fiscales liées à l'investissement ne sont pas considérées. Le canton de Vaud peut également demander la prise en compte des coûts externes⁸ (art. 7, al.1, RLVLene [19]), ainsi, les résultats seront montrés avec et sans ces coûts.

Les subventions cantonales suivantes sont prises en compte :

- pour la création du réseau hydraulique de distribution de chaleur dans le cadre d'un remplacement du chauffage électrique;
- pour le remplacement de la chaudière électrique;
- pour l'installation solaire thermique;
- pour la rénovation de l'enveloppe thermique en cas de remplacement du chauffage électrique (bonus cantonal);

Les subventions octroyées pour la substitution du chauffage électrique (au niveau des installations techniques et de l'enveloppe thermique) sont considérées une seule fois (investissement initial).

Le tableau 15 regroupe les prix de l'énergie ainsi que leur augmentation respective considérée selon la norme SIA 480 [16].

⁸ Coûts externes, définition selon la norme SIA 480 :2004 : « Coûts annuels inhérents à l'exploitation de l'ouvrage, qui n'entrent pas dans les coûts du projet, mais sont à la charge de la collectivité »

| Vecteur énergétique | Coût HT [ct/kWh] | Variation annuelle [%] selon SIA 480 |
|---------------------------|------------------|--------------------------------------|
| Électricité ⁹ | 19.97 | 0 |
| Gaz naturel ¹⁰ | 9.20 | 1 |
| Mazout ¹¹ | 9.22 | 1.5 |
| Pellets ¹² | 7.50 | 0.5 |

Tableau 15 : Coûts et variation annuelle de l'énergie

Les variations annuelles du coût de l'énergie peuvent être différentes en fonction de la période considérée. Par exemple, selon l'OFEN [20], pour la période de 2006 à 2014, l'électricité présente une variation annuelle de +3%, le gaz naturel et le mazout +2.5% et le pellet + 3%. Le choix de conserver les variations annuelles de la norme SIA 480 se base sur l'article 7 du règlement d'application de la loi sur l'énergie (RLVLEne) du canton de Vaud [19].

Les impacts environnementaux considèrent que :

- Les couches de matériaux remplacées ou ajoutées
- Les installations techniques remplacées ou ajoutées
- L'énergie finale consommée

Les scénarios utilisant un chauffage électricité direct ne considèrent pas d'impacts environnementaux liés à la production et à la distribution de chaleur. Ceux-ci ne sont pas disponibles dans les données d'impacts de la KBOB. Cette hypothèse est justifiée par le fait que l'impact de ces systèmes est faible.

Le dimensionnement de l'ensemble des scénarios considérés est basé sur le bâtiment ayant subi une rénovation de l'enveloppe, comme décrit dans la conclusion du chapitre 4.2.3. (scénario 2 « Ventilé LV » cf. tableau 14 p. 23). Ce scénario présente une puissance de pré-dimensionnement de la chaudière de 32.3 [kW] (chauffage + ECS).

5.1 Description des scénarios de substitutions

Les différents scénarios de substitution du chauffage électricité direct sont répertoriés dans le Tableau 16.

| Postes de consommation | Scénario 1 Él. | Scénario 2 Él.+ S | Scénario 3 G.+Sth | Scénario 4 M.+ Sth | Scénario 5 Pellets | Scénario 6 PAC AE | Scénario 7 PACg |
|-------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Chauffage | Électricité | Électricité compensée par PV | Gaz | Mazout | Pellets | PAC air-eau | PAC à gaz eau-eau avec récupération d'air de la ventilation simple flux |
| ECS | Électricité | Électricité + solaire th. | Gaz + solaire th. | Mazout + solaire th. | Pellets | PAC air-eau | |
| Ventilation simple flux | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |

Tableau 16 : Scénarios de substitution du chauffage électricité direct

Le scénario 1 correspond au bâtiment ayant subi uniquement la rénovation de l'enveloppe thermique. Les installations techniques ne sont ni remplacées, ni substituées. Seules les subventions allouées pour la rénovation de l'enveloppe sont comptabilisées (le bonus pour la substitution du chauffage électricité n'est pas comptabilisée).

⁹ Prix simulé via le simulateur en ligne du distributeur local pour un ménage de 4 personnes

¹⁰ Prix communiqué par le distributeur local pour l'emplacement du bâtiment

¹¹ Prix évalué sur les années 2000-13 selon l'Indice des prix à la consommation (IPC) fourni par l'Office Fédéral de la Statistique pour une consommation de 6'001-9'000 litres

¹² Prix moyen du pellet (405.25 CHF par tonne TTC) pour la période mars 2011 et mars 2013 fourni par le site internet prixpellet.ch

Le scénario 2 conserve un système de chauffage électrique couplé à une installation solaire photovoltaïque (PV) pour les besoins de chauffage (compensation d'une partie de la consommation) et avec une installation solaire thermique pour la production d'ECS. L'installation PV couvre 73.5% du besoin de chaleur utile pour le chauffage ($40'218 \text{ [kWh/an]} - 265 \text{ [m}^2\text{]}$ de panneaux photovoltaïques). De manière à simplifier les calculs, le bilan consommation/production électrique sera établi annuellement. L'installation solaire thermique est dimensionnée avec un taux de couverture solaire annuel de 60% ($40.3 \text{ [m}^2\text{]}$). L'appoint nécessaire pour le chauffage et la production d'ECS est assuré par le réseau électrique. Les subventions pour la rénovation de l'enveloppe et l'installation de solaire thermique sont considérées. Les radiateurs électriques sont remplacés.

Les scénarios 3 à 7 nécessitent une nouvelle distribution de chaleur et de nouveaux émetteurs de chaleurs à eau. L'émission de chaleur, se fait par des radiateurs avec une distribution passant dans l'isolation périphérique des façades. Le nombre total de radiateurs pour le bâtiment est de 100.

Les scénarios 3 et 4 couplent une chaudière à condensation à gaz ou à mazout avec une installation solaire thermique couvrant 60% des besoins annuels d'ECS ($40.3 \text{ [m}^2\text{]}$). Les subventions pour la rénovation de l'enveloppe (y compris le bonus cantonal pour la substitution du chauffage électrique) et pour l'installation de solaire thermique sont considérées dans ces deux scénarios. Il n'y a pas de subvention pour la création du réseau hydraulique de distribution de chaleur car l'une des conditions d'octroi de cette subvention est la mise en place d'une centrale de chauffe fonctionnant entièrement avec une énergie renouvelable.

Les scénarios 5 et 6 concernant la chaudière à pellets et la PAC air-eau. Ces deux systèmes ne sont pas couplés avec une installation solaire thermique. En effet, le pellet est déjà considéré comme une énergie renouvelable et la PAC air-eau représente la solution technique optimale pour l'habitat individuel étudié dans le cadre du WP3 [21]. Pour cette dernière, il semble donc intéressant d'étudier son évaluation dans le contexte d'un bâtiment collectif. Les subventions pour la rénovation de l'enveloppe (y compris le bonus cantonal pour la substitution du chauffage électrique) et la subvention pour la création du réseau hydraulique de distribution¹³ ont été prises en compte. A cela s'ajoute, pour la chaudière à bois, une subvention cantonale pour la substitution du chauffage électrique contrairement à la PAC¹⁴.

Une ventilation simple flux est considérée dans tous les scénarios. Cette ventilation influence directement le débit d'air thermiquement actif et, par suite, le besoin de chaleur pour le chauffage. Ce débit est déterminé sur la base de la demande de label Minergie [22]. Il est évalué à $1.36 \text{ [m}^3\text{/(h.m}^2\text{)]}$. Il fait passer le besoin de chaleur utile pour le chauffage du bâtiment de $90.1 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$ à $147.9 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$. Ce qui représente une augmentation du besoin de chaleur utile d'un facteur 1.64.

La ventilation simple flux des scénarios 1 à 6 est réalisée avec une ventilation d'extraction simple hygro-réglable dont le coût d'investissement est faible [23] ($\sim 1'500 \text{ CHF/logement}$). Le système de ventilation simple flux, dans le cadre du scénario 7, est plus compliqué avec la mise en place de deux monoblocs avec batterie de récupération de chaleur et du dispositif de mélange d'air extrait avec l'air extérieur.

Le tableau 17 regroupe les rendements (η), le coefficient de performance (COP) pour la PAC air-eau et le taux de couverture (Couv.) des différentes installations techniques.

