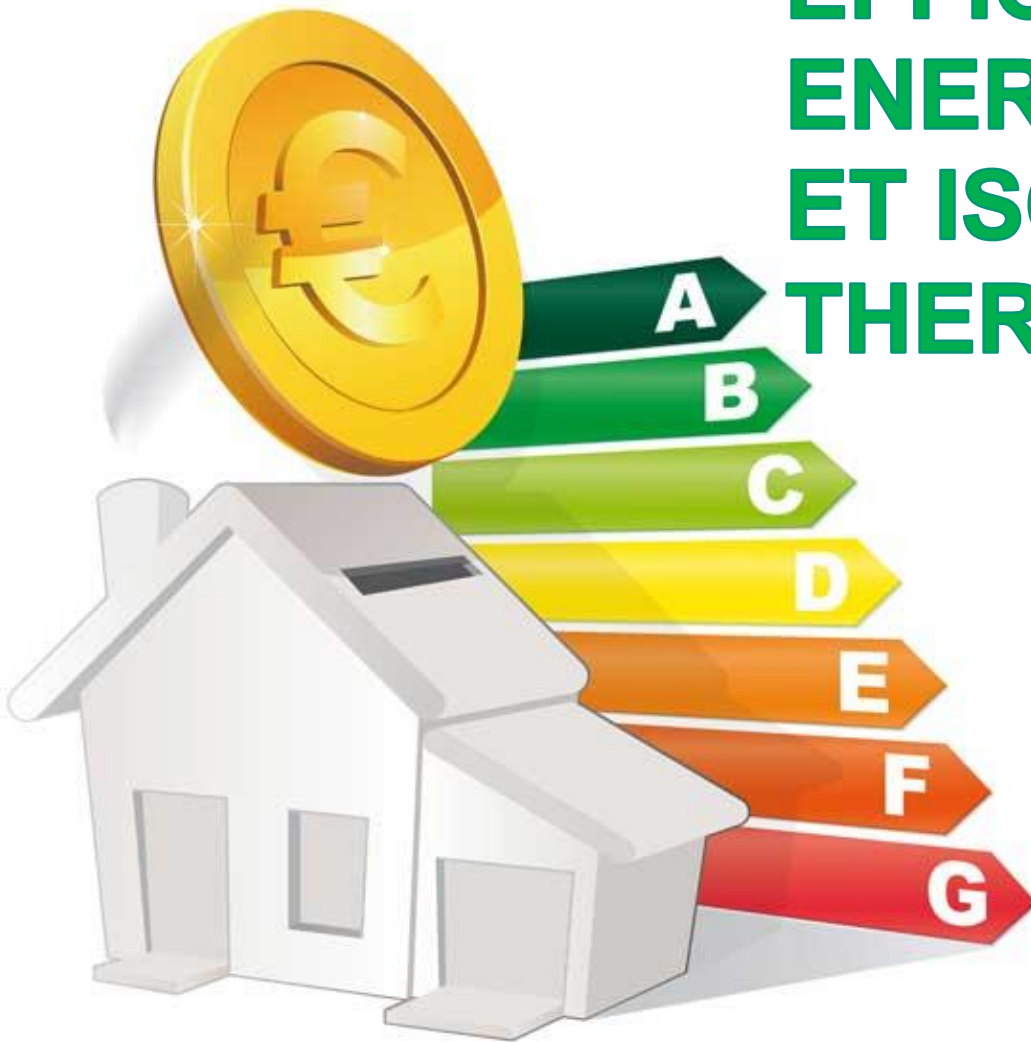


# PROJET 38 EFFICACITE ENERGETIQUE ET ISOLATION THERMIQUE



Enseignant responsable du projet :

M. Jamil ABDUL AZIZ

Caroline DELAMARE  
Arnaud LAUR  
Bertrand LEROY  
Corentin PINSARD  
Guillaume PINUS

*INSA de Rouen  
Projet de P6 N°38  
Année 2013/2014*

Date de remise du rapport : 26/05/2014

Référence du projet : STPI/P6/2014 – 38

Intitulé du projet : *Efficacité Energétique et Isolation thermique*

Type de projet : *Calculs, expériences, recherche théorique*

Objectifs du projet :

Comprendre l'isolation thermique et l'efficacité énergétique sont les enjeux principaux de ce projet. Ces deux parties s'effectueront notamment par une prise de contact avec des professionnels qui abordent ces notions au sein de leur métier. Nous trouvons également primordial d'effectuer une importante partie expérimentale pour compléter nos connaissances théoriques. Pour ce faire, nous réaliserons une maquette afin de procéder à des expériences avec différents isolants. Nous aborderons aussi la législation en vigueur au travers de la réglementation thermique et des labels pour comprendre les enjeux économiques et environnementaux que représente l'énergie du bâtiment.

Mots-clefs du projet :

- *Transferts thermiques*
- *Isolants bio-sourcés*
- *Réglementation thermique*

Avant de commencer ce rapport, nous tenons à remercier notre responsable de projet M. Abdul Aziz qui a toujours été à notre écoute et nous a conseillé pendant les séances.

L'équipe d'Info Energie, Mme Hartout et M. Le Govic qui nous ont gentiment accompagnés pendant notre projet et qui nous ont donné de bons conseils pour nos expériences et notre maquette.

Nous remercions également Benjamin Govehovitch, stagiaire chez Info Energie, qui nous a guidé pour utiliser la caméra thermique.

Finalement, M. Lecoutey, qui nous a accueilli chez lui pour nous parler de son auto-rénovation et enfin le magasin Kbane qui nous a fourni en isolants biosourcés.

<b>Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>I- Transferts thermiques et méthodes d'isolations .....</b>	<b>6</b>
1) Chaleur et modes de propagation .....	6
a) Conduction .....	6
b) Convection .....	7
c) Rayonnement.....	7
2) Notion de confort thermique .....	8
3) Isolation des parois .....	9
a) Caractéristiques des isolants .....	9
b) Conductivité thermique : définition et mesure .....	9
c) Isolation par l'intérieur ou l'extérieur ?.....	10
d) Déphasage thermique.....	13
4) Les ponts thermiques .....	14
a) Définition .....	14
b) Effets/Conséquences.....	14
c) Détection .....	14
d) Solution .....	14
5) La thermographie, un mode de detection des deperditions thermiques du batiment .....	15
<b>II- Isoler aujourd'hui : normes et enjeux environnementaux .....</b>	<b>16</b>
1) Pourquoi rénover le parc de bâtiments français ?.....	16
a) Etat du parc immobilier français .....	16
b) Nécessité écologique .....	16
c) Nécessité économique.....	17
2) La RT 2012.....	17
a) Sa définition .....	17
b) Ses exigences.....	17
c) Les labels et certifications : Un signe de qualité.....	18
d) La certification ACERMI .....	19
e) Des exigences de plus en plus exigeantes : La RT 2020 ou le BEPOS.....	19

3)	Origines et particularités des isolants .....	19
a)	Synthétiques .....	19
b)	Minéraux .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
c)	Biosourcés ou issus du recyclage .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
d)	Definitions tableau des isolants .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4)	Energie grise .....	21
<b>III- Etude expérimentale .....</b>		<b>23</b>
1)	Avancée du projet .....	23
a)	Maquette .....	23
b)	Info Energie.....	24
2)	Expériences .....	24
a)	Chauffe de la maison .....	24
b)	Refroidissement.....	26
c)	Théorie .....	26
d)	Exploitation des images thermiques .....	27
3)	Etude de cas.....	29
a)	Le projet.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
b)	Les matériaux et techniques d'isolation .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
c)	Le financement .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
d)	Le chauffage.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4)	Conseils pour les années suivantes .....	31
5)	Ce que le projet nous a apporté .....	31
<b>Conclusion .....</b>		<b>32</b>
<b>Bibliographie.....</b>		<b>33</b>
<b>Credits d'illustrations .....</b>		<b>34</b>
<b>Annexes .....</b>		<b>35</b>

Actuellement en France, le secteur du bâtiment représente 43% de l'énergie finale consommée et près d'un quart des dégagements de gaz à effet de serre, c'est pourquoi il est nécessaire d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, et de construire des logements bien plus performants afin de réduire notre impact environnemental.

Dans le cadre de la transition énergétique amorcée l'année dernière par le gouvernement, ce sont les réglementations thermiques fixées par l'État qui vont permettre cette réduction, en optimisant notamment l'isolation thermique des anciens et nouveaux bâtiments. En effet cette dernière représente une potentielle grande source d'économie d'argent et d'énergie.

Il est également dans l'intérêt du particulier de surveiller son isolation et l'efficacité énergétique de son logement, dans le but de réduire sa facture et de participer activement à la transition énergétique. Dans cet optique il est aussi nécessaire de choisir des isolants durables et biosourcés qui proviennent de sources locales.

C'est pourquoi nous avons choisi d'articuler ces notions d'efficacité énergétique et d'isolation thermique autour de la problématique suivante :

**Dans le cadre de la transition énergétique, en quoi l'isolation thermique des bâtiments joue-t-elle un rôle important et quelles sont les possibilités d'isolation durable et biosourcée?**

Dans un premier temps, nous verrons les différents types de transferts et les méthodes d'isolation qui existent aujourd'hui.

Puis nous aborderons le contexte actuel dans le secteur du bâtiment ainsi que les isolants biosourcés, une solution d'avenir pour des maisons durables et écologiques.

Enfin nous détaillerons l'étude expérimentale de notre projet, qui s'articule autour d'une maquette et de la prise de contact avec des professionnels ainsi que d'une étude de cas.

## 1) CHALEUR ET MODES DE PROPAGATION

La chaleur est une notion très vague et fortement vulgarisée aujourd'hui. Souvent confondue avec la température, elle a cependant un sens physique bien différent puisqu'elle est définie comme un transfert thermique souvent noté  $Q$  ou  $\Phi$ . La chaleur est en réalité une énergie liée à la propagation de l'agitation microscopique grâce aux chocs intermoléculaires. La température, quant à elle, peut être vue comme une fonction d'état qui mesure l'intensité de cette agitation moléculaire. Selon la théorie de la cinétique des gaz, elle représente la moyenne de la vitesse d'agitation d'un milieu ou d'un corps et est notée  $T$ . C'est une grandeur intensive.

Chaleur et température sont donc bien deux concepts différents mais que l'on peut lier grâce aux deux premiers principes de la thermodynamique. A une même température, la chaleur ressentie peut être bien différente selon que l'on se trouve par exemple dans l'eau ou en plein soleil. La chaleur transmise est donc fonction du milieu ambiant. C'est également sa capacité à pouvoir élever la température, tout comme le fait le travail qui lui a valu sa dimension d'énergie. On la quantifie donc en Joules ou en calories. Cette transmission énergétique au travers de la matière se fait suivant trois modes qui lui sont propres : la conduction, la convection et le rayonnement.

## a) Conduction

La conduction est le mode de transmission principal de l'énergie thermique. Le phénomène peut avoir lieu aussi bien au sein d'un même corps qu'entre plusieurs milieux différents et sous tous les états de la matière. On parle de chaleur « conduite » lorsque la transmission de l'agitation moléculaire se fait par contact direct pour les liquides et les gaz (chocs aléatoires des particules élémentaires) et par transmission de vibration pour les solides. Cette propagation de proche en proche peut s'expliquer par la spontanéité de la chaleur à migrer des zones chaudes vers des zones froides. Le flux de chaleur est donc colinéaire à un vecteur gradient de température, relation découverte en 1822 par Joseph Fourier :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}$$

$\varphi$  : densité de flux thermique ( en  $W.m^{-2}$  )

$\lambda$  : conductivité thermique ( en  $W.m^{-1}.K^{-1}$  ). Propre au milieu considéré.

N.B : Le signe – impose la condition que la chaleur se déplace du chaud vers le froid.

