



ÉCOLE CENTRALE LYON

MOD - ÉNERGIE, STOCKAGE, CONVERSION

Projet de rénovation d'une maison en Aquitaine (Vienne)

Élèves :

Tristan CHEVREAU
Jérôme BOUSQUET
Brice DENEUVE
Léo LELIÈVRE
Ethan ROLLIER

Professeur :

Jean-Pierre CLOAREC

13 mars 2024

Résumé interactif

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Caractéristiques	Famille très modeste	Famille modeste	Famille privilégiée
Revenu Fiscal de référence	25 000 €	35 000 €	60 000 €
Critères principaux	1. Économies 2. Empreinte carbone	1. Économies 1. Empreinte carbone	1. Empreinte carbone 2. Économies
Solutions	Isolation Pompe à chaleur	Isolation Pompe à chaleur VMC Double Flux	Isolation Pompe à chaleur VMC Double Flux Panneaux thermiques Verre double vitrage
Pertes thermiques (en hiver)	8,6 kW	5,4 kW	4,2 kW
Primes disponibles	8 000 €	7 000 €	0 €
Coût total	16 052 €	20 185 €	36 135 €
Coût réel (prime déduite)	8 026 €	13 120 €	36 135 €
Temps d'amortissement	5 mois	2 ans et 3 mois	4 ans et 9 mois
Temps d'amortissement CO_2eq	6 mois	7 mois	10 mois

TABLE 1 : Tableau interactif récapitulatif des calculs du projet

LIEN VERS LE TABLEUR

Note : En raison du grand nombre de sources impliquées dans les calculs, toutes ne sont pas incluses dans le rapport, mais elles figurent dans le classeur Excel.

Table des matières

Introduction	4
1 Contexte	5
2 Présentation des familles et aides disponibles	7
3 Comparaison des scénarios par critères	10
4 Démarche du projet	11
4.1 Décomposition en éléments simples	11
4.1.1 Isolation	11
4.1.2 Chauffage	11
4.1.3 Sources d'énergie	11
4.1.4 Autres	11
4.2 Mise en place d'un modèle pour la maison	11
4.2.1 Structure du modèle des déperditions de la maison	11
4.2.2 Vérification de la cohérence du modèle	13
4.2.3 Calcul des modes de chauffage des nouveaux scénarios	13
4.3 Stratégie de recherche et de comparaison	14
5 Solutions choisies	15
5.1 Isolation	15
5.2 Chauffage	15
5.3 Autres	15
6 Bilan et mise en perspective des solutions	17
6.1 Vue d'ensemble	17
6.2 Temps d'amortissement financier	18
6.3 Réduction de l'impact carbone	19
7 Conclusion	21
Annexe	22

Table des figures

1	Empreinte carbone moyenne par personne en France en 2021 (Source) . . .	4
2	À gauche : classe énergétique estimée (en kWh _{EP} /m ² .an). À droite : classe d'émissions de gaz à effet de serre estimée (en kgCO ₂ /m ² .an)	5
3	Pourcentage de déperditions thermiques par poste	6
4	Barème de la Prime Renov' (Source)	7
5	Cumul possible des primes	9
6	Modèle thermique de la maison	12
7	Comparaison entre les pertes calculées par le modèle thermique et celles mesurées dans le dossier	13
8	Comparaison des pertes thermiques de chaque scénario	17
9	kg de CO ₂ annuels en fonction de l'investissement initial	18
10	Amortissement du coût des travaux	19
11	Amortissement de l'empreinte carbone des travaux	20
12	Tableau récapitulatif des aides	23

Liste des tableaux

1	Tableau interactif récapitulatif des calculs du projet	1
2	Comparaison des scénarios suivant les intérêts	10
3	Tableau solution	15
4	Durées d'amortissement financier de la maison (années)	18
5	Durées d'amortissement CO ₂ équivalents de la maison (mois)	19

Introduction

La rénovation énergétique des habitations est devenue une priorité majeure en raison de l'urgence de la transition énergétique et de la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique. En effet, notre mode de vie moderne dépend largement de l'énergie, et les bâtiments résidentiels jouent un rôle majeur dans notre consommation énergétique globale. Comme on peut le voir sur la Figure 1, le logement représente environ 1/5ème de l'empreinte carbone moyenne en France. Lorsque les problèmes environnementaux et climatiques se multiplient, la rénovation énergétique des maisons est un moyen efficace de réduire considérablement notre empreinte carbone, d'améliorer notre efficacité énergétique et de contribuer à un avenir plus durable.

La rénovation énergétique d'une maison vise à améliorer son efficacité énergétique en réduisant la consommation d'énergie pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage et les appareils électroménagers. L'isolation thermique, le remplacement des systèmes de chauffage obsolètes, l'installation de panneaux solaires et d'autres mesures peuvent y contribuer. Une rénovation efficace d'une habitation réduit non seulement les émissions de CO₂, mais également les coûts énergétiques pour les résidents, ce qui améliore leur qualité de vie.

L'objectif de ce projet est donc de proposer trois scénarios permettant, pour différents niveaux de revenus, de réduire le coût annuel et l'impact environnemental d'une maison.