¹³ Obligation de réaliser le décompte individuel des frais de chauffage

¹⁴ La subvention cantonale pour la substitution du chauffage électrique par la PAC air-eau est possible uniquement si une PAC à sonde géothermique n'est pas réalisable (interdiction de forage par la DIRNA-eau)

| Postes de consommation | | Scénario 1 Él. | Scénario 2 Él.+ S | Scénario 3 G.+Sth | Scénario 4 M.+ Sth | Scénario 5 Pellets | Scénario 6 PAC AE | Scénario 7 PACg |
|------------------------|------------|-------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| Chauffage | η [%] | 100 | 100 | 90 ¹⁾ | 90 ¹⁾ | 75 ¹⁾ | | 149 ²⁾ |
| | COP [-] | | | | | | 3.3 ¹⁾ | |
| | Couv. [%] | 100 | 26.5 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| ECS | η [%] | 100 | 100 | 65 ¹⁾ | 65 ¹⁾ | 50 ¹⁾ | 1.8 | 149 ²⁾ |
| | COP [-] | | | | | | 1.8 ¹⁾ | |
| | Couv. [%] | 100 | 40 | 40 | 40 | 100 | 100 | 100 |

¹⁾ tiré du cahier technique SIA 2040 [1]

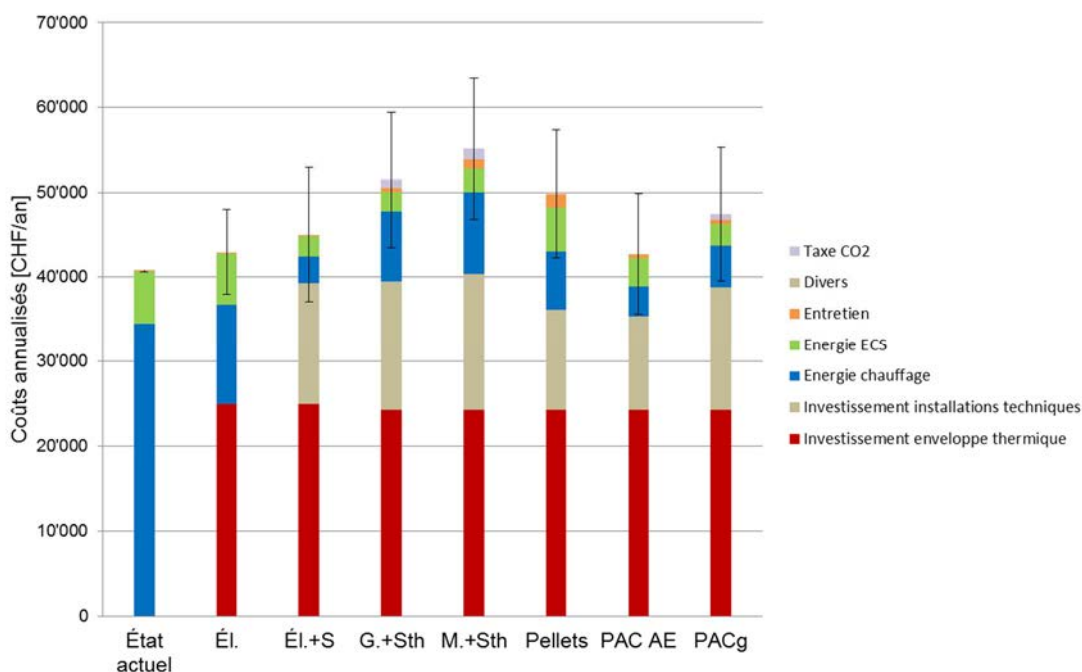
²⁾ rendement sur PCI tiré de la documentation technique Visa Technologie, PAC à Gaz type E3GS - B0/W50

Tableau 17 : Rendements et couvertures des scénarios de substitution du chauffage électrique direct

La part d'électricité provenant des panneaux PV étant pour l'instant négligeable sur le réseau suisse, ce dernier est considéré comme un moyen de stockage. De ce fait, le bilan consommation/production est réalisé sur l'année entière et non mensuellement. Le scénario 2 présente, pour le chauffage, un taux de couverture par l'électricité du réseau de 26.5% car il est considéré que 73.5% est couvert par la production photovoltaïque.

5.2 Résultats et analyses des scénarios de substitution

Le graphique 9 présente les coûts annualisés du bâtiment dans son état actuel et les coûts des sept scénarios de rénovation des installations techniques (y compris les coûts de la rénovation de l'enveloppe). Une marge d'erreur de 20% sur les coûts d'investissement liés à la rénovation de l'enveloppe thermique et des installations techniques (y compris les coûts d'entretien) est également visible sur ce graphique (trait noir vertical borné). Les résultats numériques détaillés sont présentés dans l'annexe 3.



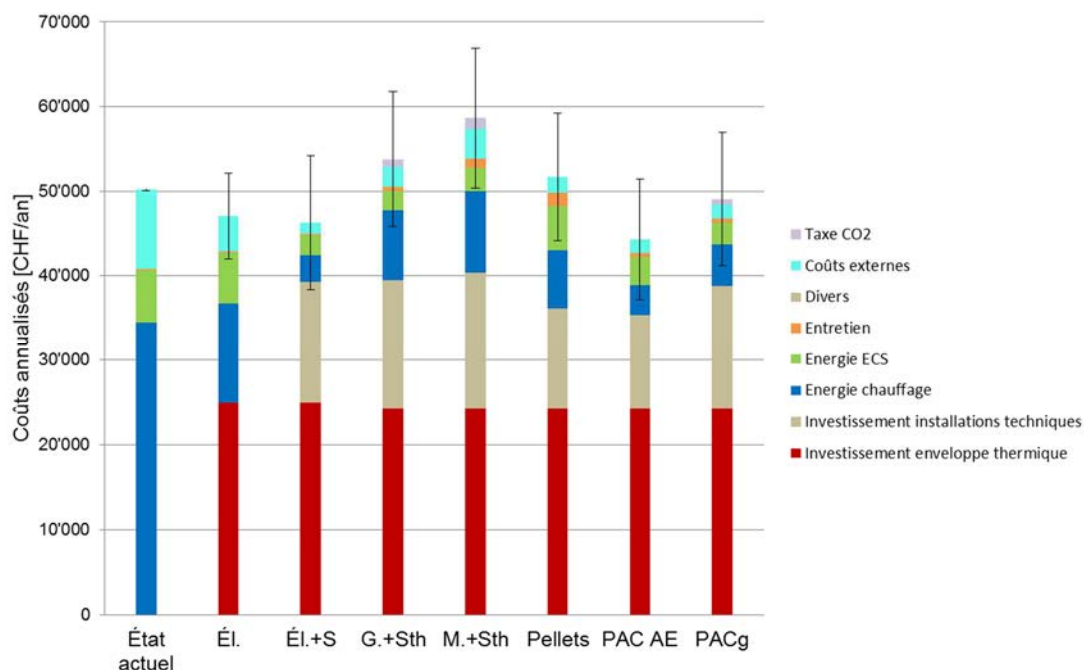
Graphique 9 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation selon le type d'installations techniques (sans coûts externes)

Le graphique 9 montre que :

- L'ensemble des scénarios de rénovation du bâtiment présentent des coûts annualisés supérieurs à celui du bâtiment dans son état actuel ;
- La substitution de l'électricité par tout autre vecteur énergétique nécessitant la réalisation d'une nouvelle distribution de chaleur est annuellement plus onéreuse que la situation actuelle ;
- Les scénarios conservant le chauffage électrique ("Él." et "Él.+S") ou utilisant l'électricité comme vecteur énergétique de chauffage ("PAC AE") ont les coûts annualisés les plus faibles, principalement par des coûts d'investissement plus bas pour la rénovation des installations techniques ;
- Le coût annualisé lié à la consommation d'énergie de chauffage est fortement diminué par rapport au bâtiment dans son état actuel (de 65% à 91% selon le scénario). Ce coût représente 7 à 27 % des coûts annualisés totaux ;
- Le coût annualisé lié à la consommation d'énergie pour la production d'ECS diminue pour les systèmes couplés à l'énergie solaire (électricité, gaz et mazout) et pour les systèmes à PAC. Ce coût reste stable pour le système électrique et pour le chauffage à pellets. Il représente 5 à 14 % des coûts annualisés totaux ;
- Les coûts d'investissement totaux (enveloppe thermique et installations techniques) sont conséquents ; ils représentent 58 à 87% des coûts annualisés selon le scénario ;
- De fait, les autres coûts sont très faibles par rapport aux coûts annualisés liés à l'énergie et aux investissements ;
- Le coût d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe thermique est plus faible pour les scénarios avec substitution du chauffage électrique grâce au bonus cantonal alloué (+15 CHF/m²) en cas de substitution du chauffage électrique ;
- L'application d'une marge d'erreur positive de 20% sur les coûts d'investissement, d'entretien et les frais divers augmente encore l'écart entre le coût annualisé total du bâtiment existant et celui des différents scénarios de rénovation ;
- Par contre, si cette marge d'erreur tend dans le sens négatif (-20%), les scénarios conservant le chauffage électrique ("Él." et "Él.+S") ou utilisant l'électricité comme vecteur énergétique de chauffage ("PAC AE"), ainsi que la PAC à gaz deviennent plus avantageux que le bâtiment dans son état actuel.

Sur la base de cette analyse financière, les scénarios conservant le chauffage électrique ("Él." et "Él.+S") ou utilisant l'électricité comme vecteur énergétique de chauffage ("PAC AE"), ainsi que la PAC à gaz semblent être les solutions les plus séduisantes. En effet, les coûts annualisés sont légèrement plus élevés que les coûts du bâtiment actuel. Ces solutions permettent soit de minimiser les coûts liés à la consommation d'énergie ("Él.+S", "PAC AE" et "PACg") ou de minimiser les coûts d'investissement ("Él."). Il est nécessaire de rappeler que le scénario couplant chauffage électrique et panneaux solaires ("Él.+S") ne tient pas compte des aspects de simultanéité entre la production solaire PV et la consommation. Une discussion devrait être faite en collaboration avec le fournisseur local d'énergie électrique afin de connaître les conditions de rachat et de vente de l'électricité du réseau dans le cas de ce bâtiment. Dès lors, un calcul financier et environnemental plus précis (calcul mensuel ou horaire) pourrait être réalisé.

Comme mentionné dans la méthodologie de calcul, l'ajout des coûts externes des différents vecteurs énergétiques ouvre quelque peu l'analyse et permet de prendre en considération les coûts inhérents à la collectivité et qui ne sont pas directement payés par l'exploitant d'un bâtiment. Le graphique 10 présente les coûts annualisés de chaque scénario de rénovation des installations techniques en y additionnant les coûts externes.



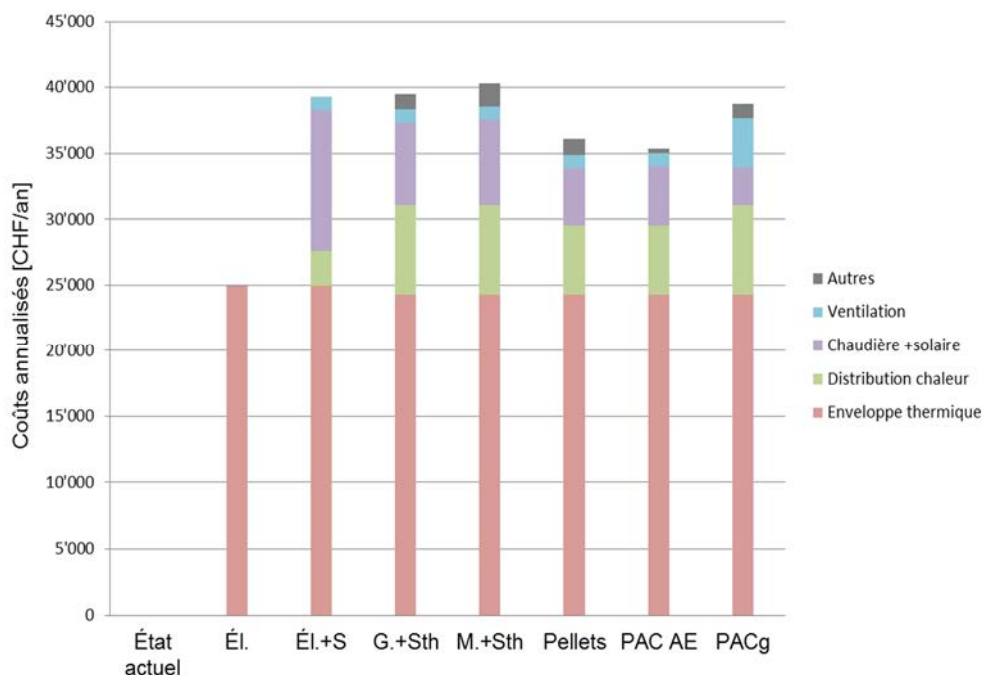
Graphique 10 : Coûts annualisés des scénarios de rénovation des installations techniques (avec coûts externes)

Le graphique 10 montre que :

- la prise en compte des coûts externes est favorable à tous les scénarios de rénovation, étant donné qu'ils sont liés à la consommation d'énergie du bâtiment et que, dans notre analyse, tous les scénarios présentent une consommation d'énergie plus faible. A cela s'ajoute un coût externe unitaire par kilowattheure plus élevé pour l'électricité (5 [ct/kWh]) que pour les autres vecteurs énergétiques (gaz naturel 3 [ct/kWh], mazout 4.5 [ct/kWh], pellet 1.5 [ct/kWh]) ;
- les coûts externes sont différents selon le vecteur énergétique. Pour les scénarios utilisant l'électricité, ils représentent 23% du coût de l'énergie (chauffage + ECS), pour le scénario gaz, 22%, pour le mazout, 28% et pour le système à pellets 16%.

En tenant compte des coûts externes, l'attractivité des scénarios "ÉI.+S", "PAC AE" et "PACg" est renforcée car ceux-ci minimisent la consommation d'énergie finale du bâtiment. Le scénario subissant uniquement la rénovation de l'enveloppe thermique minimisant uniquement les coûts d'investissement devient, lui, légèrement moins attractif.

Comme mentionné précédemment, dans un immeuble locatif, les coûts annualisés liés à l'énergie sont à la charge du locataire. Ainsi, le propriétaire sera plus intéressé par les coûts annualisés liés aux investissements, à l'entretien et aux divers. Le graphique 11 présente la répartition de ces coûts annualisés à la charge du propriétaire pour chaque scénario.



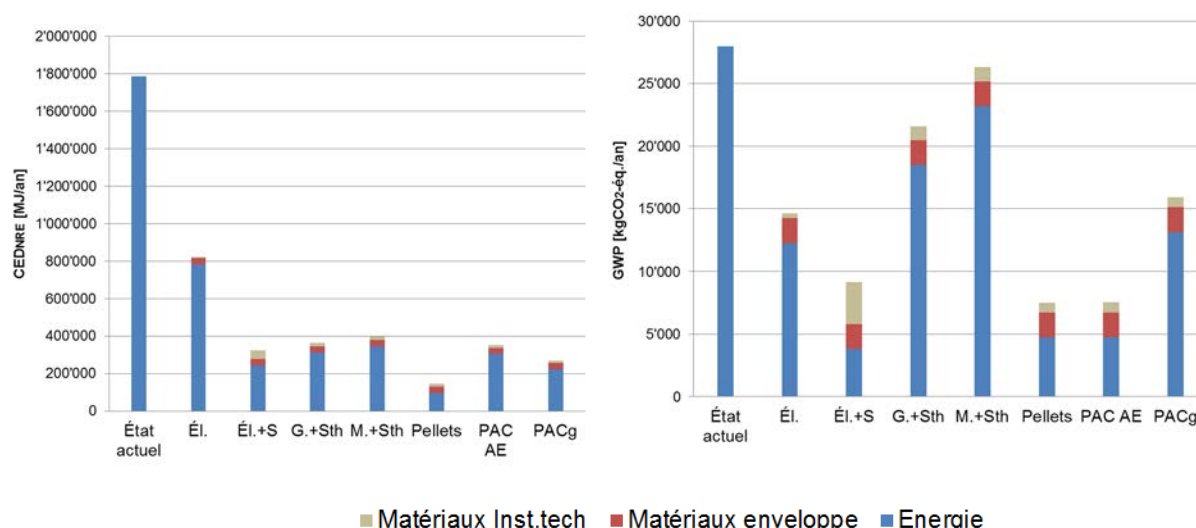
Graphique 11 : Coûts annualisés du capital

Il ressort du graphique 11 que :

- L'assainissement de l'enveloppe thermique représente le plus gros poste de dépense (de 60 à 100% selon le scénario);
- la réalisation d'un réseau hydraulique de distribution représente 15 à 17% des coûts annualisés totaux en tenant compte de l'investissement pour la rénovation de l'enveloppe thermique. Par contre, ces coûts représentent entre 42 et 48% du coût lié à la rénovation des installations techniques;
- Les coûts annualisés de la distribution de chaleur pour les scénarios PAC air-eau et chauffage à pellets sont plus faibles que pour les autres scénarios par l'octroi de la subvention cantonale pour la substitution du chauffage électrique (subvention n'étant pas octroyé pour les systèmes de production de chaleur non-renouvelable) ;
- le système de ventilation du scénario avec une PAC à gaz péjore cette solution alors qu'il présente les coûts du système de production de chaleur les plus faibles. En effet, ce système de ventilation est plus complexe que dans les autres scénarios avec la mise en place de deux monoblocs avec batterie de récupération de chaleur et du dispositif de mélange d'air extrait avec l'air extérieur;

C'est évidemment la solution consistant à ne rénover que l'enveloppe thermique du bâtiment qui est la plus économe. Cependant, si il y a une volonté de rénover les installations techniques, la PAC air-eau représente la meilleure alternative au chauffage électrique et ce malgré un COP peu favorable. Toutefois, l'ensemble des scénarios se situe dans une fourchette relativement serrée comprise dans la marge des 20%.

L'analyse des impacts environnementaux de chaque scénario présente d'autres conclusions que l'analyse financière. Le graphique 12 illustre les résultats obtenus pour les deux indicateurs retenus, l'énergie primaire non-renouvelable (CED_{NRE}) à gauche et le potentiel de réchauffement climatique (GWP) à droite :



Graphique 12 : Impacts environnementaux des scénarios de rénovation des installations techniques, CED_{NRE} à gauche et GWP à droite

Le Graphique 12 montre que :

- Quel que soit l'indicateur (CED_{NRE} et GWP), l'ensemble des scénarios de rénovation des installations techniques a des impacts environnementaux plus faibles que le bâtiment dans son état actuel, diminution très marquée pour le CED_{NRE} et plus mesurée pour le GWP ;
- L'impact environnemental de l'énergie consommée représente la plus grande part des impacts environnementaux à l'exception du scénario "ÉI.+S" pour le GWP ;
- Le scénario "ÉI.+S" couplant le chauffage électrique et le solaire (thermique et photovoltaïque) a des impacts liés aux matériaux plus importants que ceux liés à l'énergie pour le GWP (58%) et bien plus faible en ce qui concerne le CED_{NRE} (24%) ;
- Les scénarios utilisant du gaz ou du mazout sont moins bien classés en GWP qu'en CED_{NRE}. La raison est liée aux données d'impacts du gaz et du mazout qui sont entre 1.5 et 2 fois plus grandes pour le GWP par rapport à l'électricité alors qu'elles sont plus de 50% plus faibles en ce qui concerne le CED_{NRE} ;
- L'impact environnemental des installations techniques du scénario "ÉI." est uniquement lié à l'installation de ventilation ;
- Le chauffage à pellets est la meilleure solution d'un point de vue du CED_{NRE}. Il est, par contre, équivalent au scénario "PAC AE" d'un point de vue du GWP. Cela résulte d'une consommation d'énergie finale 4 fois supérieure à la solution "PAC AE" et des données d'impacts environnementales 12 fois plus petites pour le CED_{NRE} et 4 fois plus petites pour le GWP par rapport à l'électricité.

La considération des aspects environnementaux est importante. En effet, d'un point de vue uniquement financier, il est légitime de se demander si la rénovation de ce bâtiment a un sens étant donné que les coûts annualisés sont soit légèrement inférieurs à la situation actuelle soit supérieurs. Les impacts sur notre environnement montrent que l'utilisation du bâtiment en l'état engendre annuellement jusqu'à 12 fois plus d'impacts sur l'énergie primaire par rapport à la meilleure solution de rénovation (pellets) et jusqu'à 4 fois plus d'émissions de gaz à effet de serre (pellets) !

D'un point de vue uniquement environnemental, les solutions présentant le meilleur compromis entre énergie primaire et gaz à effet de serre sont les solutions "électrique + solaire", "PAC AE" et "chauffage à pellets".

6 Positionnement par rapport à la société à 2'000 Watts

Le cahier technique (CT) SIA 2040 [1] transcrit les objectifs de la société à 2'000 Watts posées au domaine du bâtiment.

Le CT 2040 fournit des valeurs indicatives (VI) pour les indicateurs CED_{NRE} et GWP, ceci pour les phases "construction" et "exploitation" du bâtiment. Ces valeurs n'ont pas de caractère obligatoire, mais permettent d'atteindre les objectifs de la société à 2'000 Watts posées au domaine du bâtiment.

La phase "construction" inclut la construction du bâtiment, le remplacement et l'élimination des éléments de construction et des installations techniques.

La phase "exploitation" comprend la consommation d'énergie liée à la production de chaleur (chauffage et ECS), la ventilation/climatisation, l'éclairage (intérieur et extérieur) et les équipements d'exploitation (appareils ménagers, appareils de divertissement, etc).

Dans notre étude, la détermination de la consommation d'électricité pour les postes autres que le chauffage et l'ECS s'est basée sur les valeurs unitaires par mètre carré fourni dans le CT 2040 chapitres 2.3.4 à 2.3.7. Ainsi, les consommations d'énergie électrique des postes suivants ont été considérées selon la norme :

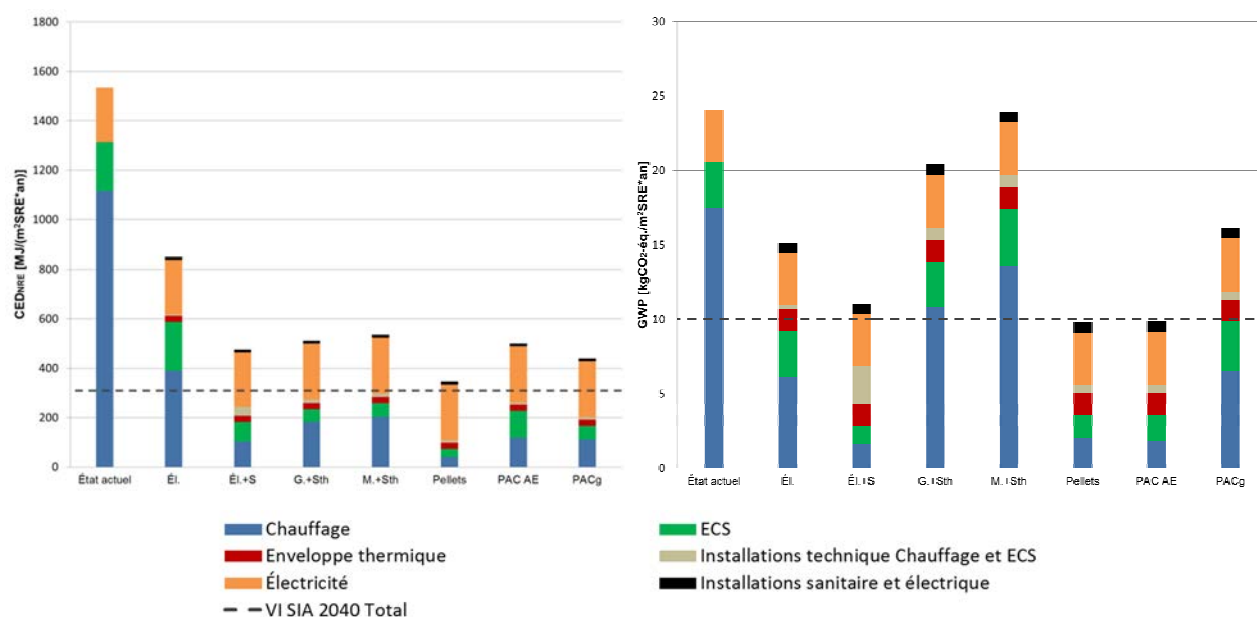
- Auxiliaires pour le chauffage et l'ECS ;
- Ventilation ;
- Eclairage ;
- Equipements d'exploitation

La consommation d'énergie électrique des auxiliaires pour le chauffage et l'ECS est comptabilisée pour toutes les solutions nécessitant la réalisation d'un réseau hydraulique.

Les impacts environnementaux des installations sanitaire et électrique ainsi que de l'énergie électrique consommée sont calculés à partir de la base de données des impacts environnementaux de la KBOB [12].

Les impacts environnementaux de la consommation d'énergie électrique sont comptabilisés pour le bâtiment dans son état actuel, alors que les impacts environnementaux des installations sanitaire et électrique ne sont pas pris en compte car ces installations sont considérées conservées en l'état. Les autres scénarios comptabilisent à la fois les impacts environnementaux de la consommation d'énergie électrique et le remplacement des installations sanitaire et électrique.

Le graphique 13 met en relation les résultats obtenus dans l'étude présentée avec la valeur indicative totale (construction et exploitation) donnée par la norme SIA 2040, ceci pour les indicateurs CED_{NRE} et GWP.

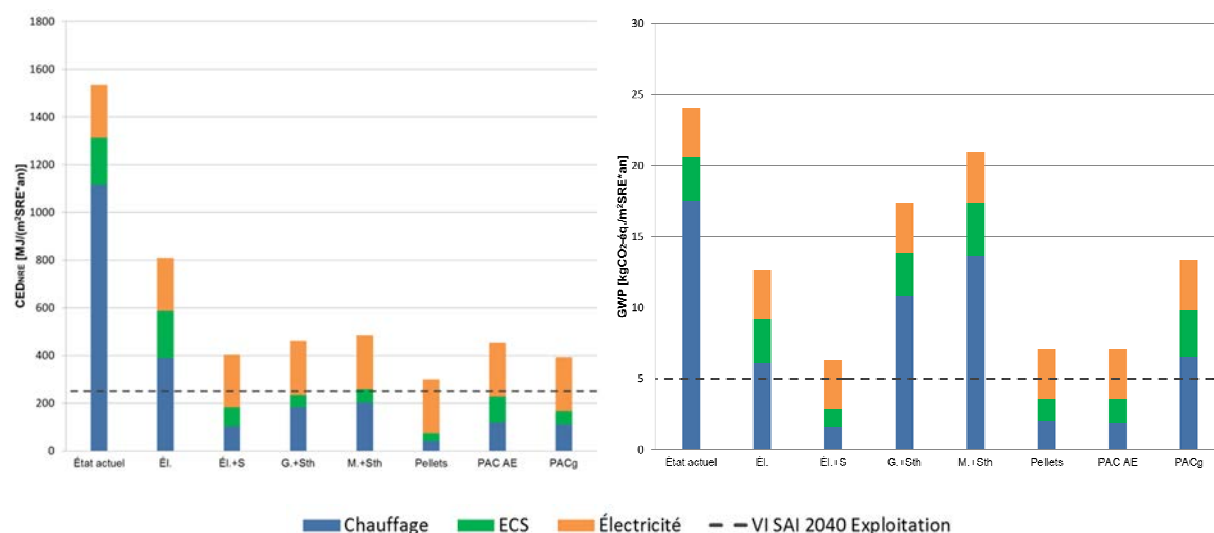


**Graphique 13 : Positionnement des scénarios par rapport à la valeur indicative totale du CT SIA 2040 [1],
CED_{NRE} à gauche et GWP à droite**

Il ressort du graphique 13 que :

- Les résultats sont très différents selon l'indicateur évalué. Aucun scénario ne répond à la valeur indicative totale selon l'indicateur CED_{NRE} alors que les scénarios "chauffage à pellets" et "PAC AE" y répondent pour le GWP ;
- Selon l'indicateur GWP, les solutions à base de gaz ou de mazout couplées à des panneaux solaires thermiques présentent une valeur indicative totale proche du bâtiment dans son état actuel. Ceci malgré un impact lié au chauffage plus faible. Cela provient principalement de la donnée d'impact environnemental pour le mazout et le gaz naturel qui sont respectivement 2 fois et 1.5 fois plus élevées que celle de l'électricité. De plus, il est intéressant de constater que pour le GWP, ces deux systèmes ne respectent pas la VI lorsque seuls les impacts liés au chauffage et à l'ECS sont considérés. Cette unique considération remet profondément en doute le bien-fondé d'un remplacement de systèmes électriques par un système avec combustible fossile.
- Le poste consommation d'énergie électrique du bâtiment (auxiliaire, ventilation, éclairage et les équipements d'exploitation) engendre entre 26 et 66% des impacts totaux selon l'indicateur CED_{NRE} et entre 15 et 36% des impacts totaux selon l'indicateur GWP ;
- L'énergie d'exploitation (chauffage, ECS et électricité) engendre entre 85 et 95% des impacts environnementaux totaux selon l'indicateur CED_{NRE} et 57 à 87% selon l'indicateur GWP. Le scénario "ÉI+S" présente, pour l'indicateur GWP, une répartition quasiment équivalente entre les impacts liés à l'exploitation (57%) et la construction (43%) ;

Compte tenu de cette dernière remarque, il est intéressant d'observer l'évaluation des différents scénarios par rapport aux valeurs indicatives pour l'exploitation (graphique 14).



Graphique 14: Positionnement des scénarios par rapport à la valeur indicative "Exploitation" du CT SIA 2040, CED_{NRE} à gauche et GWP à droite

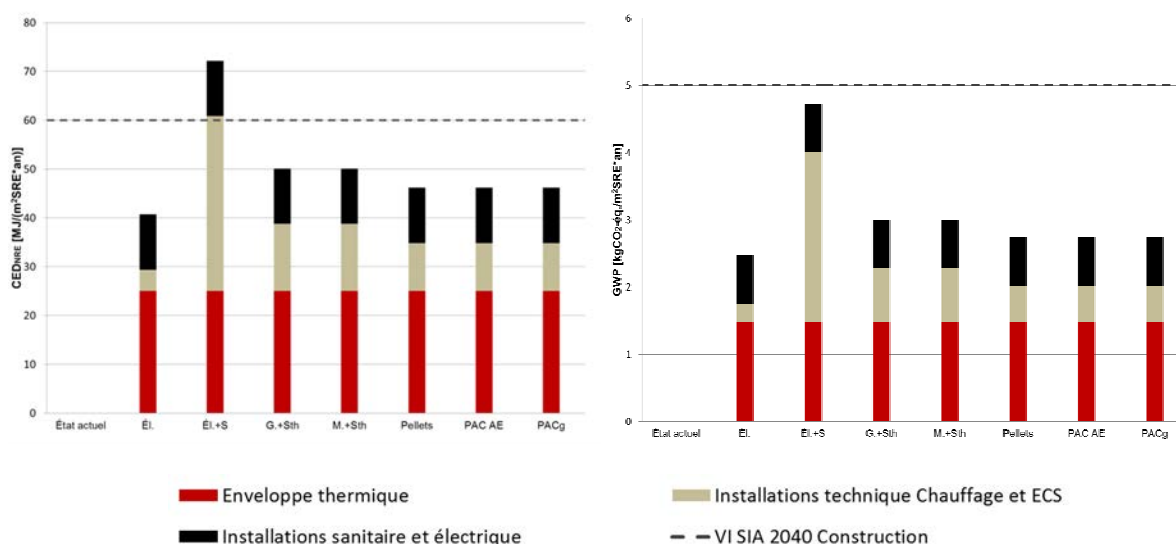
Les résultats présentent les mêmes tendances pour l'indicateur CED_{NRE} que ceux présentés auparavant dans le graphique 13. En effet, il a été démontré que les impacts environnementaux liés à l'énergie d'exploitation représentent globalement entre 85 et 95% des impacts totaux. Ce graphique montre que :

- Aucun scénario ne répond à la valeur indicative d'exploitation pour les deux indicateurs ;
- Pour l'indicateur CED_{NRE}, la seule considération des impacts liés au chauffage et à l'ECS permet à tous les scénarios de répondre à la valeur indicative sauf pour le scénario rénovation de l'enveloppe thermique + chauffage électrique ("ÉI.") et pour le scénario de chauffage à mazout ("M+Sth") ;
- Pour l'indicateur GWP, seuls les scénarios "ÉI.+S", "pellets" et "PAC AE" répondent à la valeur indicative d'exploitation lorsque seuls les impacts liés au chauffage et à l'ECS sont considérés ;
- L'impact environnemental de la consommation d'électricité représente entre 27 et 76% de l'impact de l'énergie d'exploitation selon l'indicateur CED_{NRE} et entre 17 et 55% selon l'indicateur GWP ;

Ces différents graphiques montrent que la consommation d'énergie électrique est une position importante à ne pas négliger si l'on souhaite tendre vers la valeur indicative "Exploitation". Il est donc nécessaire d'apporter un soin particulier à l'optimisation des postes de consommation d'électricité, notamment les équipements d'exploitation et l'éclairage.

D'un point de vue uniquement des besoins d'énergie pour le chauffage et l'ECS, les scénarios "ÉI.+S", "pellets" et "PAC AE" représentent les scénarios les plus favorables selon les deux indicateurs considérés.

Le graphique 15 présente le positionnement des scénarios en fonction des impacts environnementaux des matériaux de construction de l'enveloppe thermique et des installations techniques.



Graphique 15: Positionnement des scénarios par rapport à la valeur indicative "Construction" du CT SIA 2040, CED_{NRE} à gauche et GWP à droite

Ces graphiques montrent que :

- L'ensemble des scénarios répond aux valeurs indicatives "Construction", à l'exception du scénario "ÉI.+S" pour l'indicateur CED_{NRE};
- L'impact environnemental de l'enveloppe thermique et des installations techniques est quasiment équivalent pour les scénarios de substitution du chauffage électrique direct ;
- L'impact environnemental lié aux installations techniques du scénario "ÉI." est lié à l'installation de ventilation ;
- L'impact environnemental des installations sanitaire et électrique représente environ 23% de l'impact environnemental de la construction selon l'indicateur CED_{NRE} et GWP ;
- L'impact environnemental élevé du scénario "ÉI.+S" est principalement dû à l'installation des panneaux solaires photovoltaïques qui représente 87.8% des impacts des installations techniques de chauffage et d'ECS et 66% de l'impact total de la construction selon l'indicateur CED_{NRE} et respectivement 89% et 69% selon le GWP;

Les graphiques 13 à 15 montrent que la consommation d'énergie électrique pour les auxiliaires, l'éclairage, la ventilation et les équipements d'exploitation a une influence plus importante sur les résultats que les installations sanitaire et électrique et que l'optimisation de ces postes de consommation représente un enjeu important à ne pas négliger lors de la rénovation d'un bâtiment. Le respect des valeurs indicatives du CT SIA 2040 demande, en premier lieu, à optimiser la consommation d'énergie ou de compenser avec la mise en œuvre d'installations techniques performantes.

En conclusion, le respect du CT SIA 2040 demande un effort financier conséquent malgré la prise en compte des subventions, ceci afin de rénover à la fois l'enveloppe thermique et les installations techniques.

7 Conclusions

La première partie du rapport s'est concentrée sur la rénovation de l'enveloppe du bâtiment. Plusieurs variantes de rénovation des différents éléments de construction répondant à différents critères thermiques ont été comparées d'un point de vue financier, environnemental et technique. Une analyse globale de l'enveloppe a été présentée intégrant les meilleures solutions obtenues par éléments de construction. Celle-ci a permis d'aboutir sur une solution de rénovation diminuant drastiquement la consommation d'énergie de chauffage du bâtiment tout en n'alourdissant pas les coûts d'investissement. La pose d'une isolation conséquente dans la toiture (18 cm), le remplacement des fenêtres existantes par des fenêtres à double et triple vitrage et la pose d'une façade ventilée avec isolation en laine de verre (14 cm) ont été retenus. Cette partie du rapport a montré que si le coût d'investissement est le facteur principal de choix, alors il est préférable de choisir des éléments de construction répondant aux valeurs de seuils des subventions. Globalement, la rénovation choisie correspond à des exigences énergétiques comprises entre celles du Programme Bâtiments et de Minergie-P®.

Sur la base de cette rénovation, différentes solutions d'installations techniques ont été analysées afin de procéder à l'assainissement du chauffage électrique direct (chauffage et ECS). L'analyse financière complète montre qu'aucune des solutions présentent des coûts annualisés totaux (coûts de l'énergie de chauffage et d'ECS, coûts d'investissement pour la rénovation de l'enveloppe thermique et coûts des installations techniques) avantageux par rapport aux coûts du bâtiment dans son état actuel. Cependant, les solutions avec une PAC air-eau et une PAC à gaz présentent des coûts annualisés totaux relativement proches des coûts du bâtiment actuel malgré le fait qu'une distribution hydraulique doit être ajoutée au bâtiment. Les solutions conservant un chauffage par radiateurs électriques présentent des coûts annualisés totaux proches du bâtiment actuel. La solution consistant uniquement à rénover l'enveloppe thermique permet de minimiser les coûts d'investissement et d'offrir des coûts annualisés totaux équivalant à la solution de substitution par une PAC air-eau. Par contre, d'un point de vue environnemental, la solution de substitution par une PAC air-eau est bien meilleure. Elle permet de diminuer de 2.35 fois l'impact environnemental de l'indicateur CED_{NRE} et de 1.95 fois celui de l'indicateur GWP.

Plus globalement, au niveau environnemental, la radicale diminution de la consommation d'énergie liée à la rénovation de l'enveloppe permet de faire baisser les impacts d'énergie primaire et d'émission de gaz à effet de serre de toutes les solutions envisagées. Cependant, lorsque les résultats sont mis en rapport avec les exigences du CT SIA 2040 et en tenant compte de la consommation d'électricité des autres postes (éclairage, équipements d'exploitation, etc.) et des installations techniques associées, aucun scénarios de rénovation du bâtiment ne répond à la valeur indicative totale (exploitation + construction) selon l'indicateur CED_{NRE} et seules les solutions avec un chauffage à pellets et une PAC air-eau se situent au-dessous de la valeur indicative totale pour l'indicateur GWP.

De fait, et sur la base de cette analyse, il est possible d'affirmer que :

- la rénovation de l'enveloppe thermique semble, en premier lieu, inévitable pour viser une utilisation rationnelle de l'énergie.
- Les meilleures solutions de substitution du chauffage électrique, économiquement parlant, consistent à conserver un chauffage électrique, que ce soit en rénovant uniquement l'enveloppe thermique du bâtiment, en couplant le chauffage électrique avec du solaire (photovoltaïque + thermique) ou en substituant le chauffage électrique par une PAC air-eau.
- Dans le cas du scénario utilisant l'énergie photovoltaïque pour compenser la consommation d'énergie de chauffage, il est nécessaire de considérer l'impact réel de l'électricité produite par le photovoltaïque en tenant en compte de la notion de non-simultanéité entre production par les panneaux PV et consommation sur le réseau.
- Les solutions de substitution par du gaz (hors PAC à gaz) ou du mazout sont à la fois économiquement et environnementalement défavorables par rapport aux autres solutions. De plus, la Suisse dépend complètement de l'étranger pour ces deux ressources et n'a que peu d'influence sur les enjeux géopolitiques des régions productrices.
- Le choix d'une bonne rénovation d'enveloppe de bâtiment (mais pas nécessairement la plus performante d'un point de vue énergétique) permet de s'approcher des objectifs environnementaux

du CT SIA 2040 à la condition de la coupler avec des installations techniques présentant de faibles impacts environnementaux.

- Le scénario consistant à remplacer uniquement le système de chauffage électrique par un autre système sans modifier l'enveloppe du bâtiment n'a pas été analysé dans cette étude. Cette option pourrait sembler intéressante pour un propriétaire qui n'est pas directement concerné par les coûts de l'énergie. Cependant, et par rapport aux solutions de remplacement techniques analysées dans ce rapport, les coûts d'investissement du système de remplacement devront considérer des plus-values pour la distribution de chaleur (à l'intérieur du bâtiment et plus dans l'isolation périphérique), pour l'émission de chaleur (plus grandes surfaces) et pour la production de chaleur (plus grande puissance). De plus, d'un point de vue environnemental, cette solution ne peut pas se justifier car, ce rapport a montré que la consommation d'énergie du bâtiment actuel est très pénalisante du point de vue environnemental.

Cette étude montre que, d'un point de vue environnemental, la rénovation énergétique de l'enveloppe thermique couplée à la substitution du chauffage électrique par un autre vecteur est avantageuse. Cependant, la considération des coûts pour effectuer ces assainissements reste un obstacle de taille. Les coûts élevés pour la rénovation de l'enveloppe, la nouvelle distribution de chaleur et la production de chaleur par rapport aux subventions allouées (équivalent à 8 - 10% des coûts totaux) peuvent être un frein important à la rénovation énergétique et ce, même si une partie des coûts peut être reportée sur les loyers. Toutefois, dans le cas d'étude présenté, l'assainissement énergétique peut mieux se justifier car l'état de vétusté du bâtiment exigeait dans tous les cas des travaux de rénovation. Ainsi, les coûts propres liés à l'amélioration du bilan thermique peuvent être minimisés.

8 Références

- [1] "SIA 2040 - La voie SIA vers l'efficacité énergétique." 2011.
- [2] C. des services cantonaux de l'énergie Conférence des directeurs cantonaux de l'énergie, "Modèle de prescriptions énergétiques des cantons (MoPEC)," 2014.
- [3] "SIA 380/1 - L'énergie thermique dans le bâtiment," 2009.
- [4] "LESOSAI 7, certifications et bilans écologiques et énergétiques de bâtiments." .
- [5] EPIQR, "Expertise EPIQR, Immeuble 7840, Savigny," 2008.
- [6] "SIA 381/1 - Caractéristiques de matériaux de construction." 1980.
- [7] "SIA 381/3 - Les degrés-jours en Suisse," 1982.
- [8] "SIA 380/4 - L'énergie électrique dans le bâtiment." 2006.
- [9] "SIA 385/3 - Alimentation du bâtiment en eau chaude sanitaire." 1991.
- [10] "SIA 2024 - Conditions d'utilisation standard pour l'énergie et les installations du bâtiment." 2006.
- [11] "SIA 2032 - L'énergie grise des bâtiments." 2010.
- [12] "Données des écobilans dans la construction, KBOB," 2012.
- [13] "<http://www.dasgebaeudeprogramm.ch/index.php/fr/le-programme-batiments/objectifs-du-programme-batiments>," 2015. .
- [14] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-RENO - PARTIE C - WP2 : Optimum environnemental et financier des isolations pour les rénovations," 2015.
- [15] Fédération vaudoise des Entrepreneurs, "Série de prix pour travaux du bâtiment et génie civil." 2012.
- [16] "SIA 480 - Calcul de rentabilité pour les investissements dans le bâtiment." 2006.
- [17] "Cours CRB - Planification des coûts de construction Bâtiment." 2013.
- [18] WWF, "Comparaison des coûts annuels des systèmes de chauffage (avec alimentation en eau chaude) pour les installations de 30-60 kW." 2005.
- [19] "RLVLEne - Règlement d'application de la loi du 16 mai 2006 sur l'énergie (RLVLEne)." 2006.
- [20] V.-O. Beuret, "Evolution des marchés des énergies fossiles 3 / 2014," vol. 2014. 2014.
- [21] HES-SO / HEIG-VD / LESBAT, "Projet ECO-Reno - PARTIE E - WP3.3a : Comparaison de scénarios de rénovation de l'enveloppe et du système de chauffage électrique - Étude de cas : Habitat individuel," 2015.
- [22] "Demande de label Minergie." 2014.
- [23] F. Flourentzou, "Rénovation de l'enveloppe: solutions et exemples." 2012.

9 Annexes

Annexe 1: Coûts de rénovation de l'enveloppe thermique

Annexe 1.a Coûts d'investissement des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment

| Coûts d'investissement | | | | | |
|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------|--------------------|---------------------|
| Scénario de rénovation de l'enveloppe du bâtiment | Durée d'amortissement [an] | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
| | | État actuel | Compact | Ventilé LV | Ventilé EPS |
| | | CHF | CHF | CHF | CHF |
| | | Etat actuel | Façade compacte | Façade ventilée LV | Façade ventilée EPS |
| Fenêtres | 30 | 0 | 98'267 | 98'267 | 98'267 |
| Toiture | 40 | 0 | 199'468 | 199'468 | 199'468 |
| Façade compacte | 30 | 0 | 148'683 | 0 | 0 |
| Façade ventilée LV | 40 | 0 | 0 | 258'784 | 0 |
| Façade ventilée EPS | 40 | 0 | 0 | 0 | 260'175 |
| Plafond | 30 | 0 | 36'820 | 36'820 | 36'820 |
| Subventions [CHF] | | | | | |
| Subventions pour Fenêtres | 30 | | 8'022 | 8'022 | 8'022 |
| Subventions pour Toiture | 40 | | 29'597 | 29'597 | 29'597 |
| Subventions pour Façade compacte | 30 | | 22'885 | | |
| Subventions pour Façade ventilée LV | 40 | | | 22'995 | |
| Subventions pour Façade ventilée EPS | 40 | | | | 22'995 |
| Subventions pour Plafond | 30 | | | | |
| Coût TTC après subvention [CHF] | | | | | |
| Fenêtres | 30 | 0 | 90'245 | 90'245 | 90'245 |
| Toiture | 40 | 0 | 169'870 | 169'870 | 169'870 |
| Façade compacte | 30 | 0 | 125'798 | 0 | 0 |
| Façade ventilée LV | 40 | 0 | 0 | 235'789 | 0 |
| Façade ventilée EPS | 40 | 0 | 0 | 0 | 237'180 |
| Plafond | 30 | 0 | 36'820 | 36'820 | 36'820 |
| Investissement net initial après subventions | CHF | 0 | 422'733 | 532'724 | 534'115 |
| Investissement net à 20 ans après subventions | CHF | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Investissement net à 30 ans après subventions | CHF | 0 | 252'863 | 127'065 | 127'065 |
| Investissement net à 40 ans après subvention | CHF | 0 | 169'870 | 405'659 | 407'050 |
| Annuité [CHF] | | | | | |
| Fenêtres | 30 | 0 | 4'754 | 4'754 | 4'754 |
| Toiture | 40 | 0 | 7'649 | 7'649 | 7'649 |
| Façade compacte | 30 | 0 | 6'627 | 0 | 0 |
| Façade ventilée LV | 40 | 0 | 0 | 10'617 | 0 |
| Façade ventilée EPS | 40 | 0 | 0 | 0 | 10'680 |
| Plafond | 30 | 0 | 1'940 | 1'940 | 1'940 |
| Coût du capital | CHF/an | 0 | 20'970 | 24'960 | 25'023 |

Annexe 1.b Coûts de l'énergie des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment

| Coût de l'énergie de chauffage | | | | | |
|---------------------------------------------------------|---------------|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
| | | État actuel | Compacte | Ventilée LV | Ventilée EPS |
| Vecteur énergétique | | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour le chauffage | kWh/an | 160'032 | 33'475 | 33'352 | 32'932 |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour l'ECS | kWh/an | 28'333 | 27'593 | 27'763 | 27'763 |
| Fraction utile chauffage [-] | - | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Fraction utile ECS [-] | - | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Consommation finale chauffage | kWh/an | 160'032 | 33'475 | 33'352 | 32'932 |
| Consommation finale d'énergie pour l'ECS | kWh/an | 28'333 | 27'593 | 27'763 | 27'763 |
| Consommation annuelle d'énergie finale totale | kWh/an | 188'366 | 61'068 | 61'115 | 60'695 |
| Energie chauffage | CHF/an | 34'515 | 7'220 | 7'193 | 7'103 |
| Energie ECS | CHF/an | 6'111 | 5'951 | 5'988 | 5'988 |

Annexe 2: Impacts environnementaux des scénarios de rénovation de l'enveloppe thermique du bâtiment

| | Scénario de référence | | | Scénario 1 | | | Scénario 2 | | | Scénario 3 | | |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | État actuel | | | Compacte | | | Ventilée LV | | | Ventilée EPS | | |
| | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] | CED [MJ/an] | NRE [MJ/an] | GWP [kgCO2- éq/an] |
| Total Technique | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Production de chaleur | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Distribution de chaleur | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Capteurs solaire | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Ventilation | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Total Energie | 2'068'934 | 1'786'806 | 27'983 | 670'746 | 579'280 | 9'072 | 671'259 | 579'723 | 9'079 | 666'646 | 575'739 | 9'017 |
| Chauffage | 1'757'732 | 1'518'040 | 23'774 | 367'673 | 317'536 | 4'973 | 366'322 | 316'369 | 4'955 | 361'709 | 312'385 | 4'892 |
| ECS | 311'202 | 268'765 | 4'209 | 303'072 | 261'744 | 4'099 | 304'937 | 263'355 | 4'124 | 304'937 | 263'355 | 4'124 |
| Total Enveloppe | 0 | 0 | 0 | 38'766 | 34'281 | 2'109 | 38'090 | 33'354 | 1'979 | 38'727 | 33'812 | 2'088 |
| Fabrication | 0 | 0 | 0 | 20'395 | 17'406 | 847 | 20'575 | 17'408 | 857 | 21'002 | 17'716 | 879 |
| Remplacement | 0 | 0 | 0 | 16'422 | 15'034 | 736 | 15'555 | 14'093 | 702 | 15'769 | 14'247 | 713 |
| Fin de vie | 0 | 0 | 0 | 1'949 | 1'842 | 526 | 1'959 | 1'853 | 421 | 1'956 | 1'849 | 496 |
| Total technique chauffage et ECS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total énergie chauffage et ECS | 2'068'934 | 1'786'806 | 27'983 | 670'746 | 579'280 | 9'072 | 671'259 | 579'723 | 9'079 | 666'646 | 575'739 | 9'017 |
| Total système de chauffage et ECS (énergie+matériaux BITS) | 2'068'934 | 1'786'806 | 27'983 | 670'746 | 579'280 | 9'072 | 671'259 | 579'723 | 9'079 | 666'646 | 575'739 | 9'017 |

Annexe 3: Coûts annualisés des installations techniques

Annexe 3.a Coûts d'investissement des scénarios de substitution des installations techniques

| Coûts d'investissement | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Scénario de rénovation de l'enveloppe du bâtiment | Durée d'amortissement [an] | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él. | Él.+S | G.+Sth | M.+Sth | Pellets | PAC AE | PACg |
| | | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF | CHF |
| | | Etat actuel | Ventilée LV | Ventilée LV | Ventilée LV | Ventilée LV | Ventilée LV | Ventilée LV | Ventilée LV |
| Chaudière +solaire | 20 | 0 | 0 | 161'724 | 98'267 | 101'241 | 67'614 | 64'800 | 41'500 |
| Distribution chaleur | 40 | 0 | 0 | 58'944 | 150'300 | 150'300 | 150'300 | 150'300 | 150'300 |
| Ventilation | 30 | | | 19'440 | 19'440 | 19'440 | 19'440 | 19'440 | 71'000 |
| Cheminée | 30 | | | | 5'000 | 6'000 | 6'000 | | 5'000 |
| Raccordement au gaz | 30 | | | | 10'395 | | | | 10'395 |
| Stockage | 30 | | | | | 17'366 | 7'506 | | |
| Local technique | 60 | | | | | 5'419 | 6'004 | | |
| Suppression de l'existant | 60 | | | | 8'640 | 8'640 | 8'640 | 8'640 | 8'640 |
| Fenêtres | 30 | 0 | 98'267 | 98'267 | 98'267 | 98'267 | 98'267 | 98'267 | 98'267 |
| Toiture | 40 | 0 | 199'468 | 199'468 | 199'468 | 199'468 | 199'468 | 199'468 | 199'468 |
| Façade ventilée LV | 40 | 0 | 258'784 | 258'784 | 258'784 | 258'784 | 258'784 | 258'784 | 258'784 |
| Plancher | 30 | 0 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 |
| Subventions [CHF] | | | | | | | | | |
| Subventions pour Chaudière +solaire | 20 | | | 6'797 | 6'797 | 6'797 | 15'917 | | |
| Subventions pour Distribution chaleur | 40 | | | | | | 50'000 | 50'000 | |
| Subventions pour Fenêtres | 30 | | 8'022 | 8'022 | 9'741 | 9'741 | 9'741 | 9'741 | 9'741 |
| Subventions pour Toiture | 40 | | 29'597 | 29'597 | 35'940 | 35'940 | 35'940 | 35'940 | 35'940 |
| Subventions pour Façade ventilée LV | 40 | | 22'995 | 22'995 | 29'894 | 29'894 | 29'894 | 29'894 | 29'894 |
| Coût TTC après subventions [CHF] | | | | | | | | | |
| Chaudière +solaire | 20 | 0 | 0 | 154'927 | 91'470 | 94'445 | 51'698 | 64'800 | 41'500 |
| Distribution chaleur | 40 | 0 | 0 | 58'944 | 150'300 | 150'300 | 100'300 | 100'300 | 150'300 |
| Ventilation | 30 | | | 19'440 | 19'440 | 19'440 | 19'440 | 19'440 | 71'000 |
| Cheminée | 30 | | | | 5'000 | 6'000 | 6'000 | | 5'000 |
| Raccordement au gaz | 30 | | | | 10'395 | | | | 10'395 |
| Stockage | 30 | | | | | 17'366 | 7'506 | | |
| Local technique | 60 | | | | | 5'419 | 6'004 | | |
| Suppression de l'existant | 60 | | | | 8'640 | 8'640 | 8'640 | 8'640 | 8'640 |
| Fenêtres | 30 | 0 | 90'245 | 90'245 | 88'526 | 88'526 | 88'526 | 88'526 | 88'526 |
| Toiture | 40 | 0 | 169'870 | 169'870 | 163'528 | 163'528 | 163'528 | 163'528 | 163'528 |
| Façade ventilée LV | 40 | 0 | 235'789 | 235'789 | 228'891 | 228'891 | 228'891 | 228'891 | 228'891 |
| Plancher | 30 | 0 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 | 36'820 |
| Investissement net initial après subventions | CHF | 0 | 532'724 | 766'035 | 803'009 | 819'373 | 717'352 | 710'944 | 804'599 |
| Investissement net à 20 ans après subventions | CHF | 0 | 0 | 154'927 | 91'470 | 94'445 | 63'054 | 64'800 | 41'500 |
| Investissement net à 30 ans après subventions | CHF | 0 | 127'064.5264 | 146'504.5264 | 161'900 | 169'871 | 160'010 | 146'505 | 213'460 |
| Investissement net à 40 ans après subventions | CHF | 0 | 405'659 | 619'530 | 647'430 | 650'404 | 619'014 | 620'759 | 597'459 |
| Annuité [CHF] | | | | | | | | | |
| Chaudière +solaire | 20 | 0 | 0 | 10'656 | 6'291 | 6'496 | 4'286 | 4'457 | 2'854 |
| Distribution chaleur | 40 | 0 | 0 | 2'654 | 6'768 | 6'768 | 5'267 | 5'267 | 6'768 |
| Ventilation | 30 | | | 1'024 | 1'024 | 1'024 | 1'024 | 1'024 | 3'740 |
| Cheminée | 30 | | | | 263 | 316 | 316 | | 263 |
| Raccordement au gaz | 30 | | | | 548 | | | | 548 |
| Stockage | 30 | | | | | 915 | 395 | | |
| Local technique | 60 | | | | | 206 | 229 | | |
| Suppression de l'existant | 60 | | | | 329 | 329 | 329 | 329 | 329 |
| Fenêtres | 30 | 0 | 4'754 | 4'754 | 4'664 | 4'664 | 4'664 | 4'664 | 4'664 |
| Toiture | 40 | 0 | 7'649 | 7'649 | 7'363 | 7'363 | 7'363 | 7'363 | 7'363 |
| Façade ventilée LV | 40 | 0 | 10'617 | 10'617 | 10'306 | 10'306 | 10'306 | 10'306 | 10'306 |
| Plancher | 30 | 0 | 1'940 | 1'940 | 1'940 | 1'940 | 1'940 | 1'940 | 1'940 |
| Coût du capital | CHF/an | 0 | 24'960 | 39'294 | 39'496 | 40'327 | 36'119 | 35'350 | 38'776 |

Annexe 3.b Coûts de l'énergie des scénarios de substitution des installations techniques

| Coût de l'énergie de chauffage et ECS TTC | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------------|---------------------|--------------|
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él. | Él.+S | G.+Sth | M.+Sth | Pellets | PAC AE | PACg |
| Vecteur énergétique | | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Mix consommateur CH | Gaz naturel | Mazout EL | Granulés (pellets) | Mix consommateur CH | Gaz naturel |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour le chauffage | kWh/an | 160'032 | 54'747 | 14'529 | 54'747 | 54'747 | 54'747 | 54'747 | 54'747 |
| Consommation annuelle d'énergie utile pour l'ECS | kWh/an | 28'333 | 27'763 | 27'763 | 27'763 | 27'763 | 27'763 | 27'763 | 27'763 |
| Taux de couverture solaire pour l'ECS [%] | % | 0% | 0% | 60% | 60% | 60% | 0% | 0% | 0% |
| Taux de couverture de l'appoint électrique pour le chauffage | % | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Taux de couverture de l'appoint électrique pour l'ECS | % | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| Fraction utile chauffage [-] | - | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.90 | 0.90 | 0.75 | 3.30 | 1.49 |
| Fraction utile ECS [-] | - | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.65 | 0.65 | 0.50 | 1.80 | 1.49 |
| Consommation finale chauffage | kWh/an | 160'032.22 | 54'746.94 | 14'529.00 | 60'829.94 | 60'829.94 | 72'995.93 | 16'589.98 | 36'742.92 |
| Consommation finale d'énergie pour l'ECS | kWh/an | 28'333.33 | 27'762.92 | 11'105.17 | 17'084.87 | 17'084.87 | 55'525.83 | 15'423.84 | 18'632.83 |
| Consommation annuelle d'énergie finale totale | kWh/an | 188'366 | 82'510 | 25'634 | 77'915 | 77'915 | 128'522 | 32'014 | 55'376 |
| Énergie chauffage avec variation du coût de l'énergie | CHF/an | 34'515 | 11'808 | 3'134 | 8'227 | 9'716 | 6'880 | 3'578 | 4'969 |
| Énergie ECS avec variation du coût de l'énergie | CHF/an | 6'111 | 5'988 | 2'395 | 2'311 | 2'729 | 5'233 | 3'327 | 2'520 |

Annexe 3.c Coûts d'entretien, taxe CO2, coûts externes et divers des scénarios de substitution des installations techniques

| Frais d'entretien TTC | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él. | Él.+S | G.+Sth | M.+Sth | Pellets | PAC AE | PACg |
| Service et réparation annuel | CHF/an | | | | 375 | 500 | 1'200 | 350 | 375 |
| Détartrage | CHF/an | 100 | 100 | 100 | | | | | |
| Contrôle des fumées | CHF/an | | | | 20 | 40 | | | 20 |
| Ramoneur | CHF/an | | | | 62 | 250 | 250 | | 62 |
| Révision de la citerne | CHF/an | | | | | 250 | | | |
| Entretien | CHF/an | 108 | 108 | 108 | 494 | 1'123 | 1'566 | 378 | 494 |
| Autres coûts annuels (divers) TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él. | Él.+S | G.+Sth | M.+Sth | Pellets | PAC AE | PACg |
| Location compteur | CHF/an | 78 | 78 | 78 | | | | 78 | |
| Divers | CHF/an | 84 | 84 | 84 | 0 | 0 | 0 | 84 | 0 |
| Taxe CO2 TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él. | Él.+S | G.+Sth | M.+Sth | Pellets | PAC AE | PACg |
| Taxe incitative CO2 | CHF/an | 0 | 0 | 0 | 930 | 1'239 | 0 | 0 | 661 |
| Taxe CO2 | CHF/an | 0 | 0 | 0 | 930 | 1'239 | 0 | 0 | 661 |
| Coûts externes TTC | | | | | | | | | |
| | Unité | Scénario de référence | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 | Scénario 7 |
| | | État actuel | Él. | Él.+S | G.+Sth | M.+Sth | Pellets | PAC AE | PACg |
| Coûts externes selon SIA 480 | ct/kWh | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 3.0 | 4.5 | 1.5 | 5.0 | 3.0 |
| Coûts externes selon SIA 480 | CHF | 9'418.28 | 4'125.49 | 1'281.71 | 2'337.44 | 3'506.17 | 1'927.83 | 1'600.69 | 1'661 |
| Coûts externes | CHF/an | 9'418 | 4'126 | 1'282 | 2'337 | 3'506 | 1'928 | 1'601 | 1'661 |