Pour obtenir le flux  $\Phi$  à travers une surface  $S$  précise il nous suffit d'intégrer :  $\Phi = \iint_S \vec{\varphi} \cdot \vec{dS}$

Ainsi, si  $\varphi$  est homogène sur  $S$ , on a  $\varphi = \frac{\Phi}{S}$ .

Voir en annexe 1 la représentation de la conduction.

## b) Convection

La convection est un transfert de chaleur provoqué par le déplacement de « paquets » de molécules au sein d'un fluide. Ces courants internes au fluide se déplacent avec leur énergie interne et en redistribuent une partie aux milieux plus pauvres (moins chauds ou moins denses) par conduction. Ces mouvements peuvent être liés aux différences de densité ou de température, on parle alors de convection naturelle. On peut également imposer ces mouvements artificiellement grâce à des machines telles que des pompes : c'est la convection forcée. Si les deux phénomènes sont de même échelle, la convection est alors dite mixte.

Le phénomène d'échange convectif entre un fluide en contact avec une paroi rigide se produit à travers une surface d'échange et peut être modélisé par la loi de Newton :

$$\varphi = h_c (T_{\text{paroi}} - T_{\text{fluide}}) \quad h_c : \text{coefficient d'échange thermique convectif (en } W.m^{-2}.K^{-1}\text{)}$$

Voir en annexe 2 la représentation de la convection.

## c) Rayonnement

A l'inverse des deux premiers modes de propagation de la chaleur, le rayonnement thermique n'est pas une interaction de contact mais plutôt une transmission à distance, c'est le seul transfert à même de se produire dans le vide. En effet, chaque corps diffuse dans toutes les directions de l'espace une partie de son énergie interne sous forme de rayonnement, c'est-à-dire un flux de photons à une certaine longueur d'onde. Cette onde électromagnétique qui se déplace à la vitesse de la lumière est partiellement absorbée par les corps environnants sous forme de chaleur. C'est de cette manière que nous recevons l'énergie solaire qui réchauffe notre atmosphère.

Le rayonnement, ou transfert radiatif, peut être quantifié par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\Phi = \varepsilon S \sigma (T_c^4 - T_m^4)$$

$\Phi$  : flux rayonné par le corps (en W)

$\varepsilon$  : émissivité du corps (sans dimension)

S : surface du corps

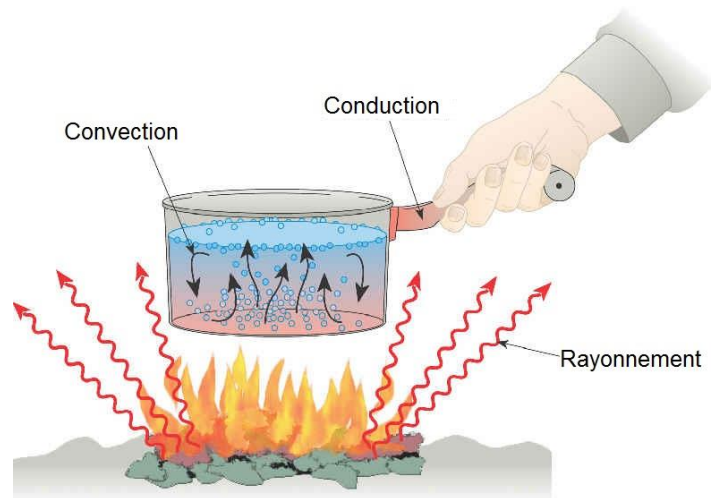
$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6703 \cdot 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ )

$T_c$  : température du corps

$T_m$  : température du milieu extérieur

N.B : l'émissivité  $\varepsilon$  est le rapport entre l'émissivité du corps considéré  $\varepsilon_c$  et celle du corps noir, un corps idéal qui absorberait tous les rayonnements électromagnétique (d'où sa couleur noire)  $\varepsilon_n = 1$ .

Illustration n°1 : Pour résumer la notion de transfert thermique





## 2) NOTION DE CONFORT THERMIQUE

L'homme a toujours voulu s'assurer un certain confort thermique. Afin de pouvoir s'isoler correctement des aléas climatiques et météorologiques extérieurs, il lui a d'abord été nécessaire de comprendre comment fonctionne la chaleur et quels sont ses modes de transmission. Le choix des bons matériaux et la bonne gestion des flux thermiques apparaît ensuite comme la caractéristique principale d'une bonne isolation thermique.

Si pendant longtemps la seule préoccupation était de pouvoir se chauffer l'hiver, il faut désormais tenir compte des saisons chaudes pendant lesquelles il faut à l'inverse évacuer le surplus de chaleur. Une bonne isolation devient d'autant plus vitale aujourd'hui avec le coût de l'énergie ainsi que les enjeux environnementaux.

Le métabolisme humain fonctionne pour maintenir sa température interne à la valeur constante de  $37^{\circ}\text{C}$ . Au cours de ce processus, le corps dégage de l'énergie sous forme de chaleur (selon les 3 modes de transmission évoqués précédemment) ainsi que par évacuation d'eau (sudation, respiration,...). En moyenne, on considère qu'un individu de taille adulte dégage une puissance thermique de 150W environ.

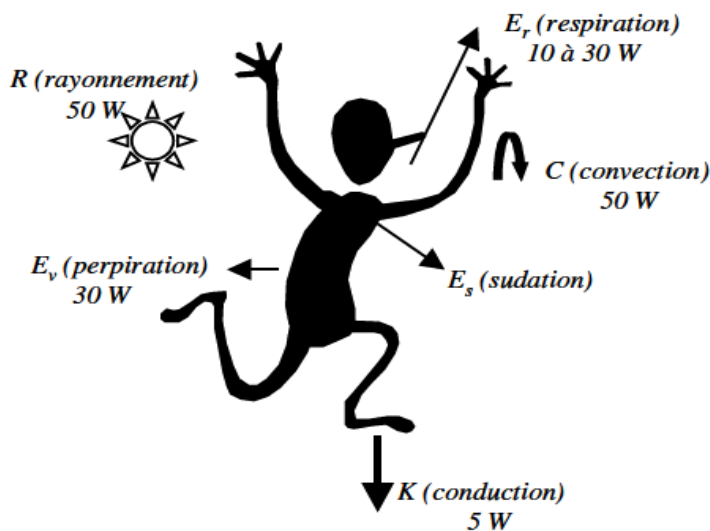


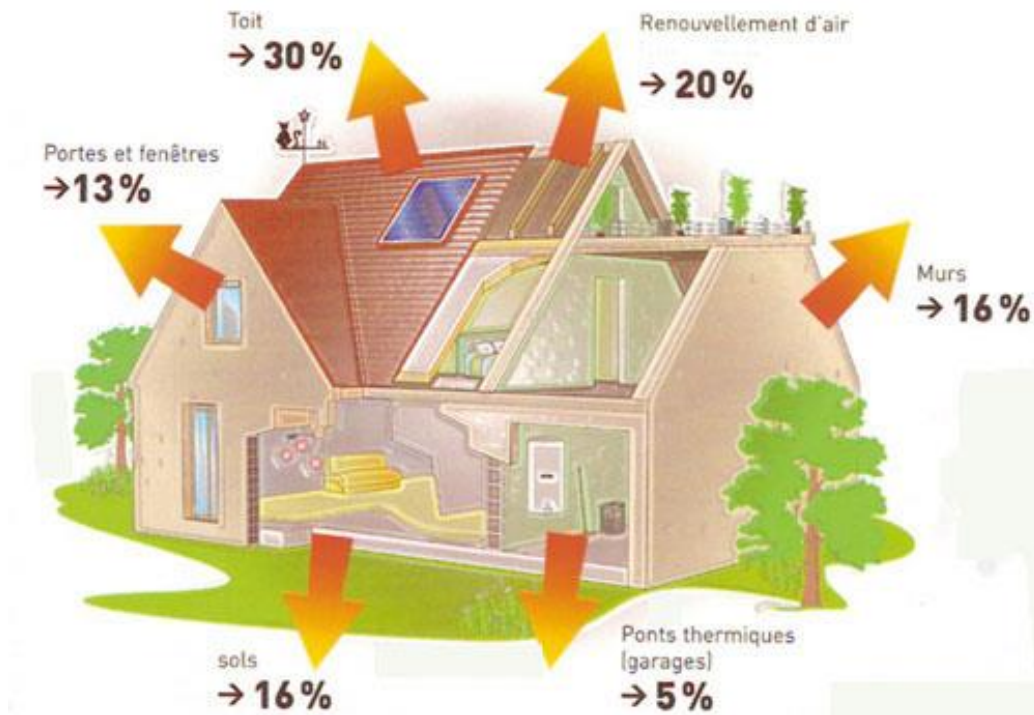
Illustration n° 2 : La puissance thermique dégagée chez l'humain

Ce que nous ressentons et qui peut nous provoquer des frissons, ou bien au contraire la sensation d'étouffer, n'est pas lié à la température mais aux flux. Nous avons la capacité de détecter et mesurer les variations de flux de chaleur extérieures ; ainsi lorsque nous touchons une pierre et qu'elle nous paraît froide, nous constatons juste un déséquilibre entre la chaleur que nous envoyons et celle que nous recevons qui est moins forte.

Le confort thermique peut donc se définir comme un ressenti, un bien-être lié aux conditions de température, de chaleur et d'humidité environnantes. Il est atteint lorsqu'il y a équilibre entre les flux extérieurs et ceux du corps. Si l'isolation est mauvaise et qu'il y a des infiltrations d'air, alors on introduit des gradients de température qui provoquent un déséquilibre de l'air ambiant et nous aurons une sensation d'inconfort. On considère qu'en hiver une température de  $20^{\circ}\text{C}$  et un taux d'humidité de 50% apportent un confort satisfaisant.

Bien s'isoler pour profiter d'un confort constant s'avère être un défi de taille car nous avons vu que la chaleur possède beaucoup de moyens de diffusion. Des déplacements (et donc des déséquilibres thermiques) peuvent ainsi apparaître très facilement.

Des études ont pu montrer que les pertes de chaleur de l'habitat vers l'extérieur se répartissent en moyenne comme ceci :



*Illustration n° 3 : Répartition des déperditions de chaleur dans l'habitat*

Il est à noter que ces pertes sont le résultat des phénomènes conductifs, mais aussi convectifs et radiatifs.

### 3) ISOLATION DES PAROIS

#### a) Caractéristiques des isolants

Les matériaux que l'on choisit pour l'isolation des parois doivent avoir des propriétés de résistance à la chaleur, ils doivent pouvoir empêcher sa propagation. Pour cela, on classe les isolants selon leur résistance thermique :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda}$$

e : épaisseur d'isolant (en m)     $\lambda$  : conductivité thermique

Ainsi, la capacité d'isolation est inversement proportionnelle à la conductivité. Pour deux valeurs de  $\lambda$ , on obtient la même résistance thermique en faisant varier l'épaisseur. On optimise donc la résistance à la chaleur en trouvant un matériau avec une conductivité très faible. En effet, pour obtenir une résistance thermique égale de  $5 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ , il faudra 16 cm de laine minérale contre 1.76m de granit !

#### b) Conductivité thermique : définition et mesure

La conductivité thermique  $\lambda$  désigne la capacité du matériau à laisser passer la chaleur (on peut la relier à la conductivité électrique). On peut montrer que c'est une fonction de la température et de la pression :  $\lambda = \lambda(T, P)$ . Cependant, à pression atmosphérique, ses variations sont peu importantes car les écarts de températures sont relativement faibles et on donne en général une valeur moyenne unique pour chaque matériau.

## Conductivité thermique à 25°C

ou coefficient de conduction thermique

Matière	Conductivité (Watts/mètre°C)
Argent	429
Cuivre	401
Or	310
Aluminium	250
Nickel	91
Fer	72
Fonte	56
Acier	46
Plomb	34
Acier inox	16
Porcelaine	6
Marbre	3
Béton plein	1.75
Terre cuite	1.15
Verre	1
Placoplatre	0.46
Bois de pin	0.14
Laine de verre	0.041
Air sec immobile	0.024

### Illustration n°4 : Les conductivités thermiques des matériaux

On considère un matériau comme étant bon isolant lorsque sa conductivité est inférieure à  $0.006 \text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ .

Traditionnellement, il existe deux grandes méthodes de mesure de cette conductivité : une par conduction directe et une par calcul de la diffusivité. La première ne permet d'obtenir des mesures valides que dans un intervalle de température allant de 2 à 300K. Au-dessus, c'est la deuxième méthode qui fournit des résultats fiables.

### c) Isolation par l'intérieur ou l'extérieur ?

Il existe deux grands modes d'isolation actuellement : on peut soit placer la couche d'isolant coté extérieur soit coté intérieur. De manière générale, on utilise plutôt l'isolation par l'extérieur en cas de rénovation quand l'ancien isolant ne joue plus son rôle. L'isolant intérieur, lui, est placé d'office en cas de construction, sauf indications contraires.

Chacune présente ses propres points forts et faiblesses en plus de participer à la baisse des échanges thermiques:

	Intérieur	Extérieur
<b>Avantages</b>	Prix Rapidité de mise en œuvre	Pas de pertes de surface Aucun pont thermique Grande liberté esthétique Protection des murs
<b>Inconvénients</b>	Réduction de la surface habitable Murs soumis aux perturbations extérieures	Prix Peu d'installateurs

L'isolant extérieur semble être plus avantageux sur plusieurs plans. Peut-on le montrer théoriquement ?

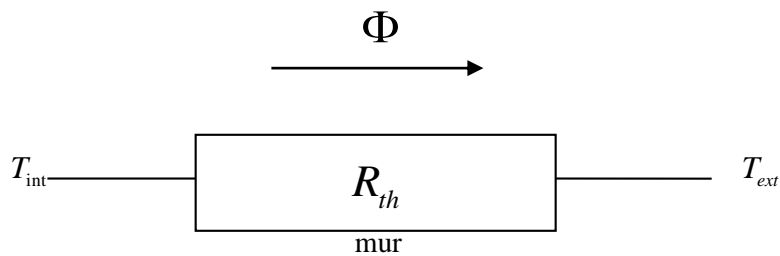
### Démonstration

On constate que les pertes thermiques évacuées par conduction à travers un mur d'épaisseur  $e$ , de surface  $S$  et de conductivité  $\lambda_1$  valent :  $\phi = \frac{\lambda_1 S}{e} (T_1 - T_2)$  en W.

### Analogie électrique

On constate que l'on obtient toujours un flux proportionnel à la différence entre température interne et externe :  $(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}) = \alpha \Phi$ .

On considère alors que le coefficient de proportionnalité  $\alpha$  est assimilable à une résistance thermique  $R_h$ , qui quantifie la capacité du système à laisser passer ou non la chaleur. Son expression dépend de la géométrie considérée.

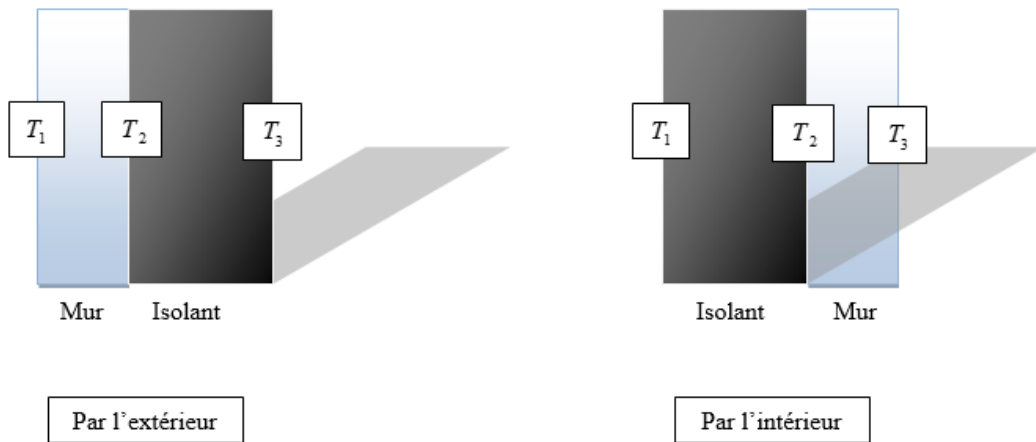


Le flux correspond dans ce cas à l'intensité et la différence de température à une différence de potentiel, c'est-à-dire une tension.

Exemples : paroi adiabatique :  $R_{th} = 0$

Paroi diatherme :  $R_{th} = \infty$

On peut donc utiliser les lois de Kirchhoff pour les transferts thermiques au même titre qu'en électricité : addition des résistances en série et de leur inverse en parallèle.



*Illustration n°5 : Représentation isolation intérieur/extérieur*

Pour notre exemple, nous avons donc :

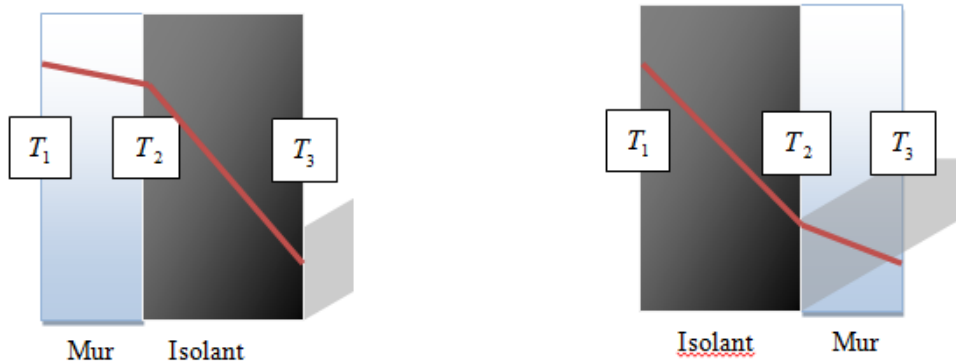
$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{ext} = \left( \frac{1}{R_{mur}} + \frac{1}{R_{isolant}} \right) (T_1 - T_3) \quad \text{où } R_i = \frac{e_i}{\lambda_i S_i} \\ \phi_{int} = \left( \frac{1}{R_{isolant}} + \frac{1}{R_{mur}} \right) (T_1 - T_3) \end{array} \right.$$

Comme l'addition est commutative, les flux sont dans les deux cas égaux : la puissance thermique traversant le mur est donc la même. La différence repose en fait dans le profil de température, c'est-à-dire son évolution en fonction de la position.

Pour cela, on calcule,  $T_2$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{2ext} = T_1 - \frac{e_{mur}}{\lambda_{mur} S} \phi \\ T_{2int} = T_1 - \frac{e_{isolant}}{\lambda_{isolant} S} \phi < T_{2ext} \quad \text{car } \lambda_{isolant} \ll \lambda_{mur} \end{array} \right.$$

D'où les profils de température suivants :



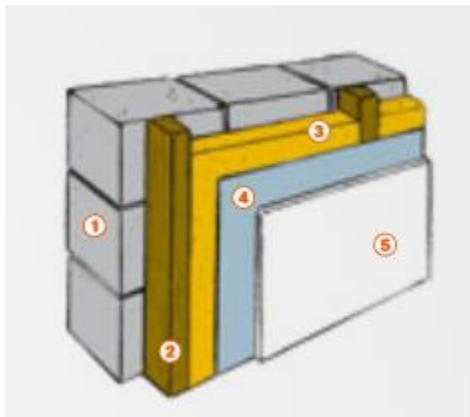
*Illustration n°6 : Profils de température pour une isolation par l'intérieur ou l'extérieur*

La chute rapide de température dans l'isolant lorsque celui-ci est placé coté intérieur est l'un des facteurs à l'origine de l'effet de « paroi froide », source d'inconfort. De plus, cette baisse peut entraîner la formation d'un point de rosée et donc d'humidité interne, ce qui diminue le pouvoir protecteur de l'isolant et risque de l'endommager.

### Mise en œuvre

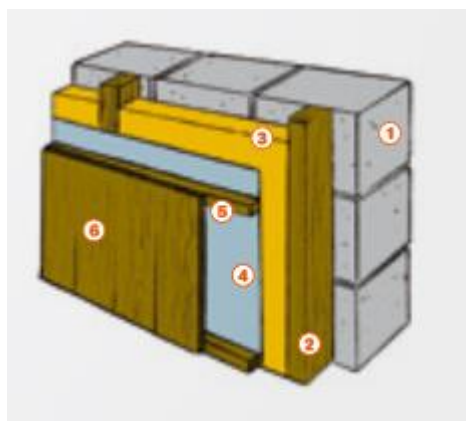
Il est primordial de créer une paroi étanche à l'air pour atteindre de bonnes performances énergétiques, c'est à dire respecter la continuité d'isolation entre les différentes parois, sans ponts thermiques, sans risques de dégradations (murs, plancher, toit) car la moindre fuite d'air peut avoir de lourdes conséquences. Il suffit donc d'installer un pare-vapeur du côté du mur chaud, qui est un régulateur d'humidité, il est plus ferme à la diffusion de la vapeur que le frein-vapeur. On peut aussi poser un pare-pluie entre l'isolant et l'extérieur qui laisse passer la vapeur d'eau mais pas les gouttes d'eau.

*Illustration n°7 : Mise en œuvre de l'isolation d'un mur par l'intérieur*



- ① Mur d'origine
- ② Montants en bois ou rails métalliques
- ③ Isolant ( $R \geq 3,7$ ) perméable à la vapeur d'eau
- ④ Film frein-vapeur ou pare-vapeur
- ⑤ Parement de finition (éventuellement sur tasseaux pour permettre le passage des gaines techniques)

Les panneaux isolants se fixent par collage directement sur le mur ou par vissage sur du bois avec création d'une lame d'air entre le mur et l'isolant. Si l'isolant est en vrac alors il est soit insufflé ou soit projeté sans parement.



① Mur d'origine ② Structure supportant l'isolant (bois ou métallique) ③ Isolant ( $R \geq 3,7$ ) étanche ou perméable à la vapeur d'eau ④ Film pare-pluie respirant ⑤ Tasseaux bois et lame d'air ⑥ Bardage

Il existe trois techniques, l'isolation par panneaux enduits, l'isolation protégée par bardage (voir illustration ci-dessus) et l'isolation par enduit isolant.

La première technique consiste à fixer au mur par collage et/ou vissage les panneaux isolants. Ils sont recouverts d'un treillis collé puis d'un enduit de finition. C'est la solution la moins chère.

La deuxième technique consiste à installer sur des montants fixés au mur des panneaux isolants. Cet ensemble est protégé par un film pare-pluie ou un panneau respirant. L'inconvénient est que les structures en bois ou métal créent des ponts thermiques auxquels il faut remédier.

La troisième technique consiste à étaler un enduit isolant minéral ou végétal projeté en une ou plusieurs couches ou coffré sur le mur à l'extérieur ainsi qu'un crépi de finition.

#### d) Déphasage thermique

Un autre point important à concevoir pour une bonne isolation des parois est la notion de déphasage thermique. Ce déphasage correspond au temps de latence entre l'instant où l'on envoie un flux à travers une paroi et l'instant où ce flux est réémis. En d'autres termes, il s'agit du temps de restitution de la chaleur par un mur. Plus le déphasage est long, et plus les échanges intérieurs/extérieurs sont retardés, cela permet d'améliorer de manière passive et gratuite son isolation. Cette durée, directement liée à la capacité thermique des parois, prend tout son sens dans une étude réalisée par l'Ecole Supérieure du Bois de Nantes sur cinq matériaux au même pouvoir isolant. Voir en annexe 3 le graphique représentatif du déphasage.