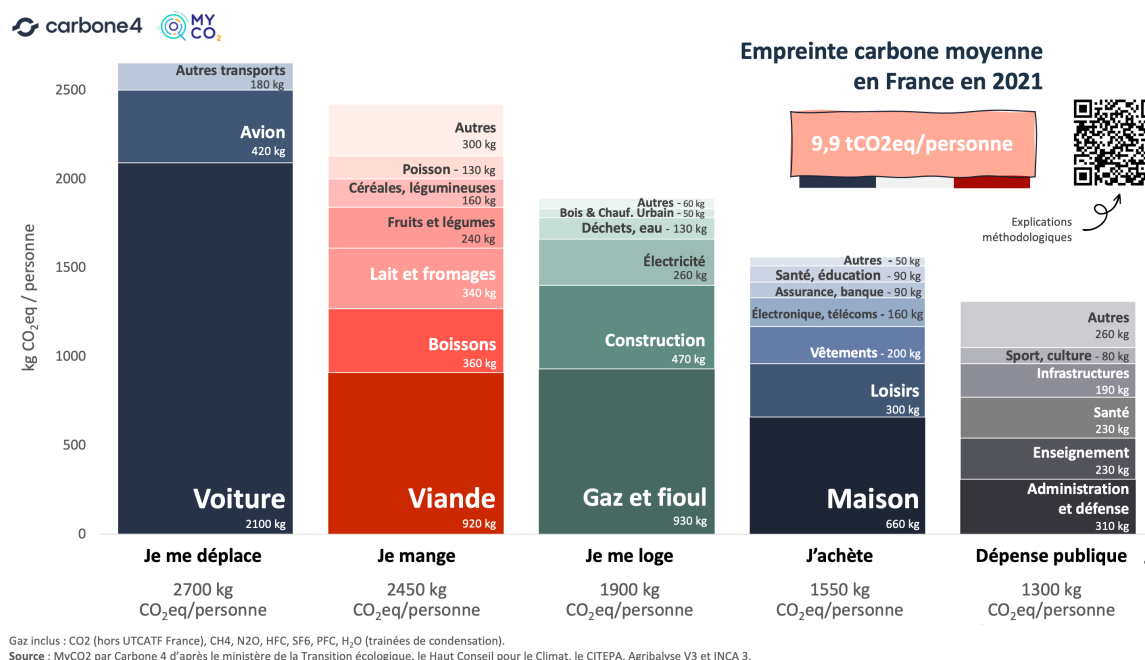


FIGURE 1 : Empreinte carbone moyenne par personne en France en 2021 ([Source](#))

1 Contexte

L'habitation étudiée est une maison individuelle de 1971 située dans le département de la Vienne en Nouvelle-Aquitaine. Cette maison de 160 m² est habitée par une famille de 2 parents et 3 enfants. Une évaluation énergétique réalisée en amont de cette étude a permis d'établir la situation énergétique de l'habitation avant de travaux.

Les consommations d'énergie et les rejets de gaz à effet de serre (GES) ont été rapportés à la surface habitable. En considérant le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la climatisation, la consommation énergétique de l'habitation est de 276 kWh_{EP}/m².an et correspond à la classe énergétique E (Figure 2). Les émissions de gaz à effet de serre sont estimées à 55 kgCO₂/m².an et correspondent également à la classe d'émission E (Figure 2).

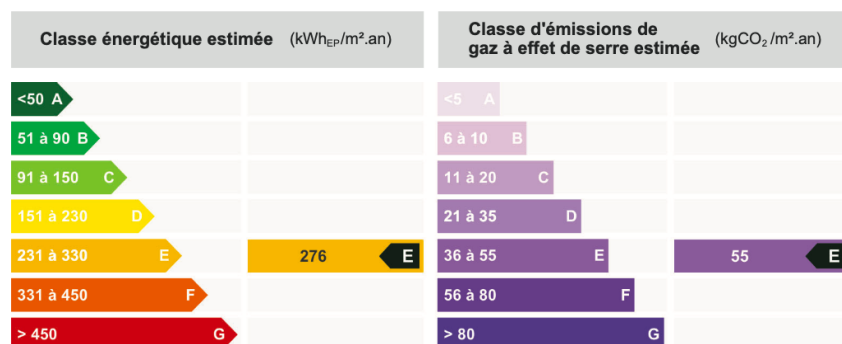


FIGURE 2 : À gauche : classe énergétique estimée (en kWh_{EP}/m².an). À droite : classe d'émissions de gaz à effet de serre estimée (en kgCO₂/m².an)

Les dépenses sont estimées à 3 800 € dont 3 134 € de chauffage et 372 € d'eau chaude. Les dépenses d'énergies sont déterminées sur la base des dépenses estimées, à 2170 € pour le fioul, 1150 € pour l'électricité et 480 € pour le bois de bûche.

Les déperditions thermiques totales de la construction sont de 17.0 kW. La Figure 3 présente le pourcentage de déperdition thermique par poste. Plus le pourcentage d'un poste est important, plus ce poste est responsable de pertes de chaleur importantes en hiver. Les ponts thermiques des parois, qui se traduisent par des pertes au niveau des jonctions, ont été répartis dans tous les postes concernés. Les murs (61%) et la ventilation (18.4%) sont identifiés comme les postes responsables d'une grande partie des déperditions thermiques.

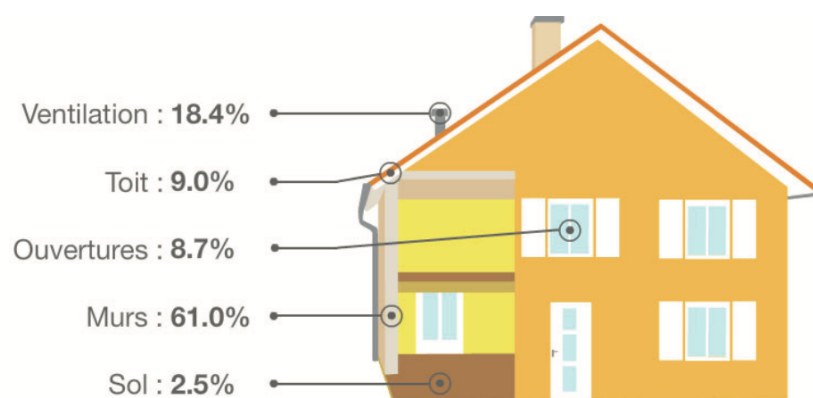


FIGURE 3 : Pourcentage de déperditions thermiques par poste

2 Présentation des familles et aides disponibles

Pour l'analyse et l'amélioration de la maison en aquitaine, nous allons considérer plusieurs scénarios. Ces scénarios sont associés à différentes familles qui se distinguent par leur revenu fiscal de référence.

Au premier abord, cela semble comme des scénarios qui se différencient de manière simple cependant le niveau de revenu impacte les primes disponibles, les taux des prêts, la volonté de la famille à changer leurs habitudes, le temps de rentabilité et enfin la flexibilité prix/impact carbone.

En prenant en compte ce qui a été évoqué ci-dessus, les trois scénarios se distinguent par 3 familles respectivement de classe très modeste (revenu fiscal de référence de 25 000 €), de classe modeste (35 000 €) et de classe privilégiée (60 000 €).

Aides disponibles

Différentes primes sont disponibles en fonction des revenus fiscaux de référence :

MaPrimeRénov' Sérénité

Cette prime permet de financer les travaux de rénovation globale qui offrent un gain énergétique de 35% minimum. Seuls les foyers ayant un revenu fiscal de référence inférieur à ceux présentés dans le barème Figure 4 sont éligibles à cette prime. (Complément d'informations)

NOMBRE DE PERSONNES COMPOSANT LE MÉNAGE	MÉNAGES AUX REVENUS TRÈS MODESTES	MÉNAGES AUX REVENUS MODESTES	MÉNAGES AUX REVENUS INTERMÉDIAIRES	MÉNAGES AUX REVENUS SUPÉRIEURS
1	16 229 €	20 805 €	29 148 €	supérieur à 29 148 €
2	23 734 €	30 427 €	42 848 €	supérieur à 42 848 €
3	28 545 €	36 591 €	51 592 €	supérieur à 51 592 €
4	33 346 €	42 748 €	60 336 €	supérieur à 60 336 €
5	38 168 €	48 930 €	69 081 €	supérieur à 69 081 €
par personne supplémentaire	+ 4 813 €	+ 6 165 €	+ 8 744 €	+ 8 744 €

FIGURE 4 : Barème de la Prime Renov' (Source)

Le montant de l'aide est de 50% du montant total des travaux (hors taxe), dans la limite de 17 500 € pour les revenus très modestes (couleur bleue). L'aide est de 35% du

montant total des travaux (hors taxe), dans la limite de 12 250 € pour les revenus très modestes (couleur jaune). La prime n'est pas disponible pour les autres revenus.

Un bonus « Bâtiment Basse Consommation » (BBC) de 1 500 € est disponible si le logement est classé A ou B après travaux d'après un audit énergétique.

Un « Bonus sortie de passoire énergétique » de 1 500 € est également disponible si le logement est classé F ou G avant travaux et atteint la classe E ou mieux après travaux d'après un audit énergétique. La maison en question ne rentre pas dans ces critères, car elle est classée E avant travaux.

MaPrimeRénov'

MaPrimeRenov est une aide disponible pour différents travaux de rénovation (Chauffage et eau chaude sanitaire, Isolation thermique et autres, comme dépose de cuve à fioul par exemple). Les montants disponibles dépendent des revenus du ménage [1]. Il est bon à noter que les ménages aux ressources supérieures (scénario 3) ne peuvent uniquement bénéficier d'un forfait « rénovation globale » de 5 000 €, à la condition que les travaux résultent en un gain d'énergie minimal de 55%.

Aides des fournisseurs d'énergie (dispositif CEE)

Le dispositif des Certificats d'Économies d'Énergie (CEE) est une aide obligatoire des fournisseurs d'énergie (gaz, fioul, électricité) permettant d'inciter les propriétaires à réaliser des économies d'énergie sur certaines périodes de l'année. Les aides dépendent des revenus. Pour des revenus très modestes, elles sont les suivantes [2] :

- Isolation des parois vitrées (fenêtres et portes-fenêtres) en remplacement de simple vitrage : 50 €/équipement
- Isolation des murs par l'extérieur : 10 €/m²
- Isolation des rampants de toiture ou des plafonds de combles : 11 €/m²
- Isolation d'un plancher bas : 10 €/m²
- Pompe à chaleur air/eau : 4 700 €
- Chauffe-eau thermodynamique : 100 €
- Système solaire combiné (et dispositifs solaires pour le chauffage des locaux) : 4 700 €
- Chauffe-eau solaire individuel en Métropole (et dispositifs solaires pour le chauffage de l'eau) : 170 €
- Partie thermique d'un équipement PVT eau (système hybride photovoltaïque et thermique) : 150 €
- Raccordement à un réseau de chaleur et/ou de froid : 820 €
- Dépose d'une cuve à fioul : 0 €
- Émetteurs électriques : 14 €/équipement
- Ventilation simple flux : 210 €
- Thermostat avec régulation performante : 60 €

Éco-prêt à taux zéro (éco-PTZ)

Dans le cas de rénovation globale dans le but d'améliorer la performance énergétique du logement, il est possible de réaliser un prêt à taux zéro d'un montant maximal de 50 000 €.

De plus, depuis le 17 novembre 2022, il est possible avec certaines banques de cumuler l'éco-PTZ et MaPrimeRénov' afin de financer le reste non pris en charge par MaPrimeRénov'.

Cumul des primes

Toutes les primes sont cumulables, sauf MaPrimeRénov' et MaPrimeRénov' Sérénité, cf Figure 5. MaPrimeRénov' Sérénité est utilisée dans le cas où elle est disponible (revenu très modeste et modeste). Il est bon à noter qu'il n'y a pas d'aide de collectivités locales dans le cas actuel.

	MAPRIME RÉNOV'	ÉCO-PRÊT À TAUX ZÉRO	AIDES DE L'ANAH	AIDES DES COLLECTIVITÉS LOCALES	AIDES DES FOURNISSEURS D'ÉNERGIE
MAPRIME RÉNOV'		✓	✗	✓ avec un écrêtement de MaPrimeRénov'***	✓ avec un écrêtement de MaPrimeRénov'*
ÉCO-PRÊT À TAUX ZÉRO	✓		✓	✓	✓
AIDES DE L'ANAH	✗	✓		✓	✓
AIDES DES COLLECTIVITÉS LOCALES	✓ avec un écrêtement de MaPrimeRénov'***	✓	✓		✓
AIDES DES FOURNISSEURS D'ÉNERGIE	✓ avec un écrêtement de MaPrimeRénov'*	✓	✓	✓	

Le chèque énergie, l'exonération de la taxe foncière, l'aide de votre caisse de retraite peuvent également être cumulés aux aides présentées dans ce tableau.

*Écrêtement de MaPrimeRénov' de façon à ce que le montant cumulé des aides ne dépasse pas 90% pour les propriétaires très modestes, 75% pour les propriétaires modestes, 60% pour les propriétaires aux revenus intermédiaires et 40% pour les propriétaires aux revenus supérieurs.

**Écrêtement de MaPrimeRénov' de manière à ce que le montant cumulé des aides publiques et privées ne dépasse pas 100% de la dépense.

FIGURE 5 : Cumul possible des primes

3 Comparaison des scénarios par critères

Les préférences des différentes familles (donc des différents scénarios) sont récapitulées dans le Tableau 2. Les préférences suivant les différents critères vont du vert (beaucoup d'intérêt) au rouge (peu d'intérêt).

	Scénario 1 (très modeste)	Scénario 2 (modeste)	Scénario 3 (privilegié)
Économie			
Écologie			
Changement d'habitude, de confort			

TABLE 2 : Comparaison des scénarios suivant les intérêts

Toutes les familles ont des revenus distincts. Leur intérêt et ambition peuvent en dépendre. Il a été convenu que la famille privilégiée du scénario 3 privilégiait l'écologie, quitte à ne pas optimiser le côté économique, bien qu'écologie et économie sont souvent corrélées. Cette famille peut investir une somme importante même si le temps d'amortissement est long. La famille très modeste du scénario 1 est plus dans l'optique de rentabilité économique, c'est-à-dire que les travaux ont pour but principal de diminuer leurs dépenses énergétiques. Leurs revenus étant plus modestes, ce scénario ne peut pas se permettre des investissements de la hauteur de la famille privilégiée, bien que des aides conséquentes soient proposées par l'État français, notamment avec le prêt à taux zéro. Le scénario 2 (famille modeste) est à mi-chemin entre le scénario 1 et le scénario 3. Les intérêts pour économie et écologie sont égaux.

Le projet de rénovation peut entraîner une sensibilisation des familles par rapport à l'effet des habitudes sur l'énergie consommée (et l'énergie non consommée).

4 Démarche du projet

4.1 Décomposition en éléments simples

Un projet de rénovation énergétique peut être décomposé en différents éléments simples comme l'isolation, le chauffage et les sources d'énergie.

4.1.1 Isolation

L'amélioration de l'isolation thermique permet de réaliser des économies d'énergie en réduisant les déperditions thermiques et d'améliorer le confort thermique en maintenant une température stable. L'isolation est un élément essentiel dans une rénovation énergétique, visant ainsi à créer des habitations plus sobres en énergie et plus confortables. Différentes techniques d'isolation (extérieure ou intérieure) et différents matériaux (laine de verre, laine de roche, naturel, polystyrène...) sont envisageables pour l'isolation d'une maison.

4.1.2 Chauffage

Le chauffage est l'un des postes de consommation d'énergie les plus importants d'une maison. En améliorant le système de chauffage, il est possible de réduire considérablement les coûts d'énergie, de réduire l'impact carbone et d'améliorer le confort thermique de l'habitation. Un système de chauffage est généralement caractérisé par une énergie primaire (électricité, gaz, fioul, bois...), un rendement et une puissance maximale. Le système de chauffage doit être dimensionné de façon à fournir une température confortable en hiver et assurer l'eau chaude toute l'année.

4.1.3 Sources d'énergie

L'ajout de sources d'énergie renouvelable comme des panneaux solaires thermiques ou photovoltaïques peut également être envisagée pour couvrir une partie de la consommation énergétique de l'habitation.

4.1.4 Autres

Agir sur d'autres facteurs de consommation comme l'éclairage et les appareils électriques permet également de réduire la consommation énergétique de l'habitation.

4.2 Mise en place d'un modèle pour la maison

Un modèle thermique a été développé pour établir, après rénovation, les déperditions thermiques associées à chaque poste.

4.2.1 Structure du modèle des déperditions de la maison

La maison subit des déperditions thermiques au travers de deux postes principaux : la ventilation et les parois. Le modèle (Figure 6) est donc basé sur les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur à travers les parois de la maison (selon la loi de Newton) et les pertes liées à la ventilation (en utilisant le débit de chaleur). On considère ensuite que ces pertes thermiques sont égales à la production (Équation 1) des sources de chaleur

pour que la maison soit à l'équilibre à 19°C . Ainsi, en diminuant les pertes, on diminue le besoin de sources de chaleurs. On mesure les émissions de CO_2 liées au chauffage de la maison en multipliant la part de chaque chauffage dans cet équilibre par leur intensité carbone.

$$\Phi_{\text{pertes}} = \sum_{\text{parois}} \Phi_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} + \Phi_{\text{ventilation}} = \Phi_{\text{sources}} \quad (1)$$

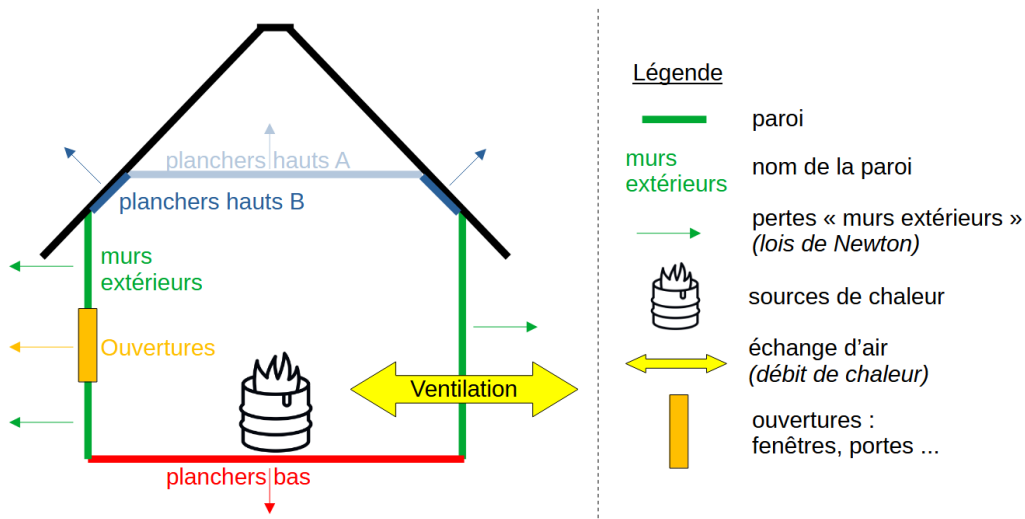


FIGURE 6 : Modèle thermique de la maison

Échange thermique selon les parois

Nous avons, pour chaque paroi, la résistance thermique R_p associée (en $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$), ce qui nous permet d'utiliser la loi de Newton pour chaque paroi (Équation 2) enfin de calculer le flux thermique Φ . On considère que les ouvertures (fenêtres et portes) sont équivalentes à une unique paroi.

$$\Phi_{\text{int} \rightarrow \text{ext}} = \frac{S}{R_p} (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) \quad (2)$$

Puisque toutes ces pertes sont en parallèle, nous pouvons simplement sommer les pertes associées à chaque paroi.

Pertes associées à la ventilation

Le modèle associé à la ventilation est le débit de chaleur transporté par l'air sortant, présentée Équation 3.

$$\Phi_{ventilation} = Q_{air} \cdot c_v \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (3)$$

Avec Q_{air} le volume d'air extrait de la maison par la ventilation et c_v la capacité thermique volumique de l'air à 1 bar : $1,256 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$.

4.2.2 Vérification de la cohérence du modèle

Il est possible de vérifier la cohérence du modèle en y appliquant les données du dossier (en particulier, R_p) pour vérifier qu'on retombe bien sur la même répartition des pertes calculées que celles des mesures terrain. On fixe aussi un débit de ventilation correspondant aux pertes attendues. On voit d'après la Figure 7 que le modèle est satisfaisant.

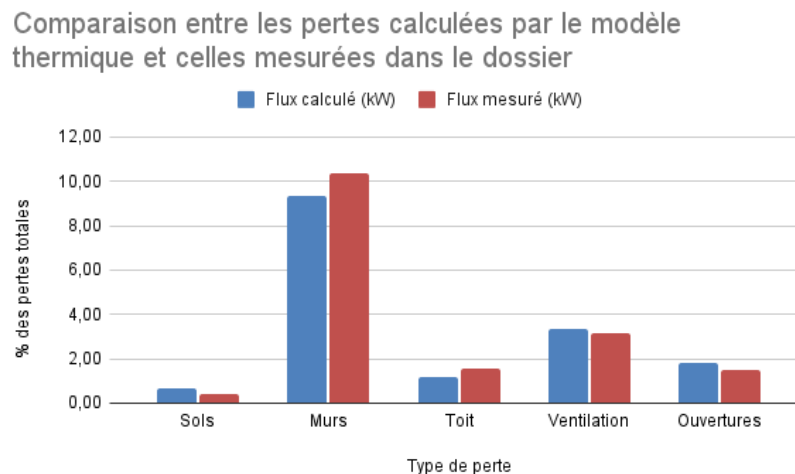


FIGURE 7 : Comparaison entre les pertes calculées par le modèle thermique et celles mesurées dans le dossier

4.2.3 Calcul des modes de chauffage des nouveaux scénarios

Une fois que la cohérence de ce modèle est établie, nous pouvons l'utiliser pour calculer les émissions carbone de la maison pour chaque nouveau scénario. Pour cela, à partir des factures fournies et du rendement des différentes énergies de chauffage utilisées initialement par la maison, nous pouvons calculer le besoin équivalent en kWh utiles annuels. Ce besoin en kWh utiles annuels est ensuite transformé selon l'Équation 4.

$$B = B_{initial} \times \frac{\Phi_{pertes}}{\Phi_{pertes, initiales}} \quad (4)$$

Dans cette équation, B est le nouveau besoin énergétique pour maintenir l'équilibre

de la maison. Φ_{pertes} et $\Phi_{pertes,initiales}$ sont les pertes respectivement nouvelles et initiales de la maison. $B_{initial}$ est le besoin énergétique initial de la maison.

À partir de ce besoin, on en déduit le CO_2 produit par an pour le chauffage grâce à l'équation 5.

$$P_{CO_2} = B \times \sum_{sources} \frac{p_{source}}{\eta_{source}} \cdot I_{CO_2} \quad (5)$$

P_{CO_2} est la production annuelle de CO_2 de la maison liée au chauffage. p_{source} est la part de la source considérée dans le chauffage de la maison. η_{source} est le rendement de la source selon l'énergie primaire (kWh utiles par kWh primaires). L'intensité carbone de l'énergie primaire de la source est donnée par I_{CO_2} (kg de CO_2 par kWh primaire).

Dans nos scénarios, nous considérons en particulier l'électricité comme source primaire d'énergie. Nous avons pris comme intensité carbone 0.085 kg de CO_2 par kWh. Pour un chauffage électrique, le rendement serait de 1 ; pour une pompe à chaleur, ce rendement pourrait être de 2.5.

L'application de ces équations nous fournit la nouvelle empreinte carbone annuelle du chauffage de la maison, ainsi que son coût annuel en modifiant légèrement l'équation 5.

4.3 Stratégie de recherche et de comparaison

Pour chaque élément simple, un certain nombre de solutions disponibles sur le marché ont été sélectionnées. Pour chaque solution, les prix d'installation ou de rénovation ont été déterminés en moyennant les prix proposés par différents sites marchands. Le coût de l'utilisation est déterminé à l'aide du prix de l'énergie primaire et du rendement de la solution, en considérant que les habitudes de consommation restent inchangées. L'impact carbone du cycle de vie complet de chaque solution (fabrication, utilisation et démantèlement) a été obtenue à l'aide des données de la base [INIES](#).

L'impact carbone du cycle de vie complet ainsi que le prix à l'installation et à l'utilisation ont été utilisés comme variables de décision. Chaque décision est prise de façon à minimiser l'impact carbone en priorité. Le coût est une variable limitante qui interdit certaines solutions pour que le coût global des travaux soit viable vis-à-vis des revenus considérés dans le scénario. Pour certaines solutions, d'autres critères spécifiques comme l'absorption acoustique des isolants ont également été regardés.

5 Solutions choisies

Les solutions retenues pour les trois scénarios sont synthétisées dans le tableau 3.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Isolation	Laine de roche	Isolant naturel	Isolant naturel
Dispositif de chauffage/Eau chaude	Pompe à chaleur double service Air/Eau	Pompe à chaleur double service Air/Eau	Pompe à chaleur double service Air/Eau
Menuiserie	pas de changement	pas de changement	Nouvelles fenêtres double vitrage
Ventilation	Ventilation par grille haute et basse (pas de changement)	VMC double flux	VMC double flux
Éclairage	LED	LED	LED
Prix des travaux	16 052 €	20 185 €	28 135 €
Prix payé par les ménages	3 026 €	8 120 €	19 135 €
panneaux solaires	Non	Non	Oui

TABLE 3 : Tableau solution

5.1 Isolation

L'isolation notamment par les murs constituait la principale perte d'énergie de la maison avec 61,7% des 17 kW. Une isolation par l'extérieur est donc privilégiée car moins invasive pour les occupants de la maison. L'objectif est d'avoir un impact écologique faible tout en ayant un coût avantageux et la plus grande efficacité possible. Avec ces critères, l'isolant naturel paraît le plus adapté. Il a donc été choisi pour les scénarios 2 et 3, tandis que le ménage avec les revenus plus modestes va privilégier la performance et les économies au détriment de l'environnement, ce qui correspond à la laine de roche.

5.2 Chauffage

Le chauffage originel au fioul était un problème majeur de la maison. En effet, la consommation et le prix constituait une grande partie des dépenses énergétiques. Tandis que l'isolation de la maison a permis de drastiquement diminuer les fuites thermiques, le chauffage par pompe à chaleur double service Air/Eau permet d'optimiser le coût énergétique du chauffage, avec notamment un meilleur rendement. En outre le passage à un mode de chauffage électrique permet de réduire grandement l'empreinte carbone de l'habitat.

5.3 Autres

La menuiserie, la ventilation ainsi que l'éclairage constituent des optimisations mineures dans la consommation énergétique de la maison. En effet, Le changement de double vitrage réduit légèrement les pertes thermiques mais le coût est très important. C'est pourquoi seul le scénario 3 peut se permettre d'investir dans une telle solution. De même, le changement de ventilation permet de réduire les pertes mais l'installation constitue un coût

important que le ménage 1 ne peut se permettre. Finalement, l'éclairage constitue une optimisation à bas prix. En effet le passage aux LED est très peu coûteux et permet une légère amélioration de la consommation de la maison.

Les panneaux solaires constituent un investissement important, ce qui implique que seul le scénario 3 est en mesure d'en mettre. En effet, bien qu'ils constituent une aide pour chauffer l'eau notamment, les scénarios 1 et 2 ne peuvent se permettre d'en installer.

6 Bilan et mise en perspective des solutions

6.1 Vue d'ensemble

La Figure 8 montre l'évolution des pertes thermiques en fonction du scénario, en valeur absolue. La logique incrémentale suivie au fur et à mesure des scénarios concernant les pertes thermiques est alors explicites : d'abord les murs, plus gros poste, puis la ventilation, et enfin, les ouvertures.

Logiquement, il apparaît que réduire les pertes thermiques est de plus en plus difficile, malgré l'augmentation de l'argent mis dans les travaux. Il est possible d'en déduire que les euros investis dans la réduction des pertes thermiques sont de moins en moins efficaces. Ceci explique pourquoi les aides de l'état paraissent faibles en comparaison avec le prix des travaux pour avoir la maison "parfaite" (passive, voire active) : à budget égal, une multitude de faibles gains à faibles coûts sont privilégiés à quelques gros gains à des coûts dérisoires.

Cette tendance se retrouve de même dans la Figure 9. En effet, la courbe de l'empreinte CO₂ annuelle de la maison selon l'investissement initial est représentée et suit une forme en "1/X". Théoriquement, il faudrait donc un investissement infini pour avoir une maison neutre en carbone.

Comparaison des pertes thermiques de chaque scénario

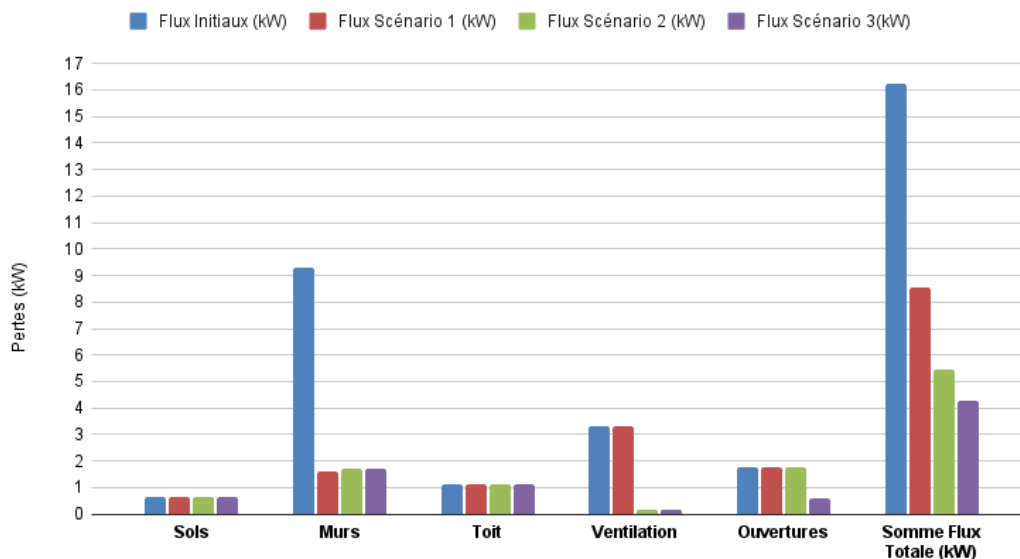


FIGURE 8 : Comparaison des pertes thermiques de chaque scénario

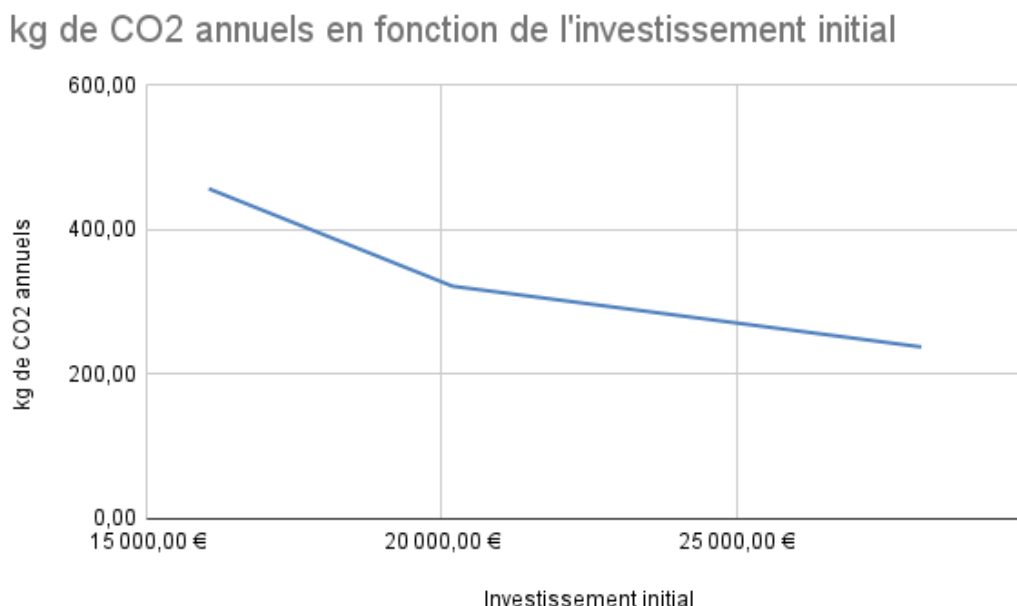


FIGURE 9 : kg de CO2 annuels en fonction de l'investissement initial

6.2 Temps d'amortissement financier

Dans l'objectif de mesurer les économies possibles des familles à l'aide de ces travaux, qui sont généralement des motivations plus fortes que celles de l'écologie pure, nous pouvons tracer des droites affines pour chaque scénario. L'ordonnée à l'origine est l'investissement initial et la pente est les coûts de fonctionnement annuels, l'abscisse étant alors l'année. La figure 10 présente ce graphique. La courbe représente donc les coûts cumulés par année pour chaque scénario. La courbe en pointillés correspond à l'état actuel de la maison, avec un investissement initial de 0 €, ce qui explique que les trois scénarios soient, durant les premières années, perdants.

Il est alors possible de savoir quand est-ce que les gains seront amortis en regardant à quelle date la courbe d'un scénario croise celle de la maison dans son état actuel. Les durées d'amortissement sont présentées sur le Tableau 4.

Cette courbe peut aussi être utilisée pour comparer les scénarios : si on étend la courbe des années encore après, on remarque que le scénario 1 devient moins bon que le scénario 2, et ainsi de suite jusqu'à ce que le scénario 3 devienne inéluctablement meilleur, car il coûte moins cher à l'année. Il faut que le scénario soit meilleur que les autres avant la fin de la durée de vie de ses équipements.

Note : les coûts réels hors primes sont utilisés pour les calculs, car cela correspond mieux à la réalité économique.

Actuel	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
NA	0,45	2,27	4,76

TABLE 4 : Durées d'amortissement financier de la maison (années)

Amortissement du coût des travaux

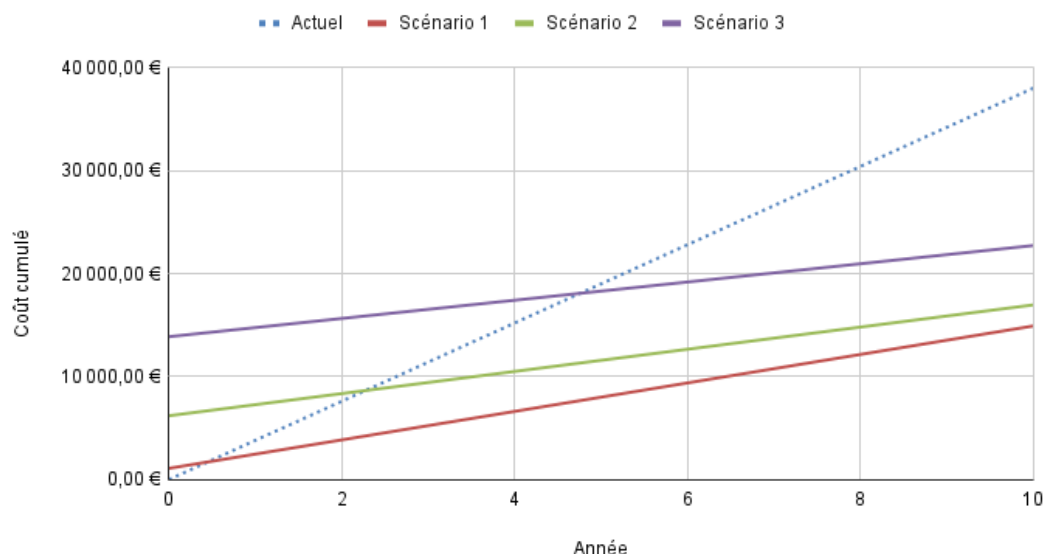


FIGURE 10 : Amortissement du coût des travaux

6.3 Réduction de l'impact carbone

En reprenant les mêmes principes que pour l'argent (Figure 11), mais avec les kilogrammes de CO₂ équivalent, on obtient les temps d'amortissement présentés Figure 5. Les valeurs sont exprimées en mois. On voit que tous les scénarios sont "écologiquement rentabilisés" en moins d'un an. Cela s'explique très simplement par le fait que la chaudière à fioul produisait environ 10 tonnes de CO₂ par an, ce qui est considérable.

On remarque alors que les échelles de temps à partir duquel un projet est rentable écologiquement ou financièrement diffèrent d'un ordre de grandeur, ce qui est dommage.

Actuel	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
NA	6,136	6,923	9,939

TABLE 5 : Durées d'amortissement CO₂ équivalents de la maison (mois)

Amortissement de l'empreinte carbone des travaux

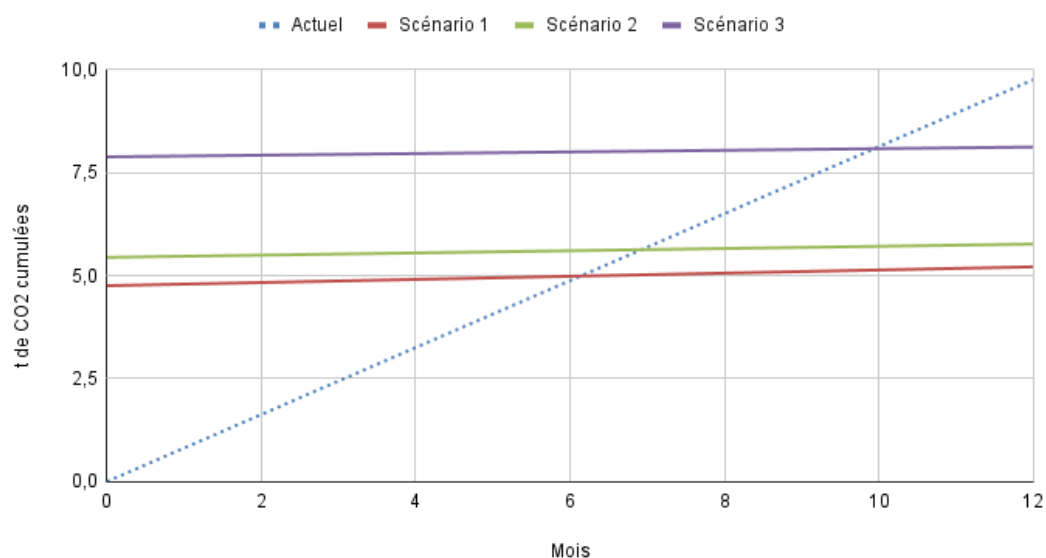


FIGURE 11 : Amortissement de l'empreinte carbone des travaux

7 Conclusion

Dans cette étude, différents scénarios de rénovation énergétique correspondants à différents niveaux de revenus ont été proposés. L'impact environnemental et le coût de chaque scénario ont été estimés. Cette démarche était motivée par le fait que les maisons contribuent significativement aux émissions de CO₂ en France en représentant plus d'un cinquième de l'empreinte carbone d'une personne en France.

L'analyse a été structurée en examinant le contexte de la maison, les familles qui l'occupent, ainsi que les incitations financières disponibles. Trois scénarios ont été envisagés, chacun représentant une classe sociale différente, et les rénovations ont été évaluées sur plusieurs années, en prenant en considération des critères économiques, écologiques et les habitudes des familles.

Pour l'identification des meilleures solutions, une approche combinant des calculs de pertes énergétiques, la collecte de données sur les coûts d'installation et les subventions, ainsi que l'analyse du cycle de vie des diverses installations a été utilisée.

Les trois scénarios présentent des caractéristiques uniques qui doivent être prises en considération. Afin de comparer ces scénarios malgré leurs différences, une méthodologie et une structure communes ont été utilisées comme cadre de référence.

Nous constatons que cette étude était chronophage. Un ménage n'a pas forcément le temps ni les compétences pour la faire pour sa propre maison. Ainsi, la complexité de la mise en place d'un tel projet de rénovation est un facteur limitant à son adoption.

Références

- [1] ANAH. *Les aides financières en 2023*. <https://france-renov.gouv.fr/sites/default/files/2023-01/Guide-des-aides-financieres-2023.pdf>. Accessed : 2023-11-14. 2023.
- [2] France RENOV. *Simulateur d'aides financières*. <https://france-renov.gouv.fr/aides/simulation/>. Accessed : 2023-11-20. 2023.

Annexe

Pour des informations chiffrées complémentaires, se référer au classeur Excel : [Lien du classeur](#)

Annexe A

ÉQUIPEMENTS ET MATÉRIAUX ÉLIGIBLES	AIDE POUR LES MÉNAGES			
	AUX RESSOURCES TRÈS MODESTES	AUX RESSOURCES MODESTES	AUX RESSOURCES INTER- MÉDIAIRES	AUX RESSOURCES SUPÉRIEURES
CHAUFFAGE ET EAU CHAUDE SANITAIRE				
Raccordement à un réseau de chaleur et/ou de froid	1200 €	800 €	400 €	non éligible
Chauffe-eau thermodynamique	1200 €	800 €	400 €	non éligible
Pompe à chaleur air/eau (dont PAC hybrides)	4000 €	3000 €	2000 €	non éligible
Pompe à chaleur géothermique ou solarothermique (dont PAC hybrides)	10000 €	8000 €	4000 €	non éligible
Chauffe-eau solaire individuel en Métropole (et dispositifs solaires pour le chauffage de l'eau)	4000 €	3000 €	2000 €	non éligible
Système solaire combiné (et dispositifs solaires pour le chauffage des locaux)	10000 €	8000 €	4000 €	non éligible
Partie thermique d'un équipement PVT eau (système hybride photovoltaïque et thermique)	2500 €	2000 €	1000 €	non éligible
Poêle à bûches et cuisinière à bûches	2500 €	2000 €	1000 €	non éligible
Poêle à granulés et cuisinière à granulés	2 500 €	2 000 €	1500 €	non éligible
Chaudière bois à alimentation manuelle (bûches)	8000 €	6500 €	3000 €	non éligible
Chaudière bois à alimentation automatique (granulés, plaquettes)	10000 €	8000 €	4000 €	non éligible
Foyer fermé et insert à bûches ou à granulés	2500 €	1500 €	800 €	non éligible

FIGURE 12 : Tableau récapitulatif des aides