

Projet de Physique P6
STPI/P6/2013 – 24

**EFFICACITE ENERGETIQUE ET
ISOLATION THERMIQUE**



Etudiants :

Fiona CROCHEMORE

Simon DUMAS

Mathieu HEBERT

Thomas SARFATI

Enseignant-responsable du projet :

Jamil Abdulaziz

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : 10/06/2013

Référence du projet : **STPI/P6/2013 – 24**

Intitulé du projet : ***Efficacité énergétique et isolation thermique***

Type de projet : ***Bibliographie, étude de cas, expérimental***

Objectifs du projet :

L'objectif de ce projet est de définir l'efficacité énergétique ainsi que les facteurs permettant de la mesurer à travers les différentes réglementations thermiques adoptées depuis 1974, les stratégies mises en œuvre dans le bâtiment afin d'optimiser son isolation thermique, mais également à travers la réalisation d'une maquette qui nous permettra d'étudier les déperditions thermiques dans le bâtiment en fonction de l'isolant utilisé et de l'environnement extérieur.

Ce projet a également pour but de développer notre capacité à travailler en équipe ainsi que notre esprit d'analyse.

Mots-clefs du projet : ***isolation thermique, efficacité énergétique, réglementation thermique, flux thermique***

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	6
2. Méthodologie / Organisation du travail	7
3. Travail réalisé et résultats	8
3.1. La problématique de la consommation énergétique dans le bâtiment	8
3.1.1. La réglementation thermique : un engagement à échelle européenne ..	8
3.1.1.1. La nécessité de bâtiments moins énergivores*	8
3.1.1.2. La RT 2012 : un « saut énergétique »	8
3.1.1.3. Le respect de la réglementation	9
3.1.1.4. L'instauration de labels pour classer les bâtiments	9
3.1.1.5. Une réglementation à venir : la RT 2020	10
3.1.2. Le diagnostic de performance énergétique (DPE)	10
3.1.3. Des indicateurs pour mesurer l'efficacité énergétique	11
3.2. Efficacité énergétique et isolation thermique	12
3.2.1. L'isolation thermique : une mesure dite « passive »	12
3.2.1.1. Le choix des isolants thermiques	13
3.2.1.2. Isolation des murs	15
3.2.1.3. Menuiseries extérieures	16
3.2.1.4. Isolation intérieure	17
3.2.1.5. Isolation des ponts thermiques	19
3.2.2. Les solutions « actives »	20
3.2.2.1. La ventilation de l'air	20
3.2.2.2. L'infiltrométrie	21
3.2.2.3. Les systèmes de gestion d'énergie SIGE	23
3.3. Etude expérimentale	24
3.3.1. Présentation de la maquette	24
3.3.2. Conditions expérimentales	24
3.3.3. Expériences	25
3.3.3.1. Comparaison entre les deux pièces	25
3.3.3.2. Comparaison des isolants	26
3.3.3.2.1. Echanges thermiques intérieur → extérieur	26
3.3.3.2.2. Echanges thermiques extérieur → intérieur	28
3.3.4. Exploitation des résultats	30
3.3.4.1. Etude des déperditions thermiques	30
3.3.4.2. Conductivité thermique des matériaux	32
3.4. Etude de cas : projet de réhabilitation thermique de l'immeuble Circé	33
4. Conclusion et perspectives	35
5. Bibliographie	36
6. Annexes	37

NOTATIONS, ACRONYMES

GES : Gaz à effet de serre

RT : Réglementation Thermique

EnR : Energie Renouvelable

HPE : Haute Performance Energétique

THPE : Très Haute Performance Energétique

BBC : Bâtiment Basse Consommation

1. INTRODUCTION

En accord avec notre professeur de projet, M. Abdulaziz, ce dossier s'articulera principalement autour de l'isolation thermique, l'efficacité énergétique étant en elle-même une notion très vaste.

Il est clair que les progrès technologiques réalisés depuis la révolution industrielle ont permis une amélioration sans équivalent de notre hausse de niveau de vie. Toutefois, l'augmentation exponentielle de la population, la raréfaction des ressources naturelles, le réchauffement climatique et le coût actuel de l'énergie remettent en cause ce confort technologique dans lequel s'est profondément confiné l'Homme. Depuis 1974, les pouvoirs publics tentent donc de lutter contre les émissions de GES en établissant des stratégies visant à réduire notre consommation énergétique, notamment dans le secteur du bâtiment qui, en France, est le premier consommateur d'énergie et un important émetteur de CO₂. La notion d' « efficacité énergétique », à savoir comment « produire plus avec moins », est donc devenue une priorité de la politique énergétique européenne.

C'est pourquoi aujourd'hui les maîtres d'ouvrage sont tenus de respecter la « réglementation thermique » dans la construction de bâtiments neufs pour le chauffage, la ventilation ou encore l'éclairage afin de créer des installations plus propres et moins « énergivores ».

Il en va même de l'intérêt du particulier de réduire sa consommation énergétique afin de voir baisser sa facture d'électricité. L'isolation thermique et l'utilisation d'appareils visant à réguler la consommation sont d'autant plus de moyens qui lui permettront de réaliser d'importantes économies.

Toutes ces notions – réglementation thermique, isolation thermique, efficacité énergétique – s'articulent autour de la problématique suivante :

Comment maîtriser l'énergie dans l'habitat ?

Pour répondre à cette question, nous étudierons dans un premier temps les stratégies mises en place dans la ou plutôt les réglementations thermiques, et la manière dont s'évalue et se mesure l'efficacité énergétique dans le bâtiment.

Puis dans un second temps nous nous intéresserons aux moyens d'optimiser la performance énergétique des bâtiments à travers, entre autre, l'isolation thermique.

Et dans une troisième partie, nous présenterons la maquette que nous avons réalisée ainsi que les expériences que nous avons menées afin d'étudier expérimentalement l'importance de l'isolation thermique.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Description de l'organisation adoptée pour le déroulement du travail

En accord avec notre professeur de projet, notre organisation sera présentée à travers un tableau, disponible en annexe, dans lequel sont résumées les tâches qui ont été réalisées pendant les séances de projet et en travail personnel.

Voir Annexe 2

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. La problématique de la consommation énergétique dans le bâtiment

L'augmentation récurrente de la consommation énergétique est à l'origine de la politique économique actuelle, à savoir la lutte contre les émissions de GES et par extension le réchauffement climatique. L'efficacité énergétique est donc un élément important de l'adaptation au changement climatique : elle permet de réduire considérablement la consommation d'énergie avec un niveau de performance du service identique, soit de réaliser d'importantes économies d'énergie avec les mêmes, voire moins de moyens.

En Europe le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) incarne le plus grand consommateur d'énergie primaire avec plus de 40% de l'énergie totale consommée, loin devant les transports – 32% - et est responsable de près de 36% des rejets de GES. Une amélioration générale du confort (chauffage, éclairage) et l'agrandissement permanent des surfaces habitables sont les principales raisons de l'augmentation de la consommation.

Une amélioration de l'efficacité énergétique de ce secteur représente donc un objectif économique et écologique majeur.

3.1.1. La réglementation thermique : un engagement à échelle européenne

3.1.1.1. *La nécessité de bâtiments moins énergivores*

La France possède un parc immobilier très ancien : alors que 2/3 du parc résidentiel a été construit avant 1974, dont 33% construit avant 1948, les bâtiments neufs ne représentent à peine que 2% du parc. Il est donc indispensable de réhabiliter ces anciens bâtiments très gourmands en énergie ; en effet, la nécessité de renouveler le parc immobilier après la Seconde Guerre Mondiale a conduit à la construction rapide de nombreux logements collectifs en béton – avec une épaisseur des murs excessivement élevée - avec une faible voire aucune isolation thermique au niveau des sols, des toitures et des murs, et des fenêtres non étanches à l'air ; de même les maisons individuelles construites après 1948 sont pour la plupart constituées de pierre, les ouvertures sont en simple vitrage et non étanches à l'air, et la ventilation centralisée est encore inexistante.

Le premier choc pétrolier en 1973 a été la source de nombreuses inquiétudes quant à l'augmentation de notre consommation et notre dépendance énergétique. La première réglementation thermique de 1974, qui voit l'apparition du double vitrage, visait donc à limiter les déperditions de chaleur dans les logements neufs d'habitation. Mais cette volonté de performance énergétique a fait l'objet de nouvelles RT, qui se sont attaquées aux performances des équipements, au chauffage et à la circulation de l'air dans l'habitat.

3.1.1.2. *La RT 2012 : un « saut énergétique »*



Logo de la RT 2012

La réglementation thermique fixe les limites de consommations maximales d'un bâtiment. La RT 2012, qui succède aux RT 2000 et RT 2005, se démarque de ses prédécesseurs, par son domaine d'application et par un niveau de performance énergétique beaucoup plus élevé : en plus des logements neufs, elle est généralisée à l'ensemble des bâtiments à usages de bureau et d'enseignement, aux établissements d'accueil de la petite enfance et, depuis le 1^{er} janvier 2013, aux bâtiments résidentiels.

Les principales exigences de cette RT sont :

- Une consommation maximum de 50 kWhep/m²/an pour les bâtiments neufs, soit trois fois moins que les normes fixées par la RT 2005. Cette valeur change selon la région et l'altitude auxquelles se situe l'habitation. A noter que les précédentes RT n'ont permis en 30 ans de diviser que par deux les consommations énergétiques moyennes des constructions neuves.
- Une amélioration des performances énergétiques des bâtiments neufs de 50%.
- L'élimination des ponts thermiques
- La possession d'au moins une énergie renouvelable pour la production d'eau chaude sanitaire ou chauffage dans les maisons individuelles
- L'évaluation de la perméabilité à l'air du bâtiment – inférieure à 0.6 m³/h/m² afin de définir l'étanchéité du bâtiment.

Cette RT concerne tout aussi bien le maître d'ouvrage que le constructeur, l'architecte, le maître d'oeuvre ou encore les entreprises du bâtiment et les industriels qui sont dans l'obligation de revoir leurs méthodes de mis en œuvre et d'améliorer la performance de leurs produits.

3.1.1.3. *Le respect de la réglementation*

C'est le maître d'ouvrage qui s'engage à respecter les normes de construction définies par la RT en vigueur. Il est chargé de joindre avec le permis de construire un document certifiant de la prise en compte des différences exigences de la RT, dont le respect sera évalué par une étude thermique du bâtiment à la fin des travaux. Puis à la fin des travaux, il devra joindre un document attestant qu'il a bien pris en compte la réglementation. Il est également tenu de mesurer la perméabilité à l'air de la construction.

Même si les contrôles de conformité à la RT ne sont pas systématiques, l'application des exigences peut être vérifiée avant – grâce à une modélisation thermique – pendant ou après les travaux. C'est pourquoi le maître d'ouvrage est tenu de s'entourer de professionnels du bâtiment (architectes, constructeurs, bureau d'étude thermique) afin de bien connaître toute la réglementation.

3.1.1.4. *L'instauration de labels pour classer les bâtiments*

La RT 2005 a vu la mise en place de labels afin d'encourager les propriétaires à améliorer la performance énergétique de leurs bâtiments, labels qui, à l'origine, ont été créés afin d'améliorer la RT 2000 mais dans lesquels se retrouvent des exigences propres à la RT 2012. Un label de performance permet donc de classer les constructions neuves selon 5 niveaux (du moins au plus performant) :

- HPE 2005 : consommation maximale réduite de 10 %
- HPE EnR 2005 : consommation maximale réduite de 10 %, avec utilisation d'énergie renouvelable
- THPE 2005 : consommation maximale réduite de 20 %
- THPE EnR 2005 : consommation maximale réduite de 30 %, avec utilisation d'énergie renouvelable
- BBC 2005 : consommation maximale à 50 kWhep/m²/an (à l'instar de la RT 2012, cette valeur change selon les régions et l'altitude), étanchéité à l'air de 0.6 m³/h.m² pour les maisons individuelles.

La RT 2012 incarne donc dans un sens une généralisation du label BBC, qui est le plus exigeant aujourd'hui en terme de réglementation.

3.1.1.5. Une réglementation à venir : la RT 2020

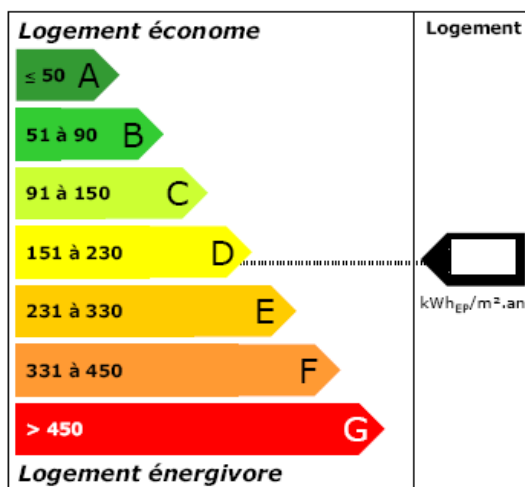
La RT 2020 devra améliorer de 15% les performances énergétiques par rapport à celle de 2012. Cette réglementation s'articule autour d'un nouveau concept : la bâtiment à énergie positive, qui devra produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. En plus des exigences de la RT 2012 s'ajoute le principe de récupération d'énergie excédentaire : l'utilisation d'énergies renouvelables et d'appareils destinés à réguler la consommation sont d'autant plus de moyens de réaliser d'importantes économies d'énergie, énergie qui pourra être redistribuée aux bâtiments voisins par transfert électrique ou de chaleur.

3.1.2. Le diagnostic de performance énergétique (DPE)

Le DPE est un outil mis en place en 2002 permettant d'avoir une vision correcte de la performance énergétique du logement et de ses équipements. Obligatoire à l'affichage dans la vente ou la location d'une habitation depuis 2006, il apporte une description des principaux postes de consommation d'énergie : chauffage, climatisation, eau sanitaire. Il indique également la consommation d'énergie effective du bâtiment /m²/an (d'après les factures énergétiques) et comprend également des propositions d'amélioration afin de réaliser des économies d'énergies.

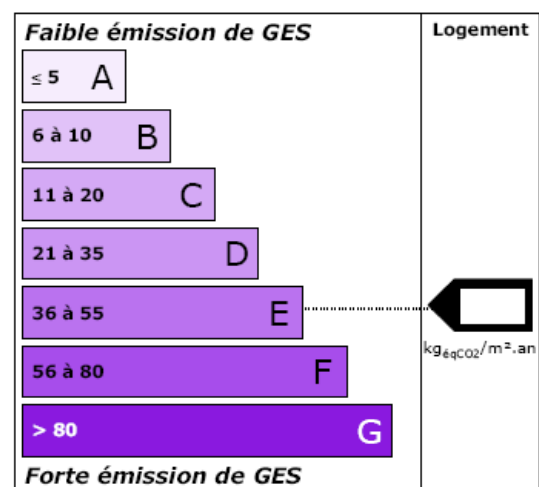
Le DPE se résume en deux étiquettes : l' « étiquette énergie » et l' « étiquette climat » comprenant sept classes de référence allant de A (les logements les plus performants certifiés « Bâtiments basse consommation ») à G (énergivore et grand émetteur de GES).

L' « étiquette énergie »



Elle indique la performance d'après la consommation annuelle d'énergie primaire exprimée en kWh/m²/an

L' « étiquette climat »



Elle indique la performance d'après les émissions de GES exprimées en kg équivalent CO2/m²/an

Le propriétaire peut ainsi choisir de réaliser des travaux – souvent en faisant appel à un bureau d'étude thermique - visant à améliorer la performance énergétique du bâtiment : isolation thermique, appareils plus performants, équipements de production d'énergies renouvelables sont des moyens permettant de faire d'importantes économies d'énergies et de redorer l'image du bâtiment.

3.1.3. Des indicateurs pour mesurer l'efficacité énergétique

- L'efficacité énergétique minimale du bâti : coefficient *Bbio*

La RT 2012 fixe pour la première fois une exigence sur l'efficacité énergétique du bâti entier et pas seulement sur l'isolation. En effet celle-ci se mesure grâce au coefficient de besoin bioclimatique. Noté *Bbio*, il s'exprime par un nombre de points. Il se décompose en 3 sous coefficients qui sont : *Bch* qui représente le besoin en énergie pour le chauffage, *Bfr* le besoin en énergie pour le refroidissement, et *Becl* le besoin en énergie pour l'éclairage, mais sans prendre en compte les systèmes énergétiques mis en oeuvre.

Ainsi, le coefficient *Bbio* mesure la capacité d'un bâti à limiter ses besoins en énergie dans les domaines représentés par les 3 sous coefficients précédents, et se calcule d'après la relation suivante : **$Bbio = 2 \times Bch + 2 \times Bfr + 5 \times Becl$** .



Carte des différents **Bbiomax**
en fonction des régions

Il s'avère que ce coefficient ne doit pas dépasser une valeur maximale notée *Bbiomax*. Celui-ci dépend de la localisation géographique du bâtiment, de son altitude et de sa surface. C'est la raison pour laquelle on leur associe les sous-coefficients *Mbgeo*, *Mbalt* et *Mbsurf*.

On a alors :

$$Bbiomax = Bbiomax_{moyen} \times (Mbgeo + Mbalt + Mbsurf)$$

Ainsi, ce premier coefficient permet de mesurer l'efficacité énergétique d'un bâtiment, mais surtout d'imposer son optimisation.

- La consommation conventionnelle d'énergie maximale : coefficient *Cep*

La RT 2012 ne se limite au coefficient *Bbio* : un coefficient *Cep* a été mis en place afin de mesurer la consommation annuelle en kWh/(m²/an) pour les cinq usages suivants : chauffage, climatisation, production d'eau chaude sanitaire, éclairage artificiel et auxiliaires comme les pompes et les ventilateurs. Comme précédemment, le coefficient *Cep* doit être inférieur à un *Cepmax*. Ce dernier varie également en fonction de la localisation, de l'altitude, de la surface du bâtiment mais il prend en plus en compte le type d'énergie utilisée (noté *McGES*).

Ce coefficient se calcule ainsi :

$$Cepmax = 50 \times Mctype \times (Mcgeo + Mcalt + McGES + Mcsurf)$$

- Le confort d'été minimal : le *Tic*

Enfin, la dernière exigence de la RT 2012 concerne la température conventionnelle intérieure appelée *Tic*. Exprimé en degrés, le *Tic* correspond à la température intérieure du bâtiment à la fin d'une séquence de jours chauds successifs, soit en période de forte chaleur. Il ne doit pas dépasser une température de référence notée *Ticréf*, calculée à partir de valeurs de références réglementaires. Cette réglementation a pour but de limiter les surchauffes en été sans avoir besoin de climatiser tout en préservant un bon niveau de confort. La climatisation nécessitant beaucoup d'énergie, cette exigence permet d'économiser de l'énergie.

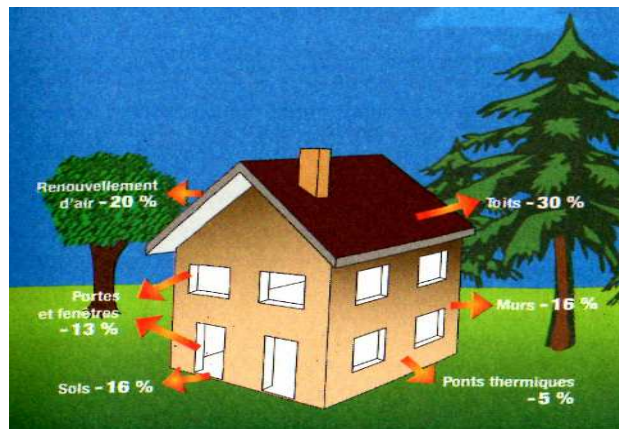
Cette réglementation impose donc souvent aux propriétaires de réaliser d'importants travaux afin de respecter ses exigences. Mais au-delà de l'aspect légal s'instaure pour l'habitant le besoin de réaliser des économies d'énergies ; se préserver du chaud en été comme du froid en hiver certes, mais pas au détriment de la facture énergétique. **Comment alors améliorer l'efficacité énergétique ?** Réaliser des économies d'énergie tout en maintenant le confort thermique passe par une bonne isolation thermique : chauffage, isolation, ventilation sont des paramètres qui peuvent altérer les performances du bâtiment. Obligatoire depuis 1974, l'isolation thermique a permis de réduire considérablement les dépenses énergétiques des constructions.

3.2. Efficacité énergétique et isolation thermique

L'isolation thermique désigne l'ensemble des techniques permettant de limiter les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur (ou entre un milieu chaud et froid). Elle consiste donc à maintenir la chaleur (notamment en hiver) mais aussi à la transférer au milieu froid.

L'isolation permet donc une augmentation conséquente du confort thermique sans émission des GES. Et au-delà de l'aspect écologique, l'isolation constitue un formidable moyen de création d'emploi : la rénovation thermique offre en effet un large éventails d'activités - techniciens, maintenance, surveillance, contrôle, gestion, installation – permettant de maîtriser et réguler notre consommation.

3.2.1. L'isolation thermique : une mesure dite « passive »



Sources de déperditions de chaleur dans une maison individuelle

L'isolation thermique implique de réaliser des travaux sur la structure du bâtiment afin de limiter les pertes explicitées dans l'image ci-dessus.

3.2.1.1. Le choix des isolants thermiques

La qualité d'un isolant dépend avant tout de sa résistance thermique. En effet on considère qu'un matériau est isolant d'après un coefficient mesurant sa capacité à s'opposer au passage d'un flux thermique : c'est la résistance thermique. Plus ce coefficient est grand et plus l'isolant est efficace.

On note : $R = e/\lambda$

On remarque donc que la résistance thermique dépend étroitement de la conductivité thermique λ qui correspond à la quantité de chaleur transférée dans le temps et l'espace. On en déduit donc et tout à fait logiquement que plus la conductivité est faible, plus l'isolant est efficace ; c'est d'ailleurs très souvent ce coefficient qui permet de comparer directement la qualité des isolants des fabricants.

D'autres paramètres peuvent également entrer compte dans les fiches techniques des constructeurs tels que la résistance au feu ou encore la capacité d'absorption de l'eau.

Ci-dessous un tableau comparant quelques isolants en fonction de leur conductivité thermique :

Isolant	Coefficient λ
Béton ordinaire	2
Brique	0.8
Bois	0.15
Polystyrène	0.034
Liège	0.038
Laine de verre ou de roche	0.04

Toutefois ces coefficients ne constituent pas en eux-mêmes des outils de comparaison infaillibles. De nombreux critères non négligeables sont à prendre en considération lors du choix de ses isolants : le prix, l'énergie nécessaire a leur fabrication, la longévité ou encore l'impact sanitaire. De plus le choix d'un isolant peut dépendre tout simplement des besoins du propriétaire.

Il existe donc 3 catégories d'isolants, qui possèdent globalement des caractéristiques thermiques similaires – λ entre 0.023 et 0.05 – mais qui diffèrent selon les effets recherchés.

Le tableau suivant répertorie les classes d'isolant avec leur caractéristique :

Classe d'isolant	Avantages	Inconvénients	Exemples
<i>Les isolants d'origine minérale</i>	<p>Sont issus de matières premières naturelles et abondantes</p> <p>Les moins chers</p> <p>Très bonne résistance au feu</p>	<p>Energie grise assez élevée : entre 120 et 500 kWh/m³</p> <p>Mauvaise étanchéité à l'eau entraînant une dégradation rapide et des fuites d'air</p>	<p>Laine de verre et de roche</p> <p>La perlite</p> <p>La vermiculite</p>
<i>Les isolants d'origine végétale ou animale</i>	<p>L'énergie nécessaire à leur fabrication est faible</p> <p>Bonne isolation phonique</p> <p>Préservent des insectes et des rongeurs</p>	<p>Sensible au tassement</p> <p>Mauvaise étanchéité à l'eau</p> <p>Prix élevé</p>	<p>Laine de bois</p> <p>Laine de chanvre</p> <p>Laine de lin</p> <p>Paille</p> <p>Chanvre</p> <p>Liège</p>
<i>Les isolants synthétiques</i>	<p>Isolants les plus performants</p> <p>Bonne résistance à l'eau</p> <p>Longévité supérieure aux autres types d'isolants</p>	<p>Energie grise considérable : entre 700 et 1200 kWh/m³</p> <p>Faible résistance au feu</p> <p>Emissions de particules nocives dues aux additifs chimiques</p>	<p>Polystyrènes</p> <p>Polyuréthane</p>

La performance des isolants « minces » est souvent vantée à tort. En effet, leur pose très difficile, leur faible épaisseur et leur incapacité à conserver la fraîcheur en été les rendent au final moins efficaces que les isolants lourds qui assurent un meilleur confort autant en été qu'en hiver.

Il n'existe pas d'isolant optimal sachant que ce n'est pas en augmentant l'épaisseur – qui est limitée selon la matériau et par les normes des constructeurs - que ce dernier sera plus efficace pour autant. Ce sont l'environnement dans lequel se trouve le bâtiment, les besoins du propriétaire et le prix du matériau qui vont permettre d'opter pour un isolant ou un autre.

3.2.1.2. Isolation des murs

L'isolation des murs est le travail de menuiserie le plus importante dans l'isolation d'un bâtiment. Son principe est de doubler le mur d'une épaisseur d'isolant sur toute la surface du bâtiment qui est en contact avec l'extérieur.

Il existe deux principales techniques : l'isolation par l'intérieur et l'isolation par l'extérieur. L'une ou l'autre sera privilégiée en fonction de la structure de du bâtiment. Il existe néanmoins d'autres méthodes où l'isolant est placé entre deux parois, voire intégré au matériau de construction.

▪ Isolation par l'intérieur

C'est la méthode la plus courante, quoique que privilégiée pour les bâtiments neufs pour des raisons économiques ; l'isolation intérieur se révèle en effet moins chère car les travaux sont moins importants et ne nécessitent pas de faire appel à un professionnel.

L'isolant est donc placé du côté intérieur du mur. L'isolation des murs par l'intérieur est surtout utilisée pour traiter les ponts thermiques, c'est à dire limiter les déperditions thermiques au niveau des jonctions avec les différentes surfaces de la maison – sols, balcons, portes, fenêtres, mais aussi lorsque la maison possède une grande surface vitrée.

Mais ce type d'isolation présente tout de même des inconvénients :

- Elle ne permet pas de traiter tous les types de ponts thermiques (nez de dalle en plancher haut, etc.).
- Elle réduit l'espace habitable intérieur des pièces.

▪ Isolation par l'extérieur

C'est la technique d'isolation la plus efficace mais aussi la plus coûteuse. Elle est surtout utilisée lors de la construction de bâtiment car c'est la meilleure façon de traiter les ponts thermiques – ceux-ci étant plus difficile à isoler une fois la bâtiment terminé, mais elle aussi privilégiée dans le cadre de la rénovation d'une façade. Contrairement à l'isolation par l'intérieur, l'isolation par l'extérieur permet de conserver la même surface habitable puisque la couche d'isolant est ajoutée à l'extérieur et protège donc le bâtiment des aléas extérieurs.

Cette technique possède aussi des inconvénients :

- d'abord La pose d'isolants par l'extérieur n'est pas aussi aisée que par l'intérieur, en effet, il faut isoler toute la façade extérieure. C'est pourquoi il est généralement nécessaire d'utiliser un échafaudage pour pouvoir atteindre toutes les parties du mur, ce qui nécessite donc d'engager les services d'une entreprise de construction ou d'un professionnel et rend donc les travaux plus coûteux.
- Ce type de rénovation rend inévitable la modification de l'aspect extérieur du bâtiment, ce qui impose une déclaration préalable de travaux ou un permis de construire.
- Cette technique nécessite de la place autour du bâtiment. Dans le cas d'une rénovation d'un bâtiment de ville, il est souvent impossible d'ajouter du volume autour du bâtiment.

3.2.1.3. Menuiseries extérieures

En moyenne, plus de 20% des pertes de chaleur sont dues aux ouvertures, telles que portes et fenêtres. Il faut donc les isoler correctement.

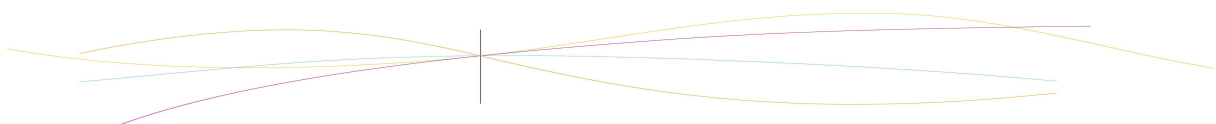
- **Les portes**

Les portes sont un réel inconvénient pour l'isolation. En effet, une porte mal isolée laisse facilement passer l'air froid. C'est la raison pour laquelle, lors du choix d'une porte, il faut prendre en compte son coefficient Ud (U : coefficient de transmission thermique et d pour door). C'est un indicateur qui caractérise la capacité isolante de la porte : il mesure l'énergie en Watts passant à travers la porte en fonction de sa surface en m^2 et de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur en Kelvins. Son unité est donc le $W/(m^2.K)$. Ce coefficient est compris entre 1 et 4 : ainsi, plus le coefficient Ud est haut, plus la perte de chaleur est importante, plus la consommation d'énergie augmente et donc moins la porte est isolante.

Néanmoins, on ne peut pas réellement choisir le coefficient Ud de sa porte d'entrée. En effet, la RT 2005 imposait aux portes d'avoir un coefficient de transmission thermique Ud fixé à 1,5 $W/(m^2.K)$ (valeur maximale pour obtenir crédit d'impôt). Quant à la RT 2012, elle n'a pas de réelle exigence pour le coefficient Ud à part le fait qu'il doit être inférieur ou égal à 1,8 $W/m^2.K$. C'est pourquoi les portes actuelles sont composées de panneaux isolants en mousse de polyuréthane ou en polystyrène extrudé pour obéir à la norme d'isolation thermique. Il existe également des solutions plus simples pour renforcer l'isolation de sa porte comme clouer un boudin au bas de la porte pour empêcher l'air froid de passer en dessous, ou mieux encore, des barres isolantes en aluminium ou en PVC plus pratiques et plus discrètes.

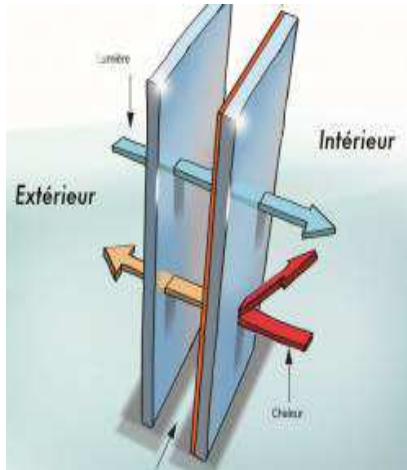
Il est clair que cette exigence sur le coefficient Ud n'est pas inutile. Cela permet réellement de réduire sa consommation d'énergie et donc sa facture de chauffage comme le montre cette étude réalisée sur l'isolation thermique de deux portes de maison parisienne sur une période de dix ans.

	Déperdition de chaleur	Coût annuel du chauffage au gaz naturel	Coût annuel du chauffage électrique
Porte A, $Ud=3$ (isolation thermique faible)	3962 kWh	273 euros	487 euros
Porte B, $Ud=1$ (isolation thermique forte)	1289 kWh	89 euros	159 euros



▪ Les fenêtres

Comme les portes, les fenêtres sont également à l'origine de pertes de chaleur. Il faut donc également les isoler.



Double vitrage

Tout d'abord, la meilleure solution est la pose de double vitrage : c'est la garantie d'une bonne isolation des fenêtres. En effet, le double vitrage consiste en « deux vitres espacées par une lame d'air, d'Argon ou de Krypton plus ou moins importante ». L'intérêt de cette lame réside dans le fait que l'air ou le gaz emprisonné est un très bon isolant thermique. D'autre part, les fenêtres possèdent, comme les portes, un coefficient d'isolation du vitrage appelé coefficient U_g . Plus celui-ci est faible, plus la fenêtre est isolante. La RT 2005 recommandait un coefficient U_g inférieur ou égal à deux, alors que la RT 2012 ne fixe pas vraiment de règle. Le simple vitrage n'ayant un coefficient que de 6, le double vitrage permet de réduire les pertes de chaleur de 50 à 80% par rapport au simple vitrage.

De plus, pour une isolation optimale, on peut opter pour le VIR : double Vitrage à Isolation Renforcée. Cela consiste par exemple à déposer sur une paroi, une fine couche d'argent qui limite les transferts de chaleur. Par conséquent, le VIR est deux à trois fois plus isolant que le double vitrage classique.

▪ Les volets isolants

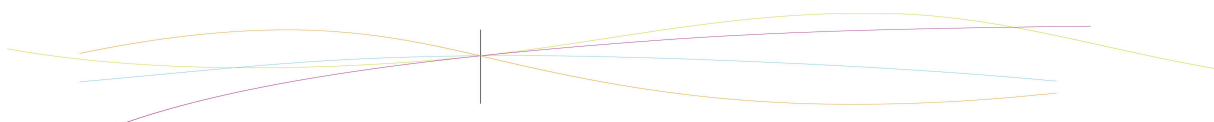
Une autre solution pour améliorer son isolation thermique est la pose de volets isolants au niveau des fenêtres. En effet, ces volets sont une paroi opaque faite en bois, PVC ou aluminium qui créent une lame d'air isolante entre la fenêtre et lui. De plus, il protège également du vent. Pour chiffrer cette économie d'énergie, il s'avère qu'un volet roulant fermé améliore la capacité d'isolation d'une fenêtre déjà isolante jusqu'à 31% et d'une fenêtre peu isolante jusqu'à 55%, ce qui n'est pas négligeable. Ainsi, fermer ses volets permet de gagner 4°C en hiver, et arrête 95% de la chaleur en été.

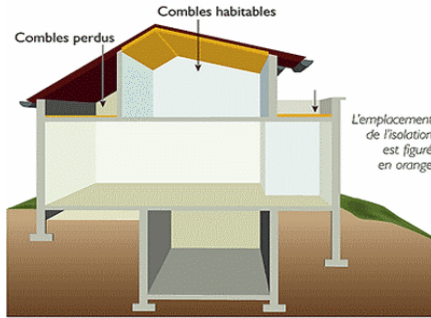
3.2.1.4. Isolation intérieure

L'isolation thermique ne se limite pas uniquement à une isolation externe de l'habitable. En effet, celle-ci passe également par une isolation interne qui nécessite de traiter les points singuliers représentés par la toiture et le sol.

▪ L'isolation des combles et des toitures

L'isolation des toitures est la première étape à réaliser dans la conception d'un logement dans la mesure où les pertes potentielles de chaleurs représentent 25% à 30% des déperditions totales. Cela peut s'expliquer par le fait que l'air chaud, plus léger s'élève naturellement et vient en grande partie se loger sous les toits.





On peut considérer que le toit peut se diviser en deux parties distinctes : les combles perdus, et les combles habitables. Cependant les deux nécessitent une bonne isolation thermique effectuée avec des techniques quelques peu différentes.

Les combles perdus : Il s'agit des locaux situés sous les toitures inclinées et qui ne sont pas chauffées. En clair, ces parties doivent être séparées de la partie habitable par une barrière isolante. En effet, l'isolation des combles perdus est d'autant plus nécessaire que les pertes de chaleur par cet endroit sont importantes, c'est pourquoi on doit considérer deux situations : le cas des combles avec plancher et les combles avec solives.

Isolation sur le plancher

Les isolants peuvent être disposés en une ou plusieurs couches, selon les circonstances et en fonction des produits suivants :

- Les isolants en panneaux qui peuvent être en fibre de bois, en polystyrène, ou encore en polyuréthane et qui sont disposés bord à bord sur le plancher ;
- La laine minérale de verre ou de roche se présentant sous forme de rouleaux ou de panneaux ;
- La laine minérale en vrac qui est soufflée à l'aide d'un appareil approprié.

Isolation entre les solives

Pour l'isolation des solives, on utilise les mêmes matériaux que pour l'isolation sur le plancher. Néanmoins, ces isolants se présentent sous des formes différentes de celles énoncées précédemment :

- sous forme de billes ou de flocon ;
- sous une forme de pâte.

Les combles habitables : Il s'agit des parties aménageables, habitables et situées sous une toiture inclinée et dont l'utilisation nécessite le chauffage pour permettre le bien être de ses habitants.

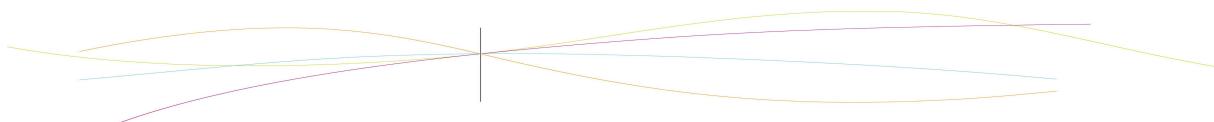
C'est pourquoi de nombreuses techniques d'isolation ont été mises au point :

Isolation sous rampants

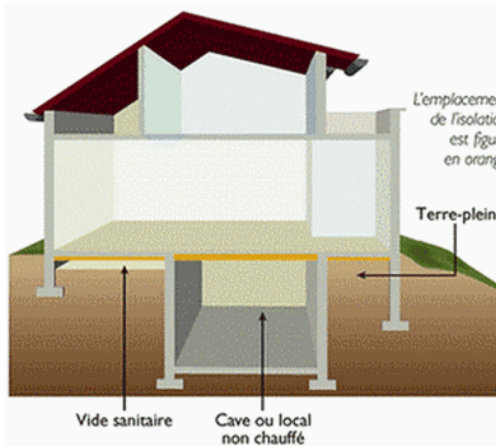
- Pose d'un isolant, comme du plâtre ou du bois, qui peut être effectuée en une ou deux couches.
- On trouve également de nouveaux produits isolants pour les charpentes. Ces derniers sont constitués de caissons chevronnés intégrant de la laine de roche volcanique. Ils disposent de nombreux avantages : il permet de faire gagner un temps précieux au chantier, de mettre en valeur les charpentes, de conserver le volume de l'habitable et permet une excellente isolation aux bruit aériens.

Isolation sur toiture

Sont utilisés des panneaux de toitures porteurs qui comprennent le support ventilé de couverture, l'isolation ainsi que le parement de sous face. Cette technique présente des avantages comme celui de conserver le volume de la pièce, assurer une isolation continue et durable, préserve la charpente des différentes variations de température et d'humidité et garantit une bonne ventilation.



▪ **Isolation des sols/planchers.**



L'isolation du sol dépend de plusieurs facteurs :

- La constitution du plancher;
- La nature des liaisons entre les planchers et les parois verticales ;
- La nature des liaisons entre les différents revêtements de sols ;
- La présence et la nature d'un éventuel volume d'air sous le plancher.

En fonction de ces facteurs sont mis en place différents moyens d'isolation avec la mise en place de:

- Planchers de béton à poutrelle et entrevous PSE certifiés languettes ;
- Planchers de béton à poutrelles avec isolation sous dalle flottante ;
- Planchers en dalles de béton cellulaire.

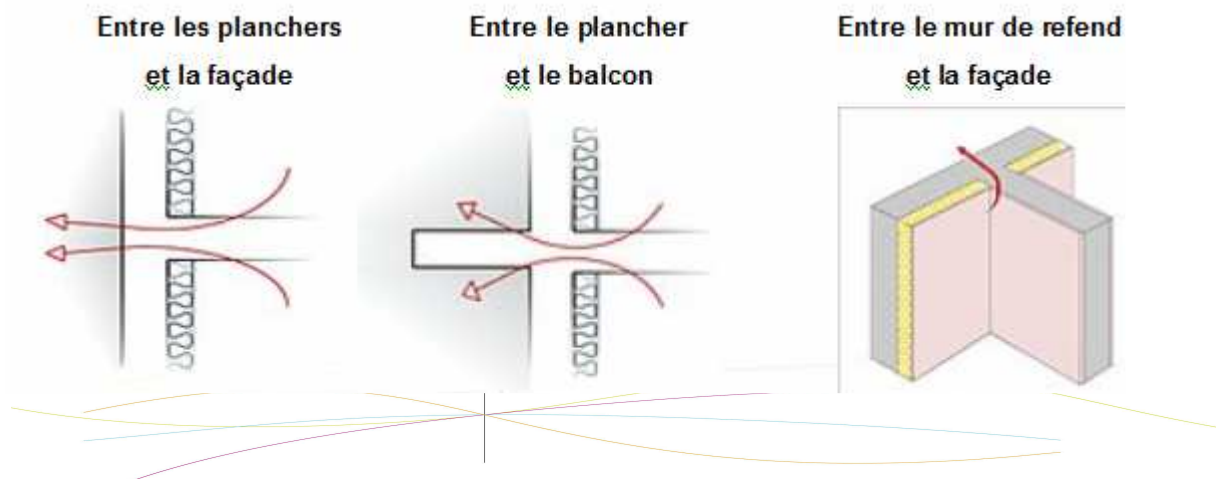
Cependant d'autres critères sont à prendre en compte avant de procéder à l'isolation. En effet, faut s'assurer de la situation du sol c'est-à-dire si il est positionné sur vide-sanitaire ou locaux non chauffés ou encore sur un terre-plein.

3.2.1.5. Isolation des ponts thermiques

Un pont thermique représente une zone de contact entre deux parois de géométrie, matériau et résistance thermique différentes – entre un mur et un plancher par exemple – qui est susceptible d'endommager l'enveloppe du bâtiment. Ils sont en effet propices au passage de l'air et de l'humidité, pouvant alors provoquer condensation, salissures, moisissures ou encore apparition de fissures.

Dans une construction non isolée, les déperditions de chaleur dues aux ponts thermiques restent minoritaires – moins de 20%, ce qui est loin d'être le cas pour les constructions répondant aux exigences de la RT 2012, où ceux-ci, plus nombreux du fait de l'isolation des murs et ouvertures représentent plus de 40% des pertes... même si les pertes globales du bâtiment sont beaucoup plus faibles.

Les ponts thermiques les plus importants sont les ponts thermiques de liaisons qui concernent les jonctions :



Il existe trois possibilités pour traiter ces types de ponts thermiques :

- Réduire la section du pont thermique
- Mettre en place un rupteur de pont thermique qui est composé d'un corps isolant, permettant ainsi de « couper » le pont thermique et d'empêcher l'humidité de s'infiltrer.
- Doubler les murs de refend avec une couche d'isolant de quelques centimètres afin de freiner les déperditions et d'allonger le chemin du passage de la chaleur

Les ponts thermiques doivent donc être traités au maximum lors de la conception du bâtiment, en appliquant voire en combinant les techniques ci-dessus. En revanche leur remède est plus complexe dans le cadre d'une rénovation thermique puisqu'il faut prendre garde à ne pas modifier la structure de la construction.

3.2.2. Les solutions « actives »

Elles consistent à optimiser les flux énergétiques dans le bâtiment, soit à maîtriser en particulier la circulation de l'air et l'humidité en utilisant des appareils performants et des systèmes de contrôle et de régulation.

3.2.2.1. *La ventilation de l'air*

La différence de température entre l'intérieur d'un bâtiment et l'extérieur est propice au dépôt de l'humidité dans les ouvertures, notamment au niveau des ponts thermiques ; c'est pourquoi il est indispensable de renouveler régulièrement l'air afin de maintenir le bâtiment dans un état hygrométrique proche de celui de l'air extérieur et d'éliminer les polluants intérieurs – l'air intérieur étant dix fois plus pollué que l'air extérieur.

Toutefois, une mauvaise ventilation peut tout aussi bien entraîner une surconsommation inutile d'énergie due au débit de l'air entrant et à la température extérieure – puisqu'il faut réchauffer l'air – mais également des excès d'humidité, favorisant le développement de moisissures sur les murs et la détérioration générale du bâti.

La ventilation naturelle, qui repose sur la mise en place de bouches d'aération sur différents étages du bâtiment, reste a priori la technique la plus simple mais le débit – qui dépend des conditions climatiques, est très mal contrôlé et induit une consommation de chauffage trop élevée.

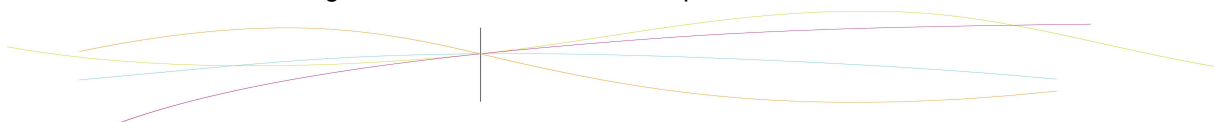
Mais aujourd'hui des systèmes ventilation tels que les « ventilations mécaniques contrôlées » (VMC) et le « puits canadien » permettent de réguler efficacement la circulation de l'air :

- **La VMC simple flux autoréglable**

C'est le système de ventilation le plus simple : des entrées d'air, placées dans les pièces à vivre (chambres, salon...) généralement au niveau des fenêtres, véhiculent l'air jusque dans les pièces humides (cuisine, salle de bains, WC...) où celui-ci est expulsé dans des bouches d'aération par un ventilateur. Toutefois même s'il est possible de faire varier le débit, le ventilateur ne tient pas compte de la température extérieure : en plus de consommer beaucoup d'énergie, il véhiculera plus d'air froid en hiver et plus d'air chaud en été !

- **La VMC simple flux hygroréglable**

Le principe est le même que le VMC simple flux autoréglable, mais le débit d'air est régulé en fonction de l'humidité : ainsi le débit sera minime si l'air intérieur est sec, contrairement au VMC autoréglable où le ventilateur fonctionnait à la même vitesse quelque soit la qualité de l'air intérieur. De ce fait, les consommations de chauffage liées à la ventilation seront plus faibles.



▪ **La VMC double flux**

Elle permet de réchauffer l'air neuf introduit dans l'habitation en récupérant 60% de la chaleur de l'air évacué ; ce système inclut donc deux flux : un ventilateur central qui distribue l'air dans les pièces principales et un échangeur de chaleur qui permet de réchauffer l'air froid entrant. Ce système assure donc un très bon confort thermique et la consommation de chauffage n'en est que plus réduite, ce qui fait en fait aujourd'hui la ventilation la plus économique d'un point de vue énergétique.

▪ **L'échangeur air-sol**

Ce système, couramment appelé « Puits canadien » est conçu pour réchauffer ou rafraîchir l'air ventilé.

Il s'agit d'un dispositif géothermique utilisant la température du sol à une profondeur de 1,5 à 2 m. Celui-ci se révélant plus chaud en hiver que la température extérieure – de l'ordre de 4°C – et plus frais en été – environ 17°C, l'air aspiré par les tuyaux dans le sol - comme le montre la figure ci-dessous – est donc tempéré.

Avec ce système couplé avec une VMC – une double flux en l'occurrence sur le dessin, l'air ne sera pas prélevé directement de l'extérieur, ce qui permet des économies d'énergie significatives.

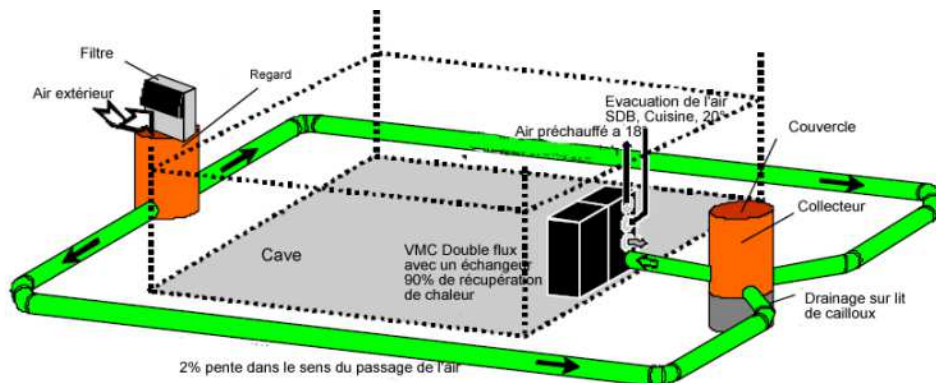


Schéma expliquant le fonctionnement d'un « puits canadien »

Quelque soit le type de ventilation, le débit de renouvellement d'air doit respecter la limite fixée par la RT 2012, qui dépend du nombre de pièces, du système utilisé etc...

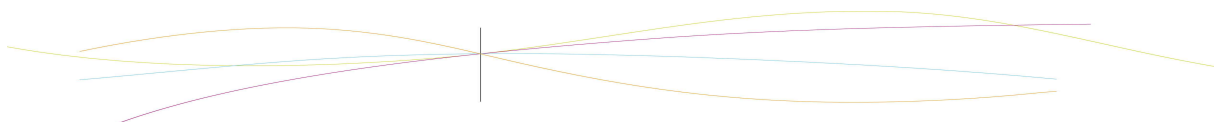
3.2.2.2. *L'infiltrométrie*

Malgré les systèmes de ventilation vus précédemment, il reste difficile de contrôler le débit d'air entrant dans le logement. Certes un VMC double flux permettra de réguler le débit d'air entrant en fonction de l'humidité/température extérieure mais ne contrôlera pas les quantités d'air rentrant de façon non voulue, ce qui sera toujours source de consommation inutile et de gaspillage de chauffage puisqu'il faudra chauffer l'air froid en permanence.

C'est là qu'intervient l'infiltromètre, destiné à localiser les fuites d'air responsables de ce défaut d'étanchéité.

▪ **L'infiltromètre**

Il est composé d'un ventilateur réglable et d'une toile de nylon étanche fixée hermétiquement dans une ouverture, en général la porte d'entrée.



▪ **Préparation**

Toutes les ouvertures susceptibles de laisser entrer l'air – fenêtres, porte de garage, d'entrée etc - doivent être fermées, sauf les portes intérieures afin d'assurer la libre circulation de l'air dans l'habitable. Le test doit également être réalisé dans de bonnes conditions météorologiques puisque la force du vent est susceptible d'influencer les résultats.

▪ **Test d'infiltrométrie**

Le « Blower Door Test » permet de mesurer l'étanchéité à l'air du bâtiment. Le ventilateur, une fois en marche, crée une différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur de bâtiment. En convertissant la pression en un débit de fuite, un capteur de pression, situé sur la toile en nylon, détermine la quantité d'air en m3 par minute nécessaire pour garder une pression constante dans le logement.

Ce test est renouvelé pour plusieurs pressions.



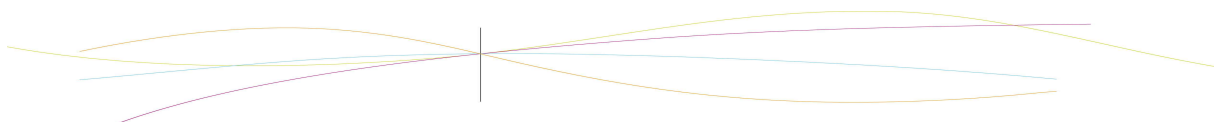
▪ **Localisation des fuites**

Plusieurs techniques permettent de localiser les fuites d'air :

- L'opérateur peut utiliser une caméra thermique afin de visualiser les zones refroidies par le passage de l'air
- Un anémomètre à fil permet de suivre le déplacement de l'air au niveau de l'infiltration
- La poire à fumée permet de créer une fumée artificielle s'infiltrant aux endroits perméables

▪ **Assurer l'étanchéité**

Les fuites d'air étant essentiellement dues aux ouvertures – portes, fenêtres - et aux ponts thermiques, il est possible d'y remédier en effectuant les travaux de menuiseries vus précédemment.

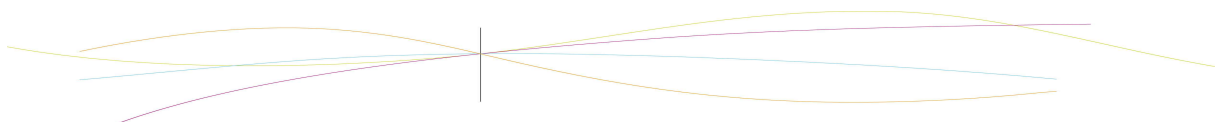


3.2.2.3. Les systèmes de gestion d'énergie SIGE

Les systèmes de gestion d'énergie permettent de contrôler les consommations d'énergie du bâtiment afin d'aider les occupants à ajuster leurs besoins énergétiques et à mettre en œuvre les moyens nécessaires afin de diminuer leur consommation. Il existe différents systèmes :

- Les SIGE statiques permettent d'afficher les consommations du bâtiment grâce à des capteurs et des compteurs disposés dans le bâti. Toutefois les données ne sont pas conservées longtemps, ce qui implique le relevé quotidien des mesures par une tierce personne, l'utilisateur.
- Les SIGE semi-statiques ont l'avantage par rapport au système précédent de proposer à l'utilisateur des actions d'amélioration aux habitudes de consommation d'énergie du bâtiment.
- Les SIGE dynamiques sont les plus fiables dans leur mesure des consommations du bâtiment. Grâce à la prise en compte de nombreux paramètres par les capteurs (température, électricité, humidité, CO₂...) - et l'analyse automatique des mesures, ils permettent de donner à l'utilisateur les meilleurs moyens destinés à améliorer la performance énergétique du bâtiment.

En fait d'appareils de mesure, ils permettent de faire prendre conscience aux occupants de l'importance de réduire leur consommation. Ce sont donc de formidables outils pédagogiques quant à la réalisation d'économies d'énergie.



3.3. Etude expérimentale

Afin de démontrer l'importance d'une bonne isolation thermique, nous avons réalisé une maquette de maison à échelle réduite qui nous a servie de modèle pour réaliser nos expériences, le but étant de comparer les isolants thermiques mais aussi d'étudier et de calculer les déperditions thermiques en fonction des surfaces au sein de la maison.

3.3.1. Présentation de la maquette

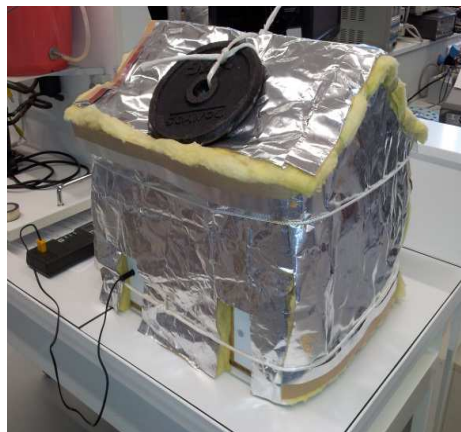
La structure de notre maquette a été construite avec des plaques de bois en contreplaqué d'1 cm d'épaisseur. L'intérieur a été séparé en 2 pièces : une principale et une plus petite afin d'étudier l'évolution de la température en fonction de la taille de la pièce. De plus chaque pièce présente deux ouvertures : une porte de 6*10 cm et une fenêtre de 5*5 cm, afin de rendre la maison plus réaliste – une étude de déperditions thermiques sur une maison entièrement fermée ne serait en effet pas très efficace. Le toit présente une inclinaison de 40°, comme c'est le cas pour la plupart des maisons individuelles, et est amovible. Lors des expériences, des poids de 2 kg seront disposés sur le toit afin que ce dernier soit parfaitement encastré dans la structure.

En ce qui concerne les dimensions de la maison, veuillez vous référer aux plans de la maquette disponibles en annexe.

Pour réaliser nos expériences, nous avons utilisé la maison sans isolant (structure en bois) puis avec laine de verre et enfin laine de roche.



Maison sans isolant



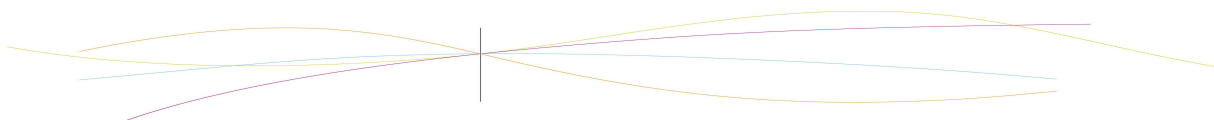
Maison avec laine de verre



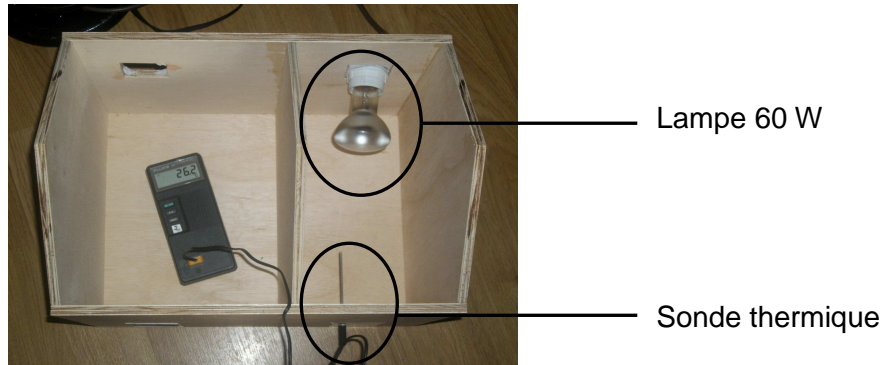
Maison avec laine de roche

3.3.2. Conditions expérimentales

Les expériences sont réalisées à pression atmosphérique et à une température ambiante comprise en 20 et 22°C, que l'on considérera comme la température initiale à l'intérieur de la maison. Une lampe à incandescence de 60 W fixée dans la fenêtre à du carton plume nous servira de source de chaleur et une sonde thermique nous permettra de mesurer l'évolution de la température dans la maison.



L'ensemble est disposé comme suit :



Nous avons fait passer la sonde thermique à travers la porte – réalisée en carton plume – afin qu'elle soit légèrement surélevée et ne soit pas perturbée par la température du sol.

3.3.3. Expériences

3.3.3.1. *Comparaison entre les deux pièces*

Tout d'abord, comme nous l'avons décrit précédemment, notre maquette dispose de deux pièces : une petite et une grande. Dans cette expérience, nous cherchons à voir si la taille d'une pièce a une influence sur la montée en température. A partir des conditions expérimentales décrites précédemment, nous chauffons chaque pièce pendant une durée de 20 min en relevant la température toutes les minutes. Ici la maison n'est recouverte d'aucun isolant.

On constate que la petite pièce est chauffée beaucoup plus rapidement que la grande salle étant donné que le volume à chauffer est plus petit.

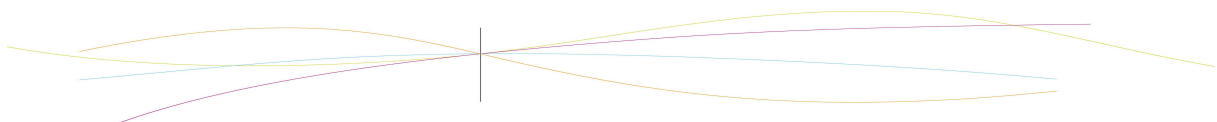
Grande pièce : 20 min pour atteindre 44°C

Petite pièce : 7 min 30 pour atteindre 44°C

On peut néanmoins s'interroger sur la variation de la température pendant la phase de refroidissement qui semble identique pour les deux pièces.

La raison en est simple :

La grande pièce a chauffé suffisamment longtemps pour que les parois puissent absorber la chaleur et la conserver, ce qui n'est pas le cas de la petite pièce qui a mis moins de 8 min pour atteindre 44°C dans laquelle la chaleur est perdue beaucoup plus facilement. Mais il est évident que si on avait éteint le chauffage dans la petite pièce après 20 min, la température, aurait été largement supérieure à celle de la grande pièce et la chaleur mieux conservée.



3.3.3.2. Comparaison des isolants

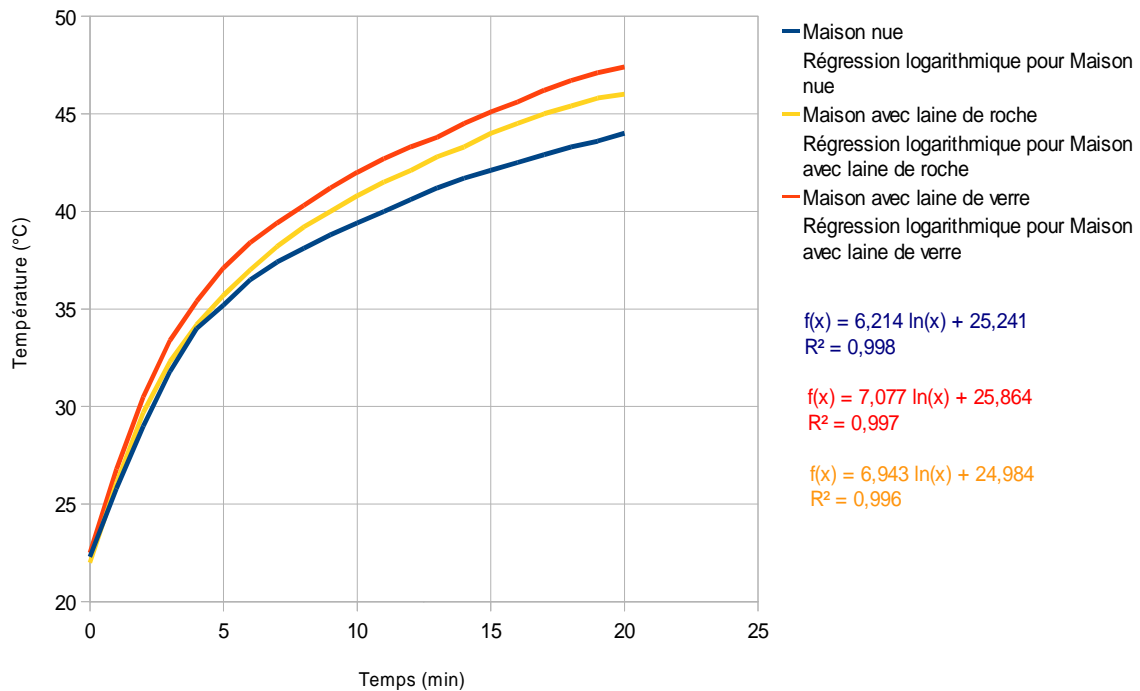
3.3.3.2.1. Echanges thermiques intérieur → extérieur

Pour modéliser les échanges thermiques de l'intérieur vers l'extérieur, notre expérience consistait à réchauffer l'intérieur de la maison pendant 20 min – lampe disposée uniquement dans la grande pièce – puis d'étudier l'évolution de la température après avoir éteint la lampe également pendant 20 min. Cette expérience va nous permettre d'étudier les déperditions thermiques, c'est à dire la quantité de chaleur dissipée vers l'extérieur.

D'après les résultats expérimentaux, nous avons tracé sur tableur pour chaque isolant l'évolution de la température en fonction du temps dans la maison pour une étude comparative entre les isolants plus efficace.

Température en fonction du temps pour différents isolants

Chauffage maison avec lampe 60 W

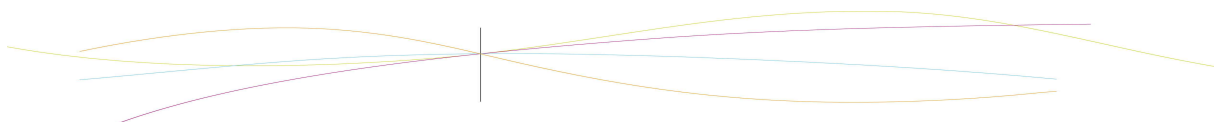


On peut noter que ce soit pour la maison nue ou avec des isolants, la température présente une évolution logarithmique au cours du temps.

Nous avons voulu vérifier cette hypothèse en appliquant à chaque courbe une régression logarithmique, ce qui nous a permis d'obtenir l'équation temporelle de la température et le coefficient R pour chaque courbe de tendance. Ainsi on constate que pour chaque courbe, R est proche de 1 :

$$R_{\text{maison nue}} = 0.998 \quad R_{\text{laine de verre}} = 0.997 \quad R_{\text{laine de roche}} = 0.996$$

Le modèle logarithmique est donc celui qui semble se rapprocher au mieux de la réalité.



Calculons rapidement la variation de la température de la maison en fonction de son isolant :

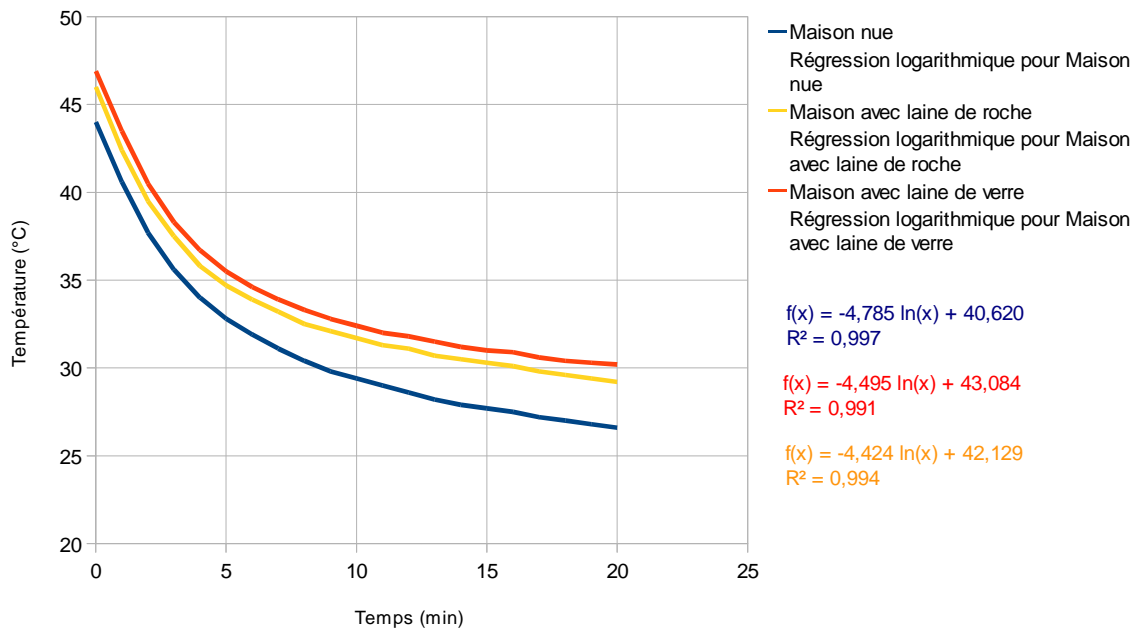
- Maison nue : $\Delta T = 44 - 22.3 = 21.7^\circ\text{C}$
- Laine de verre : $\Delta T = 47.4 - 22.5 = 24.9^\circ\text{C}$
- Laine de roche : $\Delta T = 46 - 22 = 24^\circ\text{C}$

La laine de verre semble être l'isolant le plus efficace pour cette expérience.

En ce qui concerne le refroidissement, on obtient également une décroissance logarithmique pour chaque courbe.

Température en fonction du temps

Evolution après avoir éteint la lampe

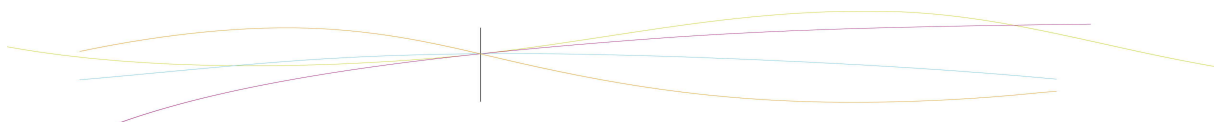


Là encore les coefficients R sont assez satisfaisants pour déduire que la température suit une loi logarithmique.

Calculons rapidement la variation de la température pour chaque isolant :

- Maison nue : $\Delta T = |22.3 - 44| = 17.4^\circ\text{C}$
- Laine de verre : $\Delta T = |30.2 - 46.9| = 16.7^\circ\text{C}$
- Laine de roche : $\Delta T = |29.2 - 46| = 16.8^\circ\text{C}$

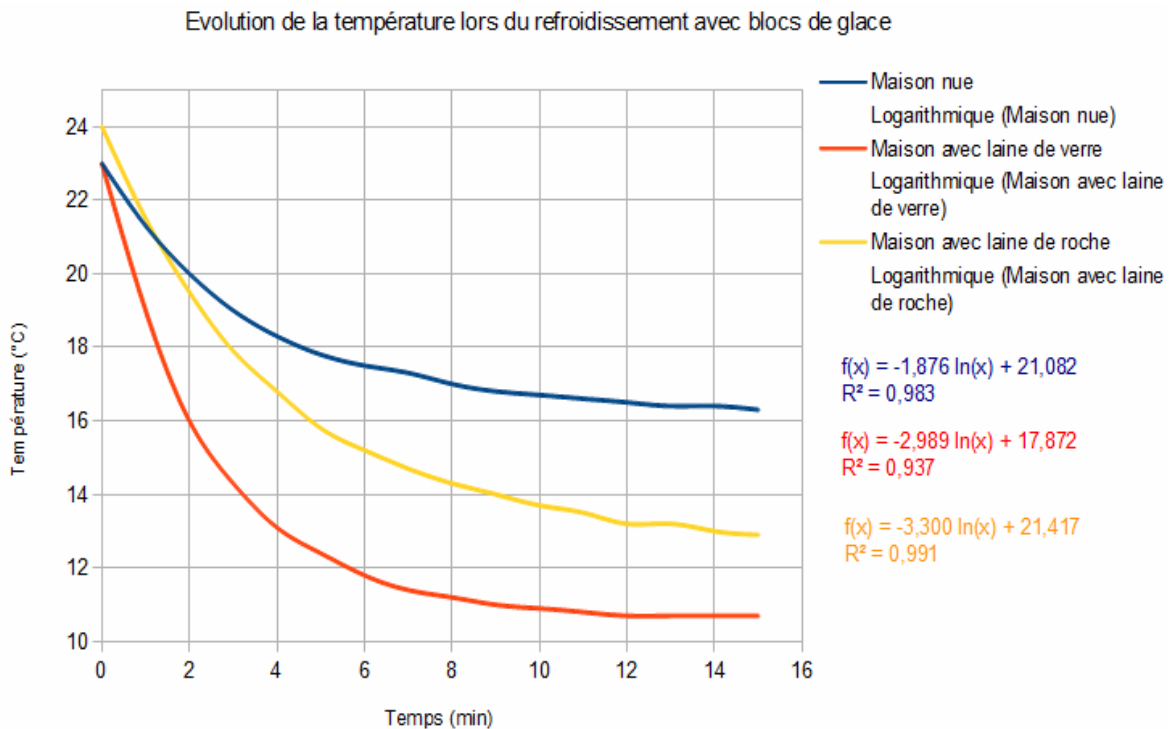
Ici, la laine de verre et de roche semblent être aussi efficaces pour conserver la chaleur.



3.3.3.3.2. Echanges thermiques extérieur → intérieur

A l'inverse de précédemment, le but de cette expérience est de mettre en évidence les échanges thermiques de l'extérieur vers l'intérieur. C'est la raison pour laquelle on applique la procédure inverse : on refroidit d'abord l'intérieur de la maison avec des blocs de glace disposés à l'intérieur, puis on observe le réchauffement qui s'opère, car c'est l'air extérieur plus chaud qui fait remonter la température dans la maison. Nous avons donc procédé à des mesures similaires que précédemment pour la descente et la montée en température avec la même série de matériaux isolants.

Voici les courbes obtenues grâce à cette expérience.



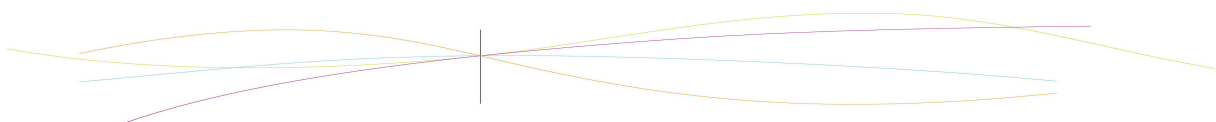
Comme on peut le voir sur ce graphique, les différents refroidissements suivent tous une loi logarithmique au vue des valeurs du coefficient de corrélation R² très proches de 1. On peut cependant remarquer que ces valeurs ne sont pas aussi élevées que précédemment. En effet, le refroidissement avec les blocs de glace ne suit pas aussi bien une loi logarithmique que le refroidissement naturel, car il est altéré par le plan de travail assez chaud du laboratoire ainsi que la présence d'une ouverture dans la petite pièce.

Concernant les résultats, on observe que durant la même durée (15 minutes), la maison isolée avec la laine de verre est la plus facile à refroidir en passant de 23°C à 11°C. A l'inverse, la maison nue a du mal à se refroidir dû aux nombreuses échappées d'air engendrées par la non isolation des parois.

Dans ce cas, la variation de température s'élève à :

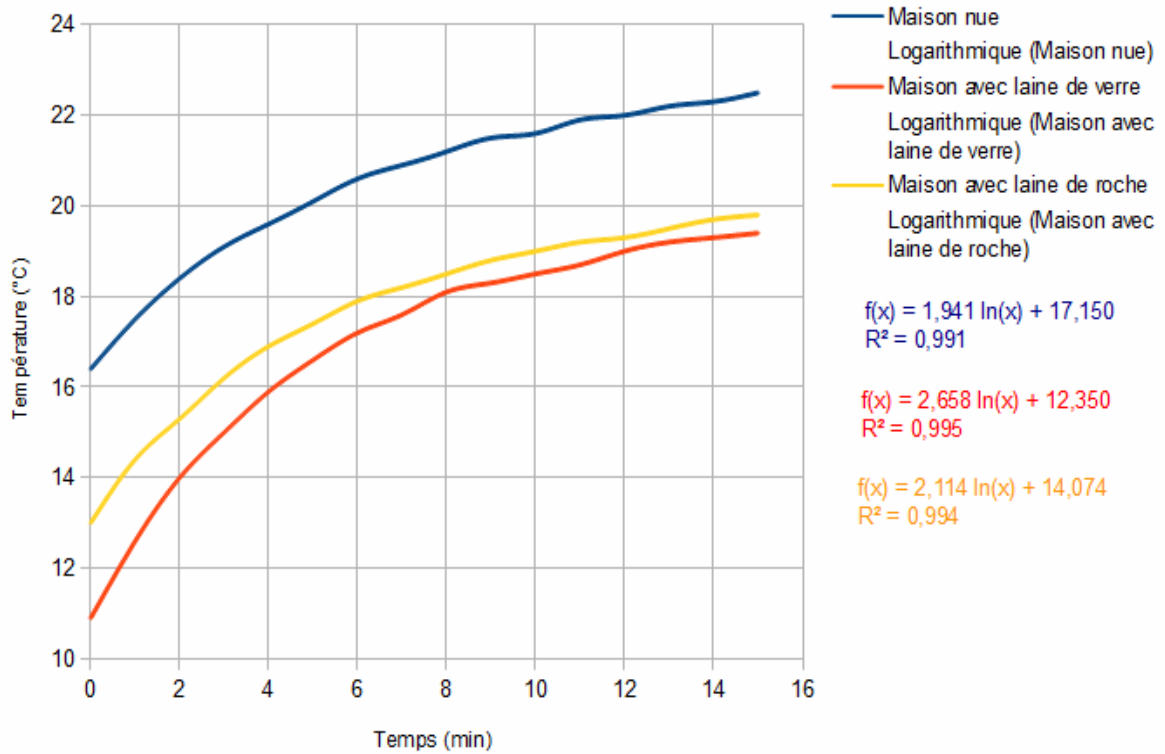
- Maison nue : $\Delta T = |23 - 16.3| = 6.7^\circ\text{C}$
- Laine de verre : $\Delta T = |23 - 10.7| = 12.3^\circ\text{C}$
- Laine de roche : $\Delta T = |24 - 12.9| = 11.1^\circ\text{C}$

A première vue, il semble donc que la laine de verre est l'isolant qui empêche le plus le réchauffement de la maison par l'extérieur, c'est-à-dire les échanges thermiques de l'extérieur vers l'intérieur.



Après avoir enlevé les blocs de glace et mesuré le réchauffement de la pièce, on obtient les résultats suivants :

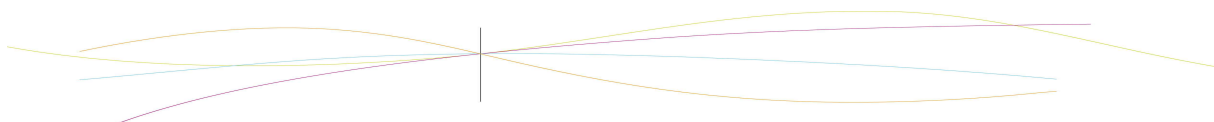
Evolution de la température lors du réchauffement sans bloc de glace



Du point de vue de la croissance, les observations sont similaires au réchauffement avec l'ampoule : on assiste à une progression logarithmique. Etant donné que la température initiale varie en fonction des différents isolants, il est d'autant plus intéressant d'analyser les variations de température :

- Maison nue : $\Delta T = |16.4 - 22.5| = 6.1^\circ\text{C}$
- Laine de verre : $\Delta T = |10.9 - 19.4| = 8.5^\circ\text{C}$
- Laine de roche : $\Delta T = |13 - 19.8| = 6.8^\circ\text{C}$

La laine de verre comporte la plus grande variation de température en 15 minutes, et on remarque également que le coefficient directeur de sa loi est le plus élevé. Cela montre bien que la laine de verre a conservé la fraîcheur plus longtemps que les autres et qu'il nécessite plus de chaleur que les autres pour s'approcher de nouveau de la température ambiante.



3.3.4. Exploitation des résultats

A partir des résultats expérimentaux, nous allons mener une étude conductimétrique afin d'évaluer les déperditions de chaleur de la maison, au travers de différentes surfaces. Nous nous proposons également de retrouver expérimentalement les valeurs des conductivités thermiques des isolants utilisés.

3.3.4.1. *Etude des déperditions thermiques*

➤ Un peu de théorie

La conduction thermique est un mode de transfert de chaleur provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de matière. (définition Wikipedia).

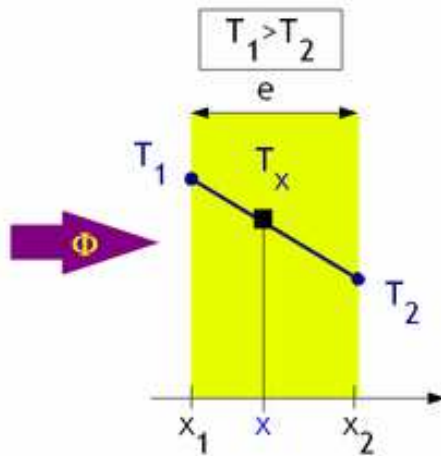
D'après la loi de Fourier, qui s'apparente à la loi de Fick concernant la diffusion de particules, la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température tel que :

$$\vec{\phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}}(T)$$

avec λ : conductivité thermique de la surface entre les deux milieux.

Cette loi explicite donc un phénomène de diffusion : la différence de température entre deux milieux provoque un flux thermique visant à combler le déséquilibre.

Dans notre étude, on considère que la paroi de notre maison (murs), s'apparente à une surface plane simple.



Soit T_1 la température d'un plan situé en x_1 et T_2 la température du plan situé en x_2 .

On note $e = x_2 - x_1$ l'épaisseur de la paroi

La densité de flux thermique surfacique s'écrit :

$$\Phi = -\lambda * (dT/dx) = (\lambda/e) * (T_1 - T_2)$$

Le flux thermique au travers d'une surface s'écrit donc :

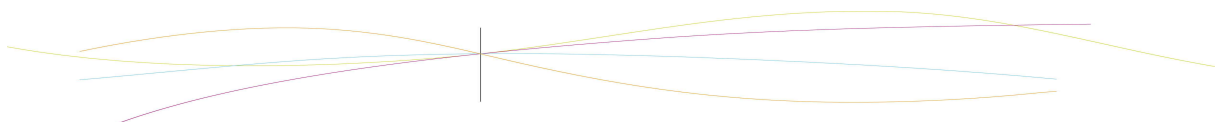
$$\Phi = \phi * S \text{ soit } \Phi = (\lambda S/e) * (T_1 - T_2)$$

On pose $R = e/(\lambda S)$ la résistance thermique surfacique de la paroi.

Dans le cas où les milieux 1 et 2 sont séparés par plusieurs matériaux de propriétés différentes, on a :

$$R_{\text{total}} = R_{\text{paroi1}} + R_{\text{paroi2}} + R_{\text{paroi3}} \dots$$

$$R_{\text{total}} = (1/S) * (e_{\text{paroi1}}/\lambda_{\text{paroi1}} + e_{\text{paroi2}}/\lambda_{\text{paroi2}} + e_{\text{paroi3}}/\lambda_{\text{paroi3}} \dots)$$



➤ Application : déperditions thermiques de la maison

▪ **Maison nue (parois en bois)**

Ici la différence de température entre les deux milieux correspond à la température initiale de la pièce après avoir éteint la lampe de 60W, soit 44°C puisque l'on veut étudier les flux thermique intérieur → extérieur, c'est à dire la chaleur dissipée vers l'extérieur.

On fixe la température ambiante à 20,5°C

Données : murs en bois épais d'1 cm, $\lambda_{\text{bois}} = 0.15$

Surface totale des murs dans la grande pièce : 3000 cm²

Surface totales des ouvertures = surface fenêtre * surface porte = 170 cm²

Surface du sol = 616 cm²

Surface toit = (largeur maison*longueur maison)/cos (inclinaison du toit) = 804 cm²

$$R_{\text{murs}} = (1/S_{\text{murs}}) * (e_{\text{bois}}/\lambda_{\text{bois}}) = 0.22 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{ouvertures}} = 3.92 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{sol}} = 1.08 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{toit}} = 0.83 \text{ K.W}^{-1}$$

$$\text{D'où } \Phi_{\text{murs}} = \Delta T/R_{\text{murs}} = (44-20,5)/0.22 = 105,7 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{ouvertures}} = \Delta T/R_{\text{ouvertures}} = (44-20,5)/3.92 = 6 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{sol}} = \Delta T/R_{\text{sol}} = (44-20,5)/1.08 = 21.8 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{toit}} = \Delta T/R_{\text{toit}} = (44-20,5)/0.83 = 28 \text{ W}$$

▪ **Maison avec laine de verre**

Données : mur en laine de verre épais de 2 cm, $\lambda_{\text{laine de verre}} = 0.04$

$$R_{\text{murs}} = (1/S_{\text{murs}}) * (e_{\text{bois}}/\lambda_{\text{bois}} + e_{\text{laine de verre}}/\lambda_{\text{laine de verre}}) = 1.89 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{ouvertures}} = 33.33 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{sol}} = 9.2 \text{ K.W}^{-1}$$

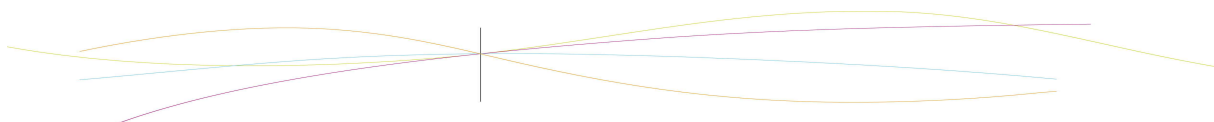
$$R_{\text{toit}} = 7.05 \text{ K.W}^{-1}$$

$$\text{D'où } \Phi_{\text{murs}} = \Delta T/R_{\text{murs}} = (46.9-20,5)/1.89 = 14 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{ouvertures}} = \Delta T/R_{\text{ouvertures}} = (46.9-20,5)/33.33 = 0.8 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{sol}} = \Delta T/R_{\text{sol}} = (46.9-20,5)/9.2 = 2.9 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{toit}} = \Delta T/R_{\text{toit}} = (46.9-20,5)/7.05 = 3.7 \text{ W}$$



▪ **Maison avec laine de roche**

Données : murs en laine de verre épais de 2 cm, $\lambda_{\text{laine de roche}} = 0.045$

$$R_{\text{murs}} = (1/S_{\text{murs}}) * (e_{\text{bois}}/\lambda_{\text{bois}} + e_{\text{laine de verre}}/\lambda_{\text{laine de verre}}) = 1.7 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{ouvertures}} = 30 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{sol}} = 8.3 \text{ K.W}^{-1}$$

$$R_{\text{toit}} = 6.36 \text{ K.W}^{-1}$$

D'où $\Phi_{\text{murs}} = \Delta T/R_{\text{murs}} = (46-20,5)/1.7 = 15 \text{ W}$

$$\Phi_{\text{ouvertures}} = \Delta T/R_{\text{ouvertures}} = (46-20,5)/30 = 0.85 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{sol}} = \Delta T/R_{\text{sol}} = (46-20,5)/8.3 = 3.1 \text{ W}$$

$$\Phi_{\text{toit}} = \Delta T/R_{\text{toit}} = (46-20,5)/6.36 = 4 \text{ W}$$

Bilan : pertes thermiques maison nue : 161.5 W

 pertes thermiques maison avec laine de verre : 21.4 W

 pertes thermiques maison avec laine de roche : 23 W

Il est clair que la laine de verre est l'isolant le plus performant pour cette étude. L'énorme écart par rapport à la maison nue est aussi dû à l'épaisseur de matériau utilisé, peut être trop élevée par rapport à l'épaisseur de la structure – 2 cm d'isolant pour 1 cm de bois, ce qui ne remet pas toutefois en cause l'efficacité d'une bonne isolation thermique.

3.3.4.2. Conductivité thermique des matériaux

Nous nous proposons de retrouver expérimentalement la conductivité thermique du bois, de la laine de verre et de la laine de roche.

Soit S une surface, par exemple le sol.

On sait que le flux thermique à travers S correspond au produit de la densité de flux thermique surfacique par S :

$$\Phi = \varphi * S$$

De plus on sait d'après la loi de Fourier que :

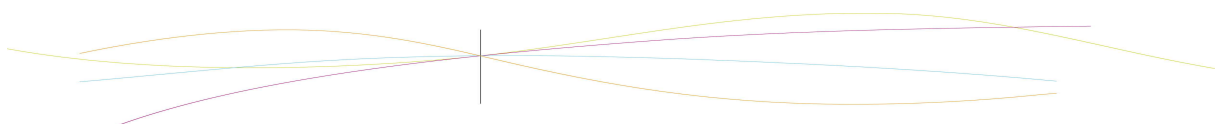
$$\varphi = \lambda * (\Delta T/e_{\text{matériau}}) \text{ d'où } \lambda = (\varphi * e_{\text{matériau}}) / \Delta T$$

A.N. $\lambda_{\text{bois}} = (\varphi_{\text{sol}} * e_{\text{bois}}) / 23.5 = 0.151$

$$\lambda_{\text{laine de verre}} = (\varphi_{\text{sol}} * e_{\text{laine de verre}}) / 26.4 = 0.036$$

$$\lambda_{\text{laine de roche}} = (\varphi_{\text{sol}} * e_{\text{laine de roche}}) / 25.5 = 0.040$$

$\lambda_{\text{bois}} \text{ théorique} = 0.15$ $\lambda_{\text{laine de verre}} \text{ théorique} = 0.040$ $\lambda_{\text{laine de roche}} \text{ théorique} = 0.045$



3.4. Etude de cas : projet de réhabilitation thermique de l'immeuble Circé

Après les aspects théoriques et expérimentaux de notre projet, nous avons voulu illustrer notre étude en nous appuyant sur un projet concret concernant l'isolation thermique dans le bâtiment. Nous avons donc recherché les différents projets locaux réalisés par l'entreprise de construction de Saint-Etienne du Rouvray : le Foyer Stéphanaï. C'est donc le projet de réhabilitation thermique de l'immeuble Circé qui a retenu notre attention, et grâce aux informations fournies par Monsieur Fabien SANCHEZ, responsable de la maintenance et du développement du patrimoine au Foyer Stéphanaï, il nous a permis d'y voir plus clair sur les questions que nous nous posons.

Quel était le but du projet ?

Tout d'abord, l'objectif est tant technique, que commercial et financier. En effet, une réhabilitation thermique a pour objectif l'amélioration de l'isolation du bâtiment, donc du confort de vie des habitants, l'optimisation des coûts de chauffage, mais cela permet également de changer l'image d'un bâtiment, d'un quartier possédant une histoire. Nous renforçons ainsi l'attractivité commerciale du produit, tout en faisant bénéficier d'un meilleur confort, à moindre frais pour le locataire. Ces gros travaux sont également l'occasion de réaliser certains travaux annexes tels que le remplacement de la porte de hall, l'installation TV collective, l'amélioration du contrôle d'accès...

Quels matériaux étaient utilisés pour isoler avant et après la réhabilitation ? Pourquoi ?

Avant la réhabilitation, l'immeuble comportait des murs en béton banchés non isolés, mais suite à ce projet, l'isolation a été faite par l'extérieur grâce à une laine de verre de 100mm d'épaisseur. En effet, l'isolation par l'extérieur est une technique limitant les ponts thermiques, et l'intervention lourde dans les logements. Le parement en panneaux composites (marques FUNDERMAX, TRESPA...) permet une meilleure protection mécanique que d'autres procédés tel que du STO (isolation extérieure en panneaux de polystyrène expansé).

Quelles techniques d'isolation ont été utilisées pour cette réhabilitation ?

Pour améliorer les performances globales du bâtiment : les menuiseries extérieures avaient déjà été remplacées il y a quelques années par du PVC double vitrage, l'étanchéité de la toiture-terrasse avait été refaite. De plus, les chauffe-eaux ont été remplacés après l'isolation extérieure.

Est-ce que l'esthétique était un critère de choix pour les matériaux isolants ?

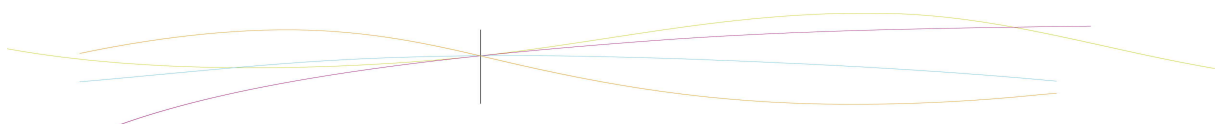
Esthétique et pérennité étaient essentielles au choix des matériaux.

Quelle est la consommation d'énergie moyenne d'un logement de la tour avant et après la réhabilitation ?

Avant la réhabilitation, le DPE (Diagnostic Performances Energétiques) était de 262 kWh/m².an ce qui correspond à une étiquette E (sur une échelle de A le plus écologique à G le plus polluant). Après les travaux, le DPE est maintenant de 111 kWh/m².an soit une étiquette énergie C.

Par qui a été financé ce projet et quel pourcentage représente la partie isolation dans l'investissement ?

Le financement du projet vient d'une part, d'un Eco-prêt (86.5%) et d'autre part, d'une subvention de la CREA (13.5%). Quant à l'isolation et le bardage extérieur, ils représentent à eux seuls 62% du coût global de l'opération.

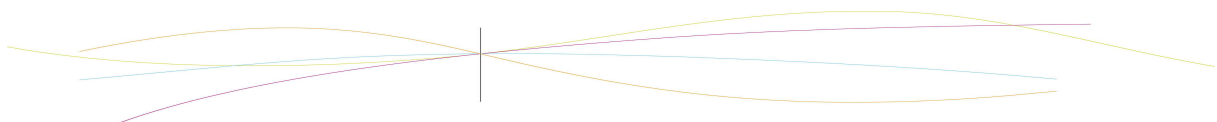


Quel est le retour sur investissement ?

Je ne pense pas pouvoir parler de retour sur investissement de manière précise, étant donné que Le Foyer Stéphanois a pris le parti de ne pas appliquer d'augmentation des loyers ou des charges après travaux. Ils s'assurent juste une optimisation de la vie du bâtiment et de sa commercialisation (moins de vacance des logements).

Quelle a été la durée et les moyens mis en oeuvre pour les travaux ?

Pour mener à bien ce projet, le Foyer Stéphanois a eu besoin de 12 mois de travaux. Durant ces travaux, une plate-forme mobile (nacelle motrice accrochée à la façade) a permis d'intervenir sur l'intégralité de la largeur de la façade. Concernant les effectifs, pas moins de 4 entreprises ont été sollicitées dans les différents domaines suivants : lots traitement de façades, charpente métallique (modification des volumes), métallerie (garde-corps), menuiserie. Pour chaque entreprise, 1 chef de chantier + 2 à 5 compagnons étaient présents. Enfin, sur le chantier, 6 à 15 salariés étaient présents suivant les phases.

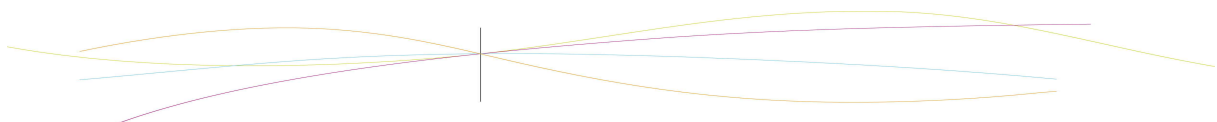


4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ainsi, durant l'intégralité de notre projet, nous nous sommes demandés comment maîtriser l'énergie dans l'habitat. En effet, les réglementations thermiques évoluent dans le sens d'une économie d'énergie toujours plus grande. Et bien que nous ayons vu qu'il existe de nombreuses méthodes, allant de la ventilation de l'air à l'infiltrométrie, pour conserver l'énergie, il nous semble que la meilleure solution en terme de coûts et d'économies d'énergie réside dans le choix d'un bon isolant dès le départ, c'est-à-dire dans les solutions « passives », car le matériau isolant a une grande importance sur les transferts thermiques. C'est d'ailleurs ce que nous avons cherché à montrer empiriquement grâce à nos expériences réalisées sur la maquette de maison revêtue de différents isolants.

Actuellement, il est clair qu'avec les progrès technologiques et scientifiques, nous possédons les moyens de maîtriser l'énergie dans l'habitat, mais désormais, il faut prendre les bonnes habitudes. A l'avenir, nous pensons donc qu'il faut mettre l'efficacité énergétique en ligne de mire dans la conception de tous les bâtiments notamment en réduisant toujours un peu plus les pertes d'énergie au niveau des endroits sensibles thermiquement comme les fenêtres ou le toit. De plus, étant dans une époque où l'énergie devient une ressource de plus en plus précieuse, il est nécessaire de faire des économies même minimales pour qu'à grande échelle, celles-ci deviennent significatives.

Par ailleurs, d'un point de vue personnel, ce projet a été une réelle découverte pour nous étant donné que nous avons très peu de connaissances sur l'isolation thermique et l'efficacité énergétique. De plus, sa réalisation fut également très agréable du fait que le sujet nous intéressait vraiment et qu'il mêlait à la fois théorie et pratique. Concernant la partie pratique, construire une maquette et mener des expériences avec celle-ci a été d'autant plus enrichissant que c'était la première fois que cette occasion se présentait à nous. Enfin, l'entente dans le groupe étant toujours présente, le travail tout au long de ce projet a toujours été efficace et nous a permis d'améliorer nos capacités à travailler en équipe. Dans le futur, nous espérons donc que des projets de ce type se présentent à nous une nouvelle fois.



5. BIBLIOGRAPHIE

➤ Livres

Alain Garnier, « Le bâtiment à énergie positive », *Eyrolles*, 2011

Dimitri Molle & Pierre-Manuel Patry, « RT 2012 et RT Existant : réglementation thermique et efficacité énergétique », *Eyrolles*, 2011.

Pascal Maes, « Labels d'efficacité énergétique », *Eyrolles*, 2010.

Zakaria Moukrite, « La réglementation thermique 2012 », *Territorial*, 2011.

➤ Sites Internet

Conseil thermique. *Réglementation thermique 2012.*

http://conseil-thermique.servhome.org/contenu/reglementation_thermique_2012.php

Developpement Durable. *L'efficacité énergétique des bâtiments.*

<http://www.developpementdurable.banquepopulaire.fr/ddfr/liblocal/docs/textes-fondamentaux/efficacite-energetique-des-batiments.pdf>

Developpement Durable. *Construction d'une maison individuelle.*

http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_plaquette_rt2012_MI_112012.pdf

Info énergie. *Un point particulier : les fenêtres.*

<http://www.info-energie-fc.org/fr/un-point-particulier-les-fenetres.html>

Isolation thermique. *Comment isoler un mur.*

<http://www.isolationthermique.fr/Comment-isoler-un-mur>

Maison Déco. *Dossier spécial portes d'entrée.*

<http://www.maison-deco.com/conseils-pratiques/amenagement/Dossier-special-portes-d-entree>

La bonne porte. *Coefficient Ud : une bonne isolation pour ma porte d'entrée.*

<http://www.la-bonne-porte.fr/coefficient-ud-une-bonne-isolation-pour-ma-porte-d%E2%80%99entree/>

Pratique. *Calfeutrer portes et fenêtres.*

<http://www.pratique.fr/calfeutrer-portes-fenetres.html>

Tout sur l'isolation. *Ponts thermiques.*

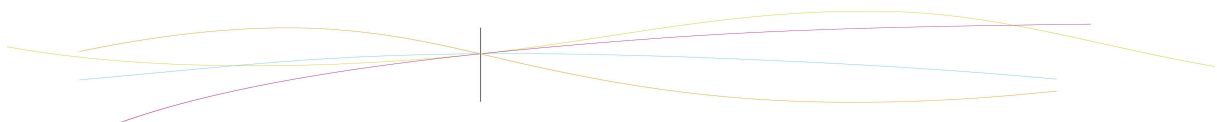
<http://www.toutsurlisolation.com/Isolation-thermique/Reussir-son-isolation-thermique/Qualite-de-mise-en-aeuvre/Les-ponts-thermiques>

Vos économies d'énergie. *Isolation des murs.*

<http://www.voseconomiesdenergie.fr/travaux/isolation/isolation-des-murs>

Wikipedia. *Réglementation thermique (France). Isolation thermique du bâtiment. Pont thermique. Conductivité thermique.*

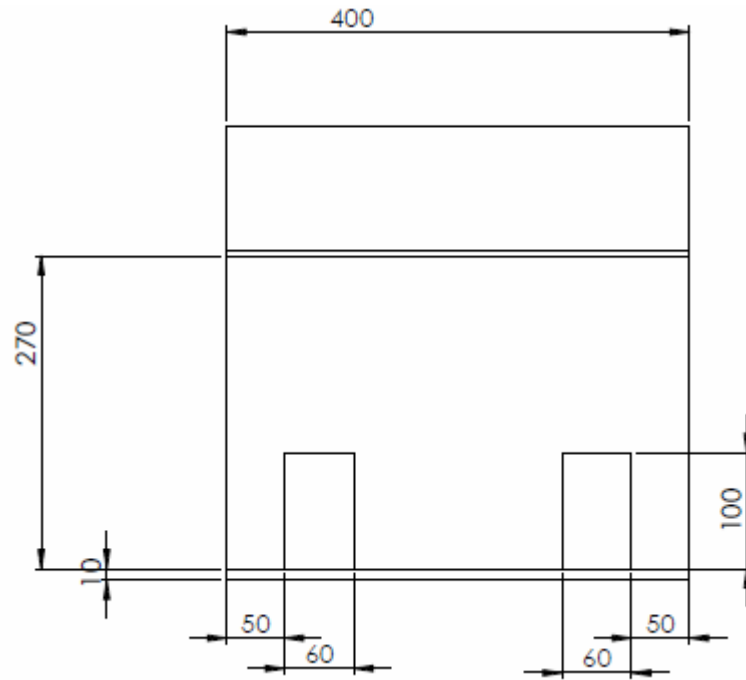
<http://fr.wikipedia.org>



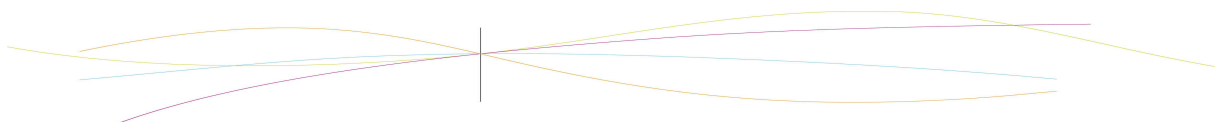
6. ANNEXES

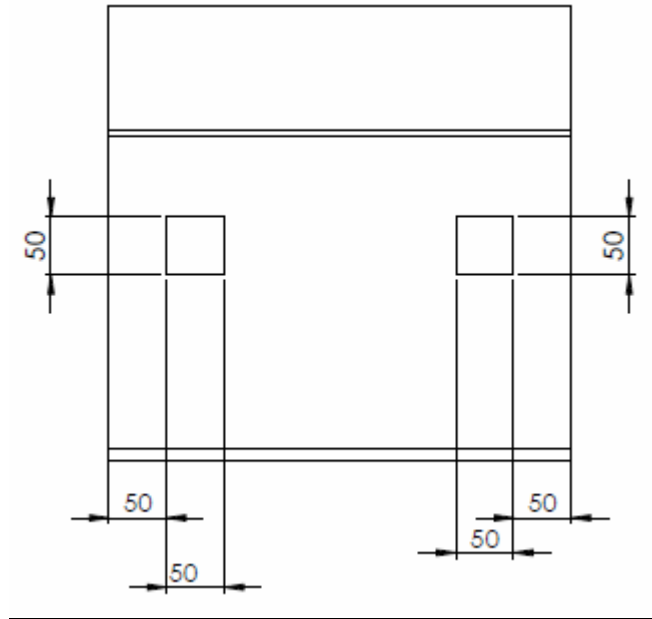
6.1. Plans de la maison (réalisés sur SolidWorks)

Les mesures sont en mm.

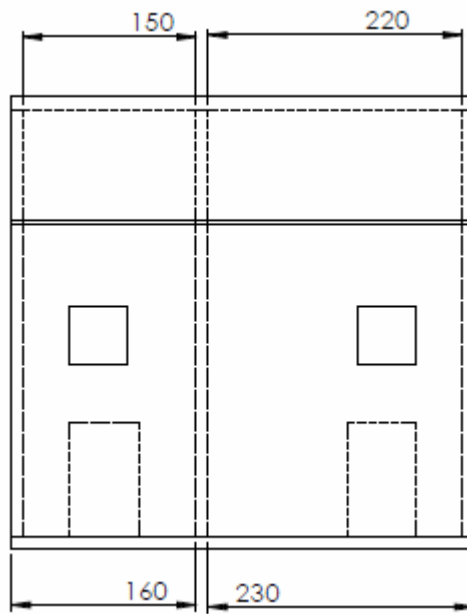


Vue de droite : structure extérieure

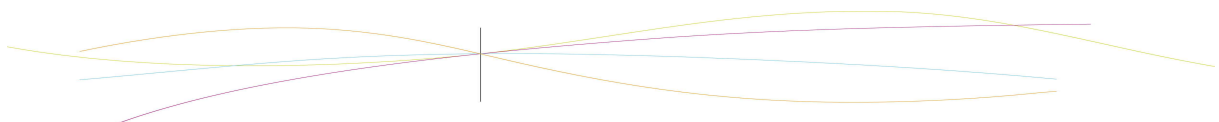


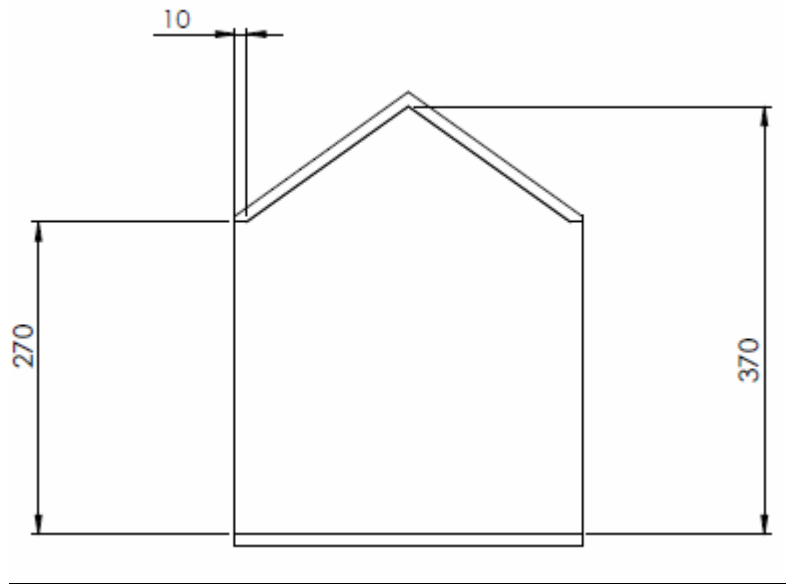


Vue de gauche : structure extérieure

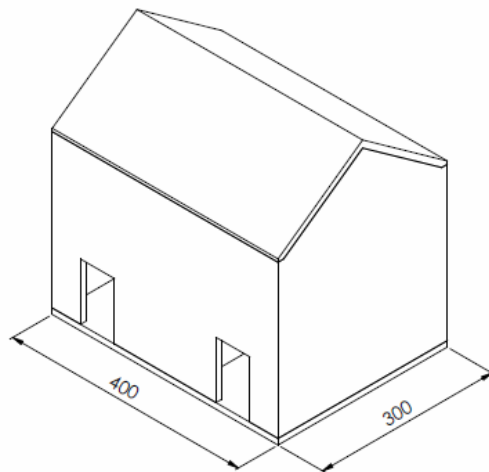


Vue de gauche : structure intérieure

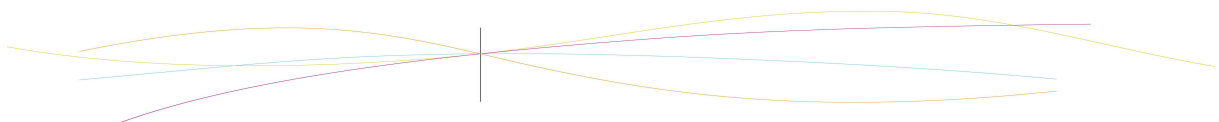




Vue de face



Vue globale de la maison



6.2. Dimension management

Comme dans tout projet mené en équipe, nous nous sommes répartis les tâches de telle sorte que le travail soit le plus efficace possible. Voici un planning résumant notre travail au cours de ce projet.

Séances de travail	Dates	Présents	Temps de travail	Avancée du projet
Séance INSA	11/02	Tout le groupe	1h30	Découverte du sujet, premières recherches et début de réflexion sur la problématique
Vacances d'hiver	16/02 au 03/03	Travail personnel	6h	Elaboration d'un plan pour le dossier puis répartition dans le groupe des parties à rédiger concernant les différentes formes d'isolation, rédaction d'un premier plan de l'étude expérimentale
Séance INSA	11/03	Tout le groupe	1h30	Mise en commun des parties rédigées, répartition des parties restantes, choix des dimensions de la maquette
Séance INSA	18/03	Tout le groupe	1h30	Modification du dessin 3D de la maquette réalisé pendant la semaine (ajout d'ouvertures + bois comme matériau utilisé)
Séance INSA	25/03	Tout le groupe	1h30	Avancement des parties du dossier
Week-end	30/03 et 31/03	Tout le groupe	6h	Réalisation de la maquette en bois
Séance INSA	08/04	Tout le groupe	1h30	Remplissage des ouvertures de la maison en carton plume, appel au Foyer Stéphanaï pour demande d'infos
Vacances de Pâques	13/04 au 28/04	Travail personnel	4h	Finition des parties descriptives du dossier, recherche d'isolants pour réaliser les expériences, envoi d'un mail au Foyer Stéphanaï
Séance INSA	29/04	Tout le groupe	1h30	Renvoi d'un mail au Foyer Stéphanaï, correction de quelques points sur le rapport
Séance INSA	06/05	Tout le groupe	1h30	Isolants trouvés pour les expériences (laine de verre + aluminium, laine de roche), demande de matériel (sonde thermique, ampoule pour chauffer) auprès des techniciens, finition de la partie étude de cas
Séance libre	16/05	Tout le groupe	3h	Expériences réalisées sur la maison sans isolant puis avec laine de verre + aluminium
Séance INSA	20/05	Tout le groupe	1h30	Décision d'aborder la partie théorique des transferts de chaleur d'un point de vue conductimétrique
Séance libre	23/05	Tout le groupe	2h	Réalisation des dernières expériences avec maison recouverte de laine de roche
Semaine du 23/05	-	Travail personnel	2h	Rédaction de la partie expérimentale avec exploitation des résultats