Ce graphique représente l'évolution de la température intérieure (en °C) en fonction de l'heure de la journée et de l'isolant. Il s'agit d'un jour d'été : on remarque le pic de température extérieure (courbe bleue) qui culmine à 36°C. Maintenant, il est intéressant de constater que les pics de température intérieure interviennent eux en décalé : c'est le déphasage  $\phi$ . Si l'on prend l'exemple de l'ossature bois et laine de verre, la chaleur commence vraiment à rentrer aux alentours de 13h15 alors que la température extérieure est encore très élevée. A l'inverse, pour une ossature bois et fibre de bois, le pic a lieu après 21h15, lorsque la température retombe. Un grand déphasage permet donc en été d'éviter une partie de la canicule en repoussant l'entrée de la chaleur jusqu'au soir. L'hiver, il permet de retarder la fuite de chaleur vers l'extérieur afin que la maison reste chaude plus longtemps.

Voir en annexe 4 l'isolation des vitres, du toit et du sol.

## 4) LES PONTS THERMIQUES

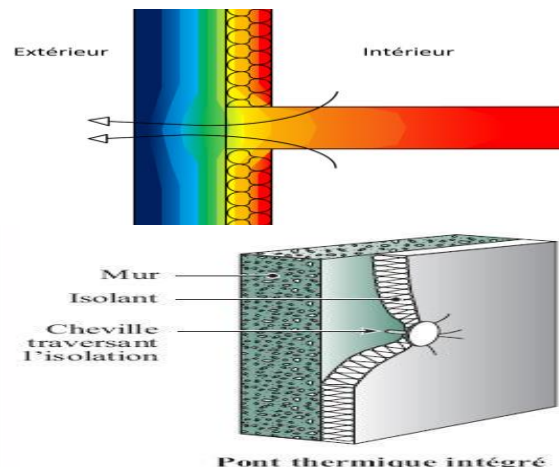
### a) Définition

Un pont thermique est une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est sensiblement réduite par une absence ou une dégradation locale de l'isolation et donne lieu à d'importantes fuites de chaleur vers l'extérieur. La notion de pont thermique est directement liée à la notion de conductivité thermique. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 degré par mètre.

Les ponts thermiques principaux se situent au niveau des jonctions façade/plancher, façade/toiture et au niveau des percements tels que les portes, les fenêtres...C'est ce qu'on appelle les ponts thermiques structuraux ou de liaison. Ils s'expriment en  $W/(m.K)$

Il existe de plus les ponts thermiques intégrés. En effet une paroi est presque toujours un assemblage de plusieurs composants par collage, vissage... Si cet assemblage est mal conçu, il existera des ponts thermiques qui seront dit intégrés à la paroi. Ils s'expriment en  $W/(m^2.K)$

Enfin il y a les ponts thermiques dits "ponctuels", ils correspondent aux déperditions à la jonction de trois parois par exemple un angle de mur. Il s'exprime en  $W/K$ .

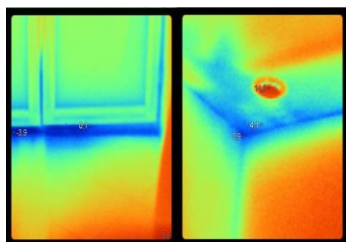


*Illustration n°9 : Représentation des ponts thermiques*

### b) Effets/Conséquences

Les ponts thermiques ont de multiples conséquences, outre le problème d'humidité et ainsi de détérioration des matériaux, ce qui est le plus préoccupant est sans aucun doute les échanges thermiques avec l'extérieur. Ces échanges thermiques sont synonymes de déperdition de chaleur et ainsi de pertes énergétiques. Evidemment l'effet inverse (en été) est aussi présent, à savoir la chaleur qui entre dans le bâtiment. Dans un bâtiment non isolé, les déperditions thermiques dues aux ponts thermiques sont plus importantes (moins de 20%) que dans un bâtiment où les parois sont fortement isolées (plus de 30%). Evidemment cela entraîne des conséquences économiques et écologiques. Enfin, le confort thermique est lui aussi affecté par ces ponts. En effet les sensations de paroi froide et de courant d'air peuvent être des conséquences des ponts thermiques.

### c) Détection



Pour diagnostiquer l'ensemble de ces ponts thermiques, le plus utile est d'utiliser la thermographie infrarouge ou caméra thermique.

Si on ne dispose pas de ce genre de matériel, les ponts thermiques peuvent être détectés par la moisissure des matériaux due à la condensation.

*Illustration n°10 : Ponts thermiques par caméra thermique*

### d) Solution

Il existe plusieurs solutions afin de limiter ce phénomène de ponts thermiques.

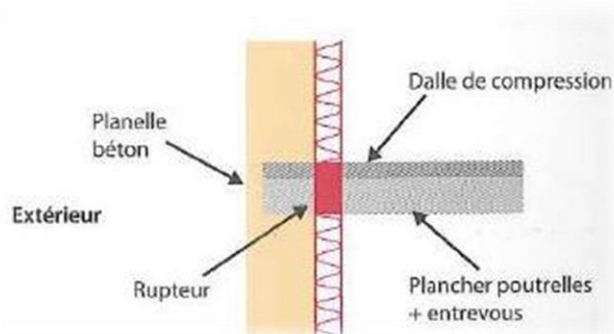
#### L'isolation thermique par l'extérieur

Cette technique est certainement la plus efficace mais c'est aussi la plus coûteuse. En effet elle est peu répandue en France à cause de son coût mais bien plus développée dans les pays du nord pour son efficacité. L'isolant extérieur crée

une véritable enveloppe sans interruption avec le plancher. Ainsi cette isolation supprime la majorité des ponts thermiques ce qui permet d'assurer un confort et une isolation thermique de qualité. Cependant ce système a quelques inconvénients tels que l'investissement, les contraintes techniques, les autorisations...

### L'utilisation de rupteurs de ponts thermiques

« Un rupteur de pont thermique est un dispositif simple positionné en bout de dalle qui permet d'avoir une isolation continue. Il est composé d'un isolant et il relie le mur extérieur au plancher grâce à des aciers de structure. »<sup>1</sup>



Le rupteur de pont thermique réduit l'échange de chaleur entre la température extérieure et intérieure. Il se positionne entre le plancher et le mur.

#### Illustration n°11 : Représentation d'un rupteur de ponts thermiques

Il existe plusieurs autres solutions spécifiques à chaque pont thermique : chape flottante, planelle isolante....

Finalement outre les pertes de chaleurs entraînant une augmentation de la facture énergétique, les ponts thermiques peuvent provoquer une multitude d'autres problèmes : moisissure, courant d'air. C'est pourquoi il est important de ne pas les sous-estimer.

## 5) LA THERMOGRAPHIE, UN MODE DE DETECTION DES DEPERDITIONS THERMIQUES DU BATIMENT

« La thermographie est une technique permettant d'obtenir une image thermique d'une scène par analyse des infrarouges. L'image obtenue est appelée « thermogramme ». »<sup>2</sup>

Cette méthode est surtout utilisée en surveillance industrielle pour repérer des pannes. Par exemple, un mauvais contact ou un début de court-circuit dans une installation électrique produit un échauffement anormal aussitôt repéré.

La thermographie est couramment employée pour le bâtiment par thermographie aérienne pour étudier les déperditions thermiques des constructions. Elle permet de mettre en évidence les déperditions des bâtiments grâce à un thermogramme et à une échelle de couleurs, avec lesquels on peut produire des cartes.

En 2008, la CREA (Communauté d'agglomération Rouen Elbeuf Austreberthe) a lancé une campagne de thermographie aérienne. Ce projet a permis de sensibiliser les habitants de la CREA aux enjeux environnementaux en leur offrant un visuel de la thermographie de leur maison.

Un avion équipé d'une caméra thermique a survolé la région rouennaise entre février et avril 2008 pour enregistrer les données thermiques.

Voir en annexe 5 un aperçu du centre-ville de Rouen avec en rouge la gare de Rouen.

La thermographie aérienne permet de mesurer la température qui se dégage des toitures. C'est un très bon indicateur puisque les déperditions thermiques par le toit représentent entre 25% et 30% des déperditions totales d'un bâtiment. Cela permet donc aussi d'évaluer la qualité de son isolation et ainsi de savoir si rénover sa maison est un bon investissement.

<sup>1</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pont\\_thermique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_thermique)

<sup>2</sup> <http://fr.wikipedia.org/wiki/Thermographie>

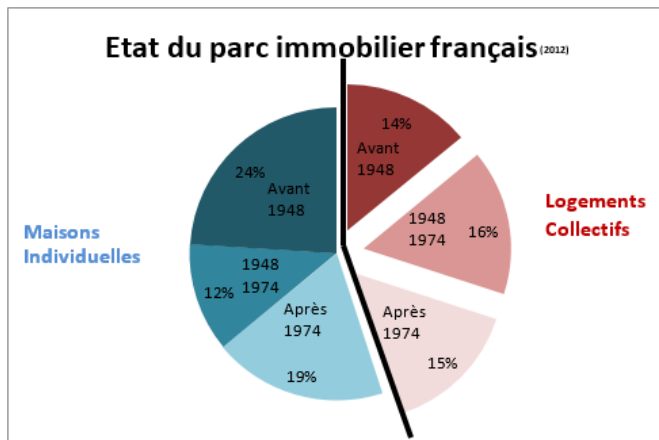


### 1) POURQUOI RENOVER LE PARC DE BATIMENTS FRANÇAIS ?

#### a) Etat du parc immobilier français

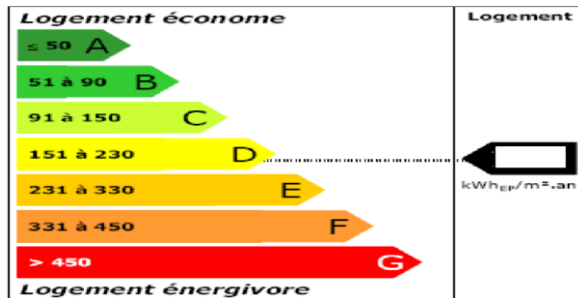
Dans tous les pays développés et plus précisément en France, le secteur du bâtiment représente une part importante de la consommation d'énergie et de l'émission de gaz à effet de serre. Par exemple, en France il représente la moitié de la consommation nationale d'énergie et près d'un quart de l'émission de GES. Faisons une analyse un peu plus détaillée de la situation actuelle du parc immobilier français. La grande majorité des logements ont été construits avant 1974 du fait de la nécessité de reconstruire rapidement après la guerre.

*Illustration n°12 : les périodes de construction du parc immobilier français*



Il y a donc 66% du parc immobilier français qui a été construit avant 1974. Or avant 1974 il n'y avait aucune réglementation thermique, aucune obligation d'isoler.

C'est pourquoi notre parc immobilier est très énergivore. Une échelle de la consommation énergétique a été créée : l'étiquette énergétique, et d'après une étude menée en 2011 par le réseau Ex'im le logement français moyen est classé E. Or le chauffage représente 65% de la consommation énergétique de nos logements



*Illustration n°13 : L'étiquette énergétique*

Tous ces facteurs attestent donc d'une précarité énergétique de notre parc immobilier. C'est pourquoi, le secteur du bâtiment doit être la cible principale d'innovations et surtout d'économies au niveau énergétique. Ceci inclut évidemment la notion d'efficacité énergétique et d'isolation thermique. La rénovation du parc français ne doit pas être vue comme une possibilité mais comme une nécessité, un besoin. En effet, il y a 2 facteurs très importants nous obligeant à effectuer cette rénovation : d'une part un facteur écologique qui prend une place toujours plus importante dans notre société et d'autre part un facteur économique dû entre autre à une raréfaction des sources d'énergie.

#### b) Nécessité écologique

La nécessité écologique d'économie d'énergie se fait de plus en plus pressante. En effet il est clair que le réchauffement climatique se fait sentir et si l'on continue ainsi l'élévation de la température pourrait être de 5° en 2100. Cela aurait de multiples conséquences avec entre autre la fonte des glaces, une augmentation du niveau de la mer. Pour donner quelques chiffres il faudrait diviser par 5 notre production de GES en France pour avoir un équilibre en carbone, il

faudrait que la concentration en gaz carbonique soit diminuée de plus de 11% sur Terre. L'Etat français essaie d'appliquer certaines mesures afin de réduire notre consommation énergétique. En effet, il met en œuvre une politique d'incitation au changement « Le changement dans le logement, c'est maintenant. » a déclaré François Hollande le 21 mars 2013. Cela se traduit avec des aides, des subventions aux personnes effectuant une rénovation thermique avec une prime pouvant atteindre 1350 euros. Cependant cette aide ne peut toucher que 65% des français du fait de certaines conditions sur les revenus. L'Etat devra donc dans les prochaines années accélérer la lutte contre le changement climatique et ce le plus rapidement possible. Ainsi le secteur du bâtiment doit être l'objectif principal. L'Etat doit passer à une politique visant 100% des français et pourquoi ne pas imaginer une politique d'obligation du changement avec de plus amples subventions ? On peut être sûr que ce facteur écologique prendra une place toujours plus importante dans la politique des prochaines années.

### c) *Nécessité économique*

Comme on le sait, les ressources en énergies fossiles se font de plus en plus faibles, l'utilisation du nucléaire est de plus en plus controversée. C'est pourquoi, dans les prochaines années l'énergie se fera de plus en plus rare à moins qu'une croissance exponentielle des énergies renouvelables se produise. Ainsi dans un futur proche l'offre énergétique sera inférieure à la demande ce qui aura de fortes conséquences. Evidemment, une hausse des prix non négligeable se produira dû à un ajustement du prix par le marché. Peut-être sommes-nous ici un peu alarmiste au vue du manque d'écho de ce sujet sur l'actualité, ou peut-être que ce n'est pas une priorité pour les français en temps de crise, mais il nous semble important de signaler que ce sujet ne doit pas être perçu comme une futile inquiétude. En effet, une véritable problématique s'affirmera très prochainement : comment les ménages pourront-ils gérer une notoire hausse des prix ? C'est pourquoi comme nous l'avons énoncé précédemment, le secteur du bâtiment doit être notre priorité.

---

## 2) LA RT 2012

### a) *Sa définition*

Ce sont les objectifs et obligations fixés par le gouvernement dans sa démarche environnementale en matière d'impact énergétique des constructions dans le bâtiment, c'est-à-dire limiter les consommations énergétiques des bâtiments ainsi que leurs émissions de gaz à effet de serre. Leur mise en œuvre est effective depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2013. La RT 2012 est beaucoup plus exigeante que ses prédécesseurs et touche plus de bâtiments.

« Elle donnera entière satisfaction si et seulement si tous les acteurs de la construction – du propriétaire aux artisans – y adhèrent pleinement. ». Pour donner satisfaction, des attestations de prise en compte des objectifs et obligations sont à remplir aussi bien par le maître d'ouvrage, que le constructeur ou architecte, ou les entreprises du bâtiment, qui se doivent de changer leurs méthodes de mise en œuvre et leurs produits si ceux-ci ne répondent pas aux exigences de la RT 2012.

### b) *Ses exigences*

Il est important de remarquer que ce n'est pas un label malgré le fait que ses exigences soient proches du label BBC-2005 et qu'elle se focalise principalement sur les logements. En effet uniquement les bâtiments neufs à usage de bureaux, d'enseignement, d'accueil de la petite enfance ou d'habitat sont concernés.

Les exigences de la RT 2012 sont :

- Une réduction des déperditions thermiques liées aux ponts thermiques. La valeur moyenne maximale du ratio de transmission thermique linéique moyen global (notée ratio phi) des ponts thermiques est fixée à  $0,28 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ SHON}_{\text{RT}} \cdot \text{K})$ .<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> SHON : Surface Hors Œuvre Nette. Pour des maisons ou des logements collectifs c'est la somme des surfaces de plancher de chaque niveau de la construction, après déduction des surfaces de locaux sans équipements de chauffage.

- Une consommation énergétique maximale de 50 kWh/ (m<sup>2</sup>.an) soit trois fois moins que la RT précédente (Classe A sur étiquette énergie).
- La production d'eau chaude sanitaire par système solaire thermique ou le raccordement à un réseau de chaleur alimenté à plus de 50 % par une énergie renouvelable ou de récupération.
- Une valeur maximale autorisée de perméabilité à l'air fixée à 0,6 m<sup>3</sup> / (h.m<sup>2</sup>) de parois déperditions hors plancher bas pour une maison individuelle soumise à une différence de pression de 4 Pascal.
- Elle prévoit aussi une surface minimale totale des baies d'un logement en fonction de la surface habitable.

Les dossiers de permis de construire devront ainsi comporter les 4 informations suivantes :

- 2 Coefficients : Bbio et  $Cep \leq Cep_{max}$  qui pour les usages en chauffage, ventilation et refroidissement.
  - $Cep \leq Cep_{max} = 12 \text{ kWh}_{EP} / (\text{m}^2.\text{an})$  (avant déduction de l'énergie produite) est la consommation conventionnelle d'énergie primaire des bâtiments pour le chauffage (auxiliaires compris), le refroidissement, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage, et la ventilation après déduction de l'énergie produite.
  - $Bbio \leq Bbio_{max}$  qui caractérise l'impact de la conception bioclimatique sur les performances énergétique du bâti. Il n'a pas d'unité (c'est un nombre de points).

Les deux coefficients évoluent avec le temps avec pour objectif de réduire la consommation énergétique des bâtiments et dépendent de la localisation et l'altitude du projet de construction.

- Tic, qui correspond à la température intérieure conventionnelle, doit être inférieur à une Tic de référence.
- La preuve de l'utilisation des énergies renouvelables.

### *c) Les labels et certifications : Un signe de qualité*

Un label certifie que les performances énergétiques globales d'un bâtiment sont supérieures à l'exigence réglementaire. Ils garantissent des logements de qualité, confortables et économes pour les particuliers. Les signes de qualité sont portés soit sur la qualité de la construction, soit sur les performances énergétiques, soit sur les qualités environnementales du bâtiment construit ou rénové. Les certifications sont délivrées par des organismes indépendants ou des initiatives volontaires privées.

Jusqu'à fin 2012 il y avait 5 niveaux de labels d'état ou publics « haute performance énergétique », qui ont été remplacé en 2013 par 2 niveaux de labels (THPE et HPE), qui sont des valeurs sûres pour le particulier. Il existe aussi des labels privés comme par exemple le label Effinergie, Passiv'Haus, Minergie ou la certification ACERMI qui ne sont pas encadrés par des dispositions réglementaires et n'ont pas l'obligation de se plier à des contrôles indépendants. Leur qualité dépend du sérieux de ceux qui les promeuvent.

Le principe de ces labels d'état est de renforcer les coefficients utilisés dans le calcul de la consommation énergétique d'un bâtiment : Bbio et Cep. Ces labels ont pour objectifs une consommation en énergie primaire de 40 kWh/ (m<sup>2</sup>.an) (50 pour la RT 2012) et un renforcement de l'étanchéité d'un bâtiment. De plus ces deux labels vont plus loin que la RT 2012 au niveau des énergies primaires car elles rendent obligatoire la mesure des consommations liées à la télévision, à l'électroménager et à l'information. En effet la RT 2012 ne prend en compte que le chauffage, la production d'eau chaude sanitaire, le refroidissement, l'éclairage et la ventilation. Ils prévoient également un affichage de la production des énergies renouvelables.

La labellisation représente une démarche volontaire qui n'est pas obligatoire lors de la construction d'une maison. Il y a de nombreux avantages à labelliser ou à certifier son logement ou bâtiment : le particulier ou les professionnels sont guidés, accompagnés lors de la conception du logement ou du bâtiment. Le bâtiment est alors plus performant et dispose de garanties qui le valorisent. Lorsque la qualité de l'ouvrage est reconnue il est possible d'obtenir des aides financières auprès de l'état ou d'autres organismes de financement.

#### d) La certification ACERMI

**CE** Nom ou marque distinctive  
Adresse déposée du fabricant  
2 derniers chiffres de l'année de l'apposition du marquage  
CE  
N° de certificat de conformité CE

Organisme notifié n°XXXX Code de désignation

Euroclasse <b>A2</b> s1 - d0	$R_D$ m <sup>2</sup> ·K/W <b>1,35</b>	$\lambda_D$ W/(m·K) <b>0,038</b>
Épaisseur mm <b>50</b>	Longueur mm <b>1200</b>	Largeur mm <b>1000</b>
m <sup>2</sup> /colis <b>3,60</b>	Pièces par colis <b>3</b>	

**NOM PRODUIT**  
N° contrôle + Usine

02/000/YY/93  
www.acermi.com

Avic Technique n° 5/00-1455

C'est une certification des isolants qui certifie la résistance thermique, la conductivité thermique, le comportement à l'eau, le comportement mécanique, la réaction au feu du matériau etc... Elle se base sur les normes européennes ou le classement ISOLE qui donne l'aptitude à l'emploi du produit (convenance du produit pour un bâtiment donné et pour son utilisation).

#### Illustration n°14 un exemple d'étiquette de matériau

#### e) Des exigences de plus en plus exigeantes : La RT 2020 ou le BEPOS

« Le BEPOS ou Bpos, bâtiment à énergie positive. C'est une construction à très basse consommation d'énergie et qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme ; le bâtiment est à énergie positive ! »

Les exigences de la RT 2020 seront:

- Une consommation de chauffage inférieure à 12 kWh<sub>EP</sub>/m<sup>2</sup>/an
- Une consommation totale d'énergie primaire chauffage, eau chaude sanitaire, éclairage, tous appareils électriques confondus soit tous usages, de 100 kWh/m<sup>2</sup>/an.
- Une production d'énergie permettant un bilan d'énergie positif sur les 5 usages. Cette production étant majoritairement selon les cas une production d'électricité photovoltaïque

« Le bâtiment à énergie positive sera obligatoire pour tous les logements neufs à partir de 2020. »<sup>4</sup>

Mais tout d'abord, les constructions neuves ou les importantes réhabilitations devront être des BEPAS, des bâtiments à énergie passive, c'est-à-dire que le besoin énergétique devra être ramené à un niveau dit passif. Il faudra utiliser toutes récupérations d'énergies, et les énergies gratuites et renouvelables en augmentant le stockage. Ce concept provient du label Passiv'Haus d'origine allemande. En France, c'est le label Effinergie qui développe le BEPOS (il fut le précurseur du bâtiment à basse consommation pendant la RT 2005).

### 3) ORIGINES ET PARTICULARITES DES ISOLANTS

#### a) Synthétiques

#### Polystyrène

Le polystyrène expansé (sous forme de billes) ou extrudé est un isolant organique obtenu à partir de dérivés du raffinage du pétrole. C'est une polymérisation qui permet de transformer le styrène en granulés de plastique polystyrène. Le polystyrène extrudé est plus compressé, donc présente une meilleure résistance à la compression que le polystyrène expansé. Il est facile à poser sous forme de panneaux rigides, de plus sa faible épaisseur le rend moins envahissant dans une pièce. Cependant cet isolant n'est pas respirant. Il est utilisé pour supprimer les ponts thermiques.

<sup>4</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A2timent\\_%C3%A0\\_%C3%A9nergie\\_positive](http://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A2timent_%C3%A0_%C3%A9nergie_positive)

### *a) Minéraux*

#### **Laine de verre et laine de Roche**

La laine de verre est fabriquée à partir de 95 % de silice (sable et verre recyclé) et la laine de roche à partir de roche volcanique. La laine de verre est constituée de fibres liées entre elles par un liant à base de formol. Ce matériau est à cellules ouvertes. Ces laines sont très efficaces pour améliorer le confort d'hiver mais pas pour le confort d'été. Ces laines sont très attractives au niveau du prix cependant leur gestion de l'humidité se dégrade avec le temps.

### *b) Biosourcés ou issus du recyclage*

Les isolants biosourcés sont des isolants issus de matières premières renouvelables d'origine végétale ou animale. Ils s'implantent progressivement sur le marché. Il n'est pas exact de les qualifier de produits naturels car ils sont transformés et contiennent parfois des produits non biosourcés. Ils ont des caractéristiques intéressantes et ont une marche de progrès importante pour le futur.

#### **Laine de lin et laine de chanvre**

Ces deux laines d'origine végétale sont fabriquées par effilochage et expansion des fibres courtes du lin et du chanvre puis traitées contre les insectes, les champignons et le feu. Ces laines sont plutôt souples et ont de bonnes propriétés isolantes. De plus elles sont souvent produites localement et présentent un faible impact environnemental.

#### **Fibre de bois**

La fibre de bois obtenue à partir de copeaux de bois et de sciures agglomérés sans additif chimique est un isolant naturel très efficace qui comme le liège vieillit très bien. Elle apporte du confort dans la pièce où elle est installée car elle régule la vapeur d'eau.

#### **Liège**

Le liège est un isolant naturel (dérivé du bois) de très bonne qualité mais qui est très cher par rapport aux autres isolants. Il ne s'abîme pas beaucoup avec le temps et il résiste à tout (rongeurs, insectes, champignons etc...), de plus il est facile à poser.

#### **Ouate de Cellulose**

L'ouate de cellulose est écologique car elle est obtenue à partir du papier recyclé. Cependant le papier peut provenir de loin donc l'empreinte écologique peut augmenter, de même, certains types d'encres contiennent des métaux lourds toxiques rendant l'isolant moins écologique. Toutefois cet isolant offre une très bonne isolation thermique et il régule la vapeur d'eau comme la fibre de bois. Il est important de noter qu'on y ajoute des adjuvants (acide borique, hydrate d'alumine, phosphate d'ammonium ou tanin fongicide <12 % poids produit) pour améliorer la réaction au feu et la réaction aux insectes, aux rongeurs et aux moisissures.

Il faut porter un masque lors de la pose de cet isolant lorsqu'il est en vrac car il est très volatile et représente un danger pour l'homme.

#### **Laine de coton ou 'Métisse'**

La 'métisse' est issue du recyclage de chutes de tissus neufs provenant de l'industrie textile ou du recyclage de vêtements usés. Ils sont effilochés et traités avant d'être transformés. Cet isolant est très polyvalent de plus il offre une très bonne régulation hygrométrique.

## Laine de mouton

La laine de mouton est facile à poser, peut absorber jusqu'au tiers de son poids en eau sans que cela nuise à ses propriétés isolantes et est difficilement inflammable (à partir de 560°). Cet isolant est très performant.

### c) Définitions tableau des isolants

Voir en annexe 6 le tableau récapitulatif des isolants

- Capacité Hygroscopique : C'est la faculté d'un matériau à absorber le surplus de vapeur d'eau quand l'air est trop humide et à le restituer lorsqu'il s'assèche.
- Classement au feu : De A (produits ne contribuant pas ou très peu au développement du feu) à F (matériaux n'ayant démontré aucune performance contre la propagation du feu)
- Déphasage : C'est la durée de passage de la chaleur ou du froid à travers une paroi extérieure, entre son absorption par la face externe et sa restitution par la face interne.
- Résistance au passage de la vapeur d'eau : C'est la capacité d'un matériau à diffuser la vapeur d'eau. Plus la résistance est grande, moins la vapeur d'eau traverse la paroi.

---

## 4) ENERGIE GRISE

Le réchauffement climatique et l'augmentation du prix de l'énergie ont amené à définir des objectifs de performance énergétique des bâtiments de plus en plus ambitieux et cela pousse à un affermissement progressif de la réglementation thermique.

Cependant, le défi de la baisse des consommations d'énergie doit aussi être mesuré sur toute la durée de vie des bâtiments, depuis leur conception jusqu'à la fin de vie. Jusque-là, ces consommations d'énergie indirectes représentaient une part insignifiante comparées à la consommation du bâtiment lui-même. Or l'arrivée de bâtiments toujours plus performants rend cette part de plus en plus importante. Pour que la démarche « bâtiment basse consommation » soit assurée, il faut suivre la méthode de type ACV (Analyse du Cycle de Vie) dans laquelle l'ensemble des impacts environnementaux est considéré pendant la durée de vie.

« L'énergie grise représente la dépense énergétique totale pour l'élaboration d'un matériau, tout au long de son cycle de vie, de son extraction à son recyclage en passant par sa transformation. C'est l'énergie qui ne se voit pas. L'énergie grise est exprimée en kilowattheure (kWh) »

- L'énergie grise représente fréquemment les deux tiers de notre consommation d'énergie globale.
- L'énergie grise s'exprime en consommation d'énergie primaire, c'est-à-dire d'énergie puisée

Elle est présente à différents niveaux :

- lors de la conception du produit ou du matériau ;
- au moment de l'extraction des matières premières ;
- au moment du transport de ces matières premières ;
- lors de la transformation des matières premières et la fabrication du produit fini ;
- au moment de la commercialisation du service ;
- à l'usage du produit ou lors de la mise en œuvre du matériau;
- au moment du recyclage

Petit exemple : Votre café du matin est truffé d'énergie grise. L'énergie nécessaire à la récolte des graines, leur torréfaction, à l'action de les moudre, à leur transport à travers le monde, leur emballage. Sans parler de l'énergie grise de la machine à café, dont chaque pièce a entraîné de nombreuses dépenses énergétiques.

De ce fait, c'est un aspect important pour choisir un isolant qu'il soit respectueux de l'environnement, en effet, un isolant a beau être d'origine naturelle, il peut avoir engendré de grandes dépenses en eau à sa fabrication par exemple (bilan eau ou empreinte hydrique). Il faut garder en tête que le secteur du bâtiment est le plus important consommateur d'énergie en France, avant le transport et l'industrie. Et il est également le second secteur émetteur de gaz à effet de serre (bilan carbone)

### Energie grise des isolants :

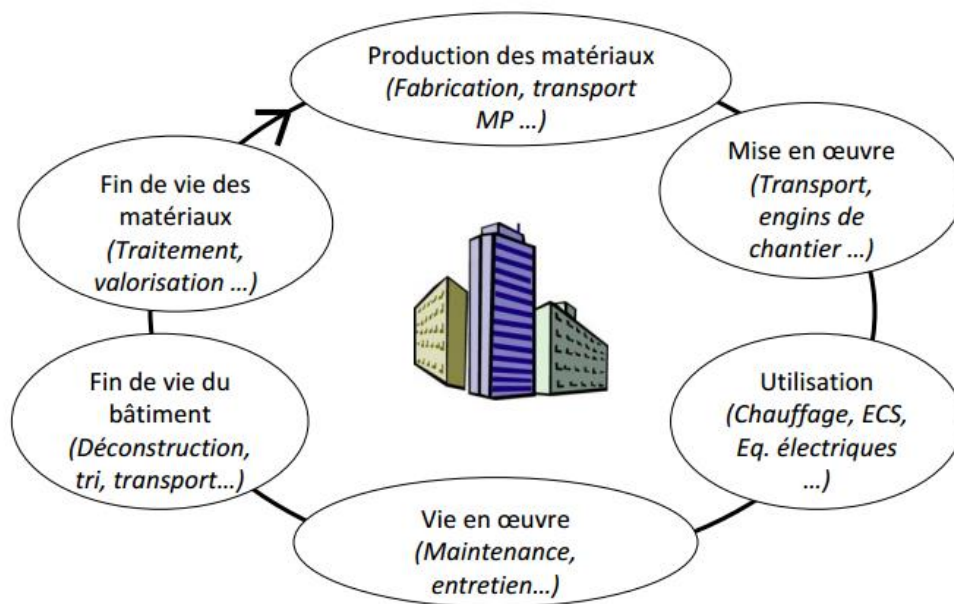
- fibres de lin 30 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- fibres de chanvre 40 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- cellulose de bois 50 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- laine de mouton 55 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- laine de roche 150 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- laine de verre 250 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- panneau de liège 450 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- polystyrène expansé 450 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- polystyrène extrudé 850 kWh/ m<sup>3</sup> ;
- panneau fibre de bois (tendre) 1 400 kWh/ m<sup>3</sup>

On observe très nettement que les isolants bio sourcés ou éco isolants sont très peu énergivores. Ce sont ces isolants que nous utiliserons lors de nos expériences.

### Au niveau du bâtiment :

Le calcul de l'énergie grise d'un bâtiment consiste à associer à chaque composant sa valeur d'énergie grise.

*Illustration n°15 : Les différents niveaux où intervient l'énergie grise dans le bâtiment*



## 1) AVANCEE DU PROJET

Lors de notre première séance, nous avons lu les projets réalisés par les élèves des années précédentes et nous avons ainsi pu commencer à cerner les points clefs de notre sujet. La rédaction du rapport a commencé dès la 2<sup>ème</sup> séance et s'est poursuivie de semaines en semaines jusqu'à la mi-mai.

a) *Maquette*

Une grande partie de ce projet est consacrée à l'étude expérimentale des différents isolants en mettant l'accent sur les nouveaux isolants écologiques. C'est pourquoi il nous a paru indispensable de construire une maquette afin de tester et de comparer les isolants recueillis.

La maquette a tout d'abord été modélisée sous SolidWorks, qui est un logiciel de conception assistée par ordinateur en 3D. En effet certains membres du groupe suivaient en parallèle un cours pour apprendre à manipuler ce logiciel. Cette modélisation nous a permis d'obtenir les dimensions précises du matériau qu'il était nécessaire d'acheter.

Voir en annexe n° 7 les captures d'écran de la modélisation

En ce qui concerne les matériaux, nous avons été confrontés à plusieurs refus de la part du service maintenance de l'INSA et du hall du département mécanique pour nous procurer du contreplaqué dans leur service. Nous avons donc procédé à l'achat du contreplaqué dans une grande surface de bricolage puis l'INSA nous a remboursé le prix du matériau.

Ensuite nous avons effectué la découpe, et l'assemblage par collage des différentes pièces de la maquette toutes constituées de contreplaqué de 1 cm d'épaisseur. Dans notre maquette, nous avons négligé les fenêtres, portes et VMC (ventilation mécanique contrôlée), ces éléments n'auraient rien apporté pour la comparaison des isolants.

Afin d'avoir la meilleure maquette possible pour nos expériences, nous avons d'abord étudié les maquettes des années précédentes. Nous en avons déduit qu'il serait plus efficace de mettre en place un système de double paroi, afin de créer un enceinte de 2cm d'épaisseur qui sera comblée d'isolant. Ce système permet un meilleur maintien de l'isolant, et a l'avantage d'être plus réaliste.

Sur les deux dernières années, les deux maquettes réalisées comportaient des toits à deux pans, mais, même si elles sont moins communes, les maisons avec des toits à un seul pan existent, c'est pourquoi nous avons pris la décision d'en réaliser une pour notre maquette.

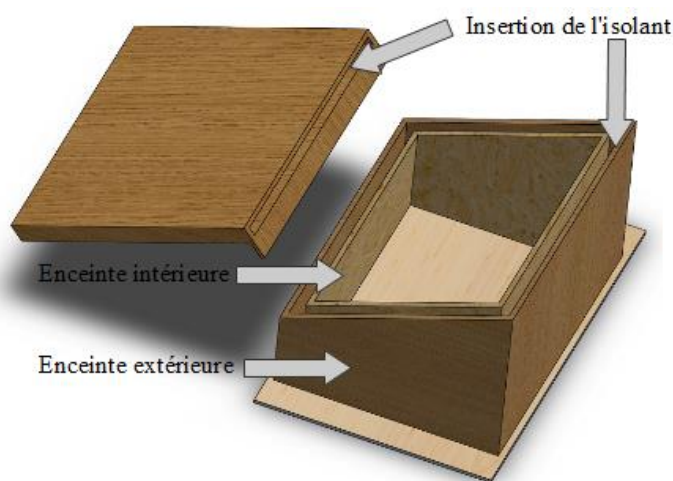


Illustration n° 16 : Représentation de la maquette et explication du système de double enceinte



Deux trous ont été percés sur le côté afin de faire passer : la sonde thermique, et le fil d'alimentation de la lampe, (et ce dans l'optique de ne pas créer de jeu où l'air pourrait s'échapper.) Leurs diamètres ont été respectés dans le but de ne pas créer de ponts thermiques.

Voir en annexe n° 8 la maquette finale.

### *b) Info Energie*

Pour nous accompagner pendant notre projet, nous avons contacté Info Energie de Rouen (Immeuble Vauban, passage de la Luciline). Notre 1<sup>er</sup> rendez-vous était le jeudi 13 mars de 14h30 à 16h, étaient présents Wesseline HARTOUT, conseillère Info Energie et Jérôme Le Govic, responsable du service énergie. Lors de cette rencontre, nous leur avons montré notre maquette à partir des dessins effectués sous Solidwork :

Ainsi, ils nous ont fait remarquer que nous ferions mieux d'augmenter l'épaisseur entre les murs (passer de 2 à 5cm) car ce sont les premiers cm les plus importants. De plus, ils nous ont conseillé d'enrichir notre réalisation de joint en silicone, et de Compriband sur les parties où le toit viendrait se poser, ce que nous avons fait dès a semaine suivante. L'équipe d'Info Energie nous a aussi donné des contacts pour trouver les isolants, c'est ainsi que nous sommes allés à Kbane pour récupérer de la Métisse et de la ouate de cellulose. Ils nous ont aussi donné des invitations pour la foire de Rouen pour parler à des professionnels du bâtiment.

Suite à ce rendez-vous, nous avons réalisé une expérience test avec 2cm d'épaisseur et les résultats ont été concluants c'est pour cela que nous avons décidé de ne pas modifier notre maquette.

Lors de notre 2<sup>ème</sup> rencontre du jeudi 15 mai de 14h à 16h, nous avons réalisé une expérience dans leurs locaux pour faire des photos avec leur caméra thermique.

Pour avoir un exemple concret, nous avons pris rendez-vous avec M.Lecoutey le 23 Avril pour étudier son auto-rénovation. (Voir étude de cas).

Voir en annexe 9 un organigramme des tâches, le travail a été réparti très équitablement.

Voir en annexe 10 les photos du rendez-vous chez Info Energie.

---

## 2) EXPERIENCES

### *a) Chauffe de la maison*

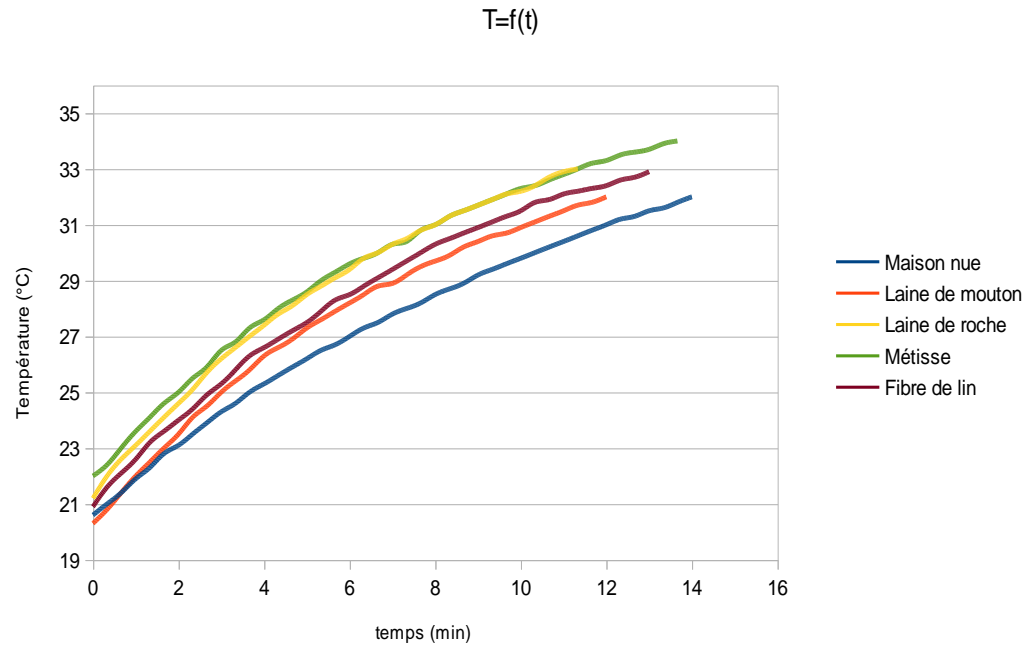
#### **Mode opératoire :**



Une lampe de 42W ainsi qu'une sonde thermique ont été introduites dans l'habitable. Notre expérience consiste à chaque fois à chauffer jusqu'à atteindre un écart de température prédéfini. Nous avons en effet trouvé cela plus approprié que le fait de chauffer une durée fixe et d'observer la température finale, comme cela a été fait dans le projet de l'an dernier. Cela correspond plus à la réalité. En hiver, nous avons convenu qu'avec une température extérieure de 0°C et pour chauffer une maison à 18°C, une différence de température d'environ 12°C semblait suffisante. Il s'agit donc de regarder le temps nécessaire pour atteindre  $T_0 + 12$  en fonction des différents isolants. A  $t=0$ , nous avons branché la lampe au secteur et démarré un chronomètre.

NB : certaines mesures ont été perturbées par des changements de température de la pièce orientée plein sud. Cela explique les variations d'ordonnées à l'origine de nos courbes, mais n'influent pas les résultats puisque seul  $\Delta T$  est considéré.

### Graphique des résultats :



On constate que les temps de chauffe de l'habitable s'étalent sur des durées comprises entre 11.33 min pour la laine de roche et 14 min pour la maison nue. Les courbes sont représentatives du phénomène de chauffage de l'enceinte et tiennent compte des pertes par conduction. A volume constant, c'est en effet la résistance thermique des isolants qui modifie les flux sortants et permet une meilleure accumulation de chaleur. Le seul paramètre variable de notre étude est donc bien l'isolant, ce qui permet une comparaison objective.

Energie totale à fournir (=puissance de la lampe x temps de chauffe) :

- Maison nue :  $E=42*(14*60)= 35.3$  kJ
- Laine de mouton :  $E=42*(12.33*60)= 31.1$  kJ
- Laine de roche :  $E= 42*(11.33*60)= 28.6$  kJ
- Métisse :  $E=42*(13.66*60)= 34.4$  kJ
- Fibre de lin :  $E=42*(13*60)= 32.8$  kJ

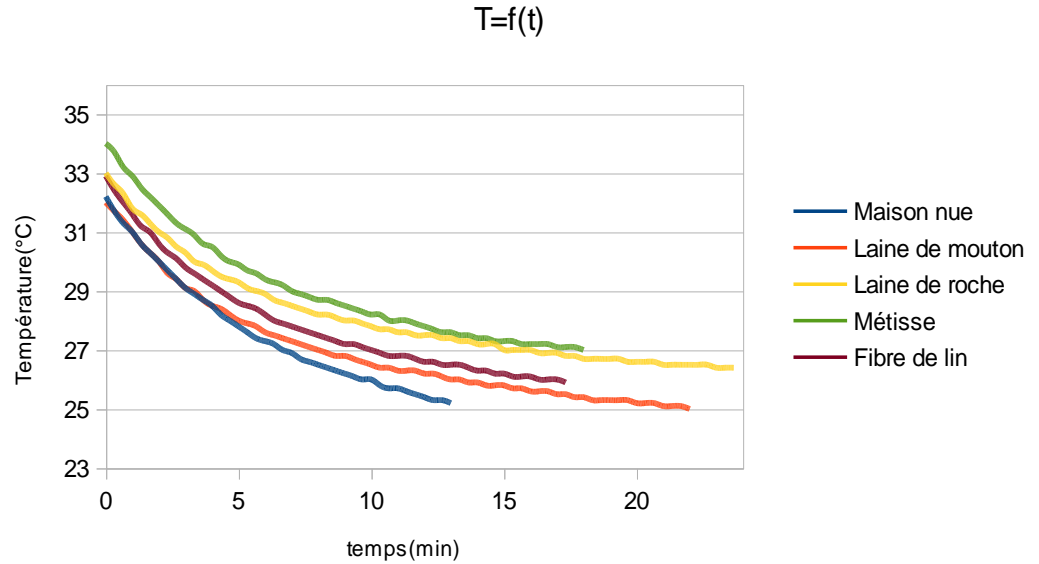
Conclusion : Nos résultats sont cohérents puisque c'est bien la maison seule qui nécessite le plus de temps pour prendre 12°C. Par ailleurs, la laine de roche permet la chauffe la plus rapide et la moins énergivore.

b) Refroidissement

**Mode opératoire :**

Lorsque la température de chauffe est atteinte, nous débranchons la lampe et relançons un chronomètre. Cette fois, nous avons préféré réduire  $\Delta T$  à 7°C car avec la chaleur emmagasinée par la maquette, il nous aurait été presque impossible de redescendre à  $T_0$ , ou alors au bout d'un temps très long.

**Graphique des résultats :**



Cette fois, les temps mesurés s'échelonnent entre 13min et 23.66 min. On constate alors que  $\Delta t_{\max, \text{refroidissement}}$  (= 10.66 min)  $\gg \Delta t_{\max, \text{chauffe}}$  (=2.66 min) malgré un  $\Delta T$  réduit. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que l'isolant ainsi que les parois ont emmagasiné de la chaleur lors de la chauffe. Cette chaleur est en effet être la première à être évacuée, et permet de garder une température ambiante élevée plus longtemps lors du refroidissement effectué juste après. De plus, leur capacité thermique élevée a aussi joué un rôle dans cette opposition aux pertes thermiques vers l'extérieur.

**Bilan des pertes :**

Lors de la chauffe, nous avons augmenté la température de 12 °C grâce à une énergie E. Pour faire redescendre de 7°C la température, il faut donc évacuer 58.3% de l'énergie apportée.

	$E_{\text{apportée}}$ (kJ)	$t_{\text{chauffe}}$ (min)	$t_{\text{refroidissement}}$ (min)	$E_{\text{perdue}}$ (kJ)	Pertes thermique (W)
Maison nue	35.3	14	13	20.6	26.4
Laine de mouton	31.1	12.33	22	18.1	13.7
Laine de roche	28.6	11.33	23.66	16.7	11.8
Métisse	34.4	13.66	18	20	18.5
Fibre de lin	32.8	13	17.33	19.1	18.4

c) Théorie

$\lambda_{\text{contreplaqué}} = 0.15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  (Voir tableau récapitulatif pour les autres  $\lambda$ )

$e_{\text{mur}} = 0.02\text{m}$  ;  $e_{\text{isolant}} = 0.02\text{m}$  ;  $S_{\text{maquette}} = 0.49\text{m}^2$

D'après la partie transfert thermique, nous avons la formule :  $\phi(R_{\text{mur}} + R_{\text{isolant}}) = \Delta T$

$$\text{Soit : } \phi \left( \frac{e_{mur}}{\lambda_{mur} S} + \frac{e_{isolant}}{\lambda_{isolant} S} \right) = 7$$

En appliquant cette formule à tous nos isolants, nous trouvons :

	Pertes thermiques théoriques (W)
Maison nue	25.7
Laine de mouton	5
Laine de roche	5.4
Métisse	5.3
Fibre de lin	5.1

Pour la maison seule, théorie et pratique se rejoignent. En ce qui concerne les écarts à propos des isolants, nous pouvons l'expliquer par la qualité moindre des matériaux que nous avons utilisés, qui n'étaient pas issus d'un traitement industriel et par les quantités faibles dont nous disposions (non-respect de la masse volumique recommandée). L'inertie thermique se définissant comme étant égale à  $\rho C$ , celle-ci n'était pas assez forte et les pertes pratiques ont alors augmenté.

#### d) *Exploitation des images thermiques*

Lors de la réunion organisée le jeudi 15 mai à 14h par Info Énergie dans leurs locaux à Rouen, nous avons eu l'occasion de manipuler et de prendre des photos avec une caméra thermique t885-2. Cette caméra est utilisée par Info Énergie dans le cadre des rénovations d'isolations qu'ils conseillent. Elle leur permet d'observer les ponts thermiques, et les points faibles de l'isolation dans le bâtiment.

En plus de pouvoir prendre des images thermiques, nous avons eu aussi l'occasion de nous familiariser avec le logiciel utilisé pour traiter les images thermiques : IRSoft.

Voir annexe n°11 une capture d'écran de l'utilisation de ce logiciel.

Ce programme permet notamment de placer des points et de connaître différentes caractéristiques pour ces points.

Pour prendre nos photos avec la caméra thermique nous avons d'abord chauffé la maquette (dont les enceintes étaient remplies de métisse) avec le même mode opératoire que celui-ci utilisé lors de nos expériences. Puis nous avons pris la maquette sous toutes ces faces pour bien comprendre et voir les déperditions qui s'effectuaient. Afin d'obtenir la meilleure image thermique possible, nous avons dû faire attention à être bien positionnée perpendiculairement à la surface que l'on visait. Mais il était aussi nécessaire de faire attention aux reflets car les vitres ainsi que les parties métalliques polies reflètent l'image thermique tel un miroir.

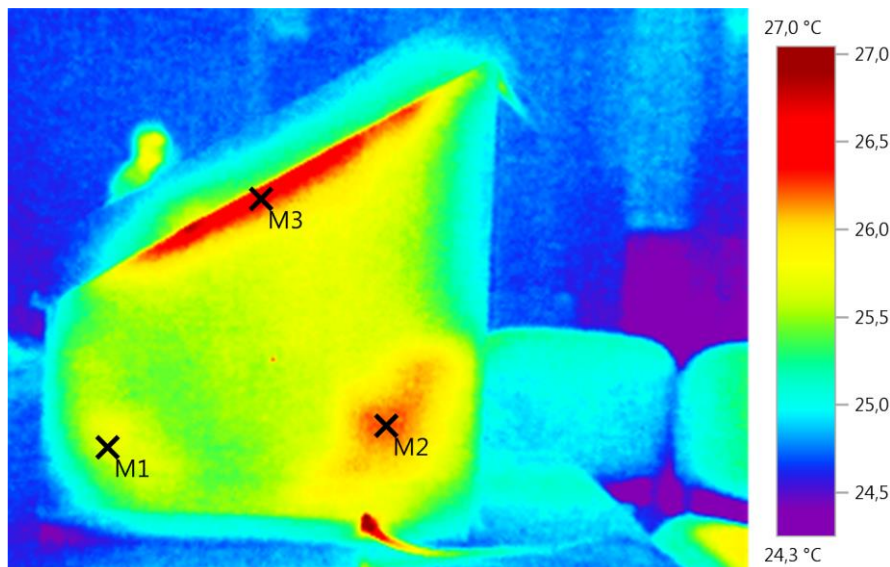


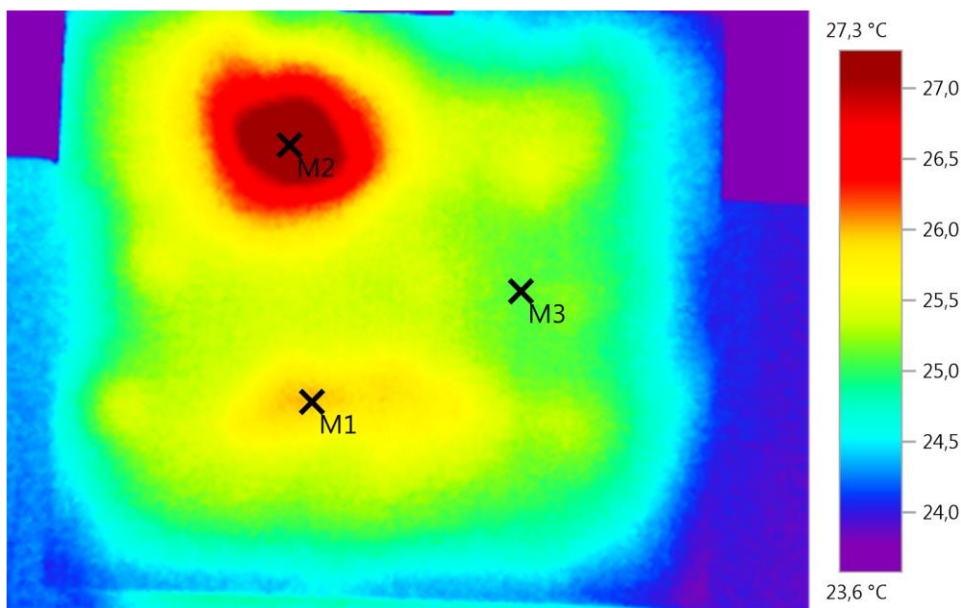
Illustration n° 17 : Imagerie thermique de la maquette vue de côté

N°	Température [°C]	Émissivité	Température réfléchie [°C]
M1	25,7	0,94	18,0
M2	26,2	0,94	18,0
M3	26,5	0,94	18,0

Sur cette image, nous avons choisi de placer trois points caractéristiques (nommés M1, M2 et M3).

A la manière d'une vraie toiture nous pouvons observer au point M3 un pont thermique linéique qui est l'une des principales pertes de chaleur au sein d'une maison. Sur le point M2 la tâche rouge correspond approximativement à l'emplacement de la lampe qui va plus chauffer la paroi qui est directement en face d'elle. Finalement le point M1 représente une irrégularité dans la pose de l'isolant, car après une baisse de température celle-ci remonte à l'endroit le plus éloigné de la lampe.

Nous pouvons remarquer un petit point rouge au milieu de notre maquette qui correspond en fait à un trou créé pour faire passer la sonde de température. Il y a également en haut à droite, le reflet thermique d'une personne dans la vitre en face. Et finalement le fil électrique (en bas) qui alimente la lampe qui chauffe beaucoup au moment de rentrer dans la maquette.



*Illustration n° 18 : Imagerie thermique de la maquette vue de dessus*

N°	Température [°C]	Émissivité	Température réfléchie [°C]
M1	26,0	0,94	18,0
M2	27,9	0,94	18,0
M3	25,1	0,94	18,0

Sur cette image thermique de la maquette vue de dessus, nous avons encore marqué trois points qui nous semblaient importants. Le point M2 représente la zone approximativement au-dessus de la lampe. C'est la zone la plus chaude ici, car c'est celle qui est le plus proche de la lampe. En ce qui concerne la surface autour du point M1, on peut y observer une discontinuité ; celle-ci est légèrement plus chaude sûrement à cause d'une irrégularité dans l'isolant. Nous remarquons l'effet inverse pour la portion autour de M3 certainement mieux répartie en isolant. Nous pouvons également constater les effets de bords tout autour de la maquette qui s'intensifient lorsque le bord est plus éloigné de la lampe.

Afin de rendre plus concret notre projet sur l'isolation thermique des bâtiments, nous avons cherché les projets locaux de rénovation, nous avons demandé aux intervenants d'Info Energie ainsi qu'à notre professeur qui avait un contact sur Sotteville-lès-Rouen. Nous avons ainsi contacté M. Lecoutey qui auto rénove et agrandit sa maison depuis déjà deux ans à Sotteville-lès-Rouen. La rencontre eut lieu le 23 avril 2014 de 12h30 à 13h30 à son domicile.

*Voir en annexe 12 les photos de l'étude de cas*

#### *a) Le projet*

M. Lecoutey a acheté sa maison en 2010, à l'époque la surface habitable de la maison était de 47 m<sup>2</sup>, c'était une vieille maison (construite en 1941), sans étage et mal isolée. Il décida en 2012 d'agrandir sa maison et de la transformer en une maison durable, donc de refaire l'isolation lui-même pour des raisons économiques, sociales et écologiques. Il décida de l'effectuer lui-même pour des raisons économique, sociale et écologique. En effet le m<sup>2</sup> revient à 300 euros (parties rénovées et neuves) pour une auto rénovation tandis que pour une rénovation faite par une entreprise, le m<sup>2</sup> revient à 1200 euros ou plus.

Cette rénovation a une dimension sociale puisque ce fut un chantier participatif auquel des entreprises locales ont participé. De plus, M. Lecoutey s'est soucié de l'environnement car il a utilisé des matériaux à faibles énergie grise (locaux et simples) et biosourcés pour la plupart. Le chantier fut également à faible nuisance sonore et la gestion de l'énergie, de l'eau, des déchets et la maintenance sont aujourd'hui facilités. Enfin le confort est amélioré car il a installé une ventilation VMC double flux, améliorant l'hygrométrie dans la maison, et le confort visuel et acoustique est devenu plus agréable.

A ce jour, il est arrivé aux finitions, la fin de la rénovation étant prévue fin 2014. Il lui reste à installer les velux à l'étage ainsi qu'une baie vitrée en bas orientée sud pour gagner en lumière et à rehausser le plancher du bas.

Il n'a pas effectué de diagnostic de performances énergétiques avant la rénovation mais il en a effectué un récemment par un bureau d'études classant sa maison en classe C à cause du chauffage électrique. A terme elle fera partie de la classe A (< 50 kWh/m<sup>2</sup>/an).

#### *b) Les matériaux et techniques d'isolation*

M. Lecoutey a utilisé un grand panel d'isolants, même du polystyrène (isolant synthétique qui présente une très bonne résistance au feu) par manque de liège, autrement, il a cherché à utiliser des isolants sains et locaux afin de réduire au maximum l'énergie grise (en limitant les intermédiaires) :

- Paille locale
- Laine de bois dans les cloisons
- Liège pour le plancher
- Laine de verre et de roche
- Laine de lin et de chanvre
- Panneaux d'ouate de cellulose

## **Structure des murs de l'agrandissement (Murs GREB):**

- L'ossature est en mélèze local (brut de sciage, sans traitement). L'intérêt du mélèze est qu'il acidifie les sols.
- Entre l'ossature se trouve de la paille en botte banchée avec un mortier à la chaux, sciure de bois et sable qui améliore l'inertie et stabilise les ballots de paille.
- Les pieds de murs sont en brique mono mur pour créer une rupture capillaire et une rupture thermique. La brique mono mur est une brique en terre cuite donc d'origine minérale qui a un très grand intérêt environnemental (faible énergie grise) (classée A1)
- Il a suivi une formation d'un weekend pour monter les murs GREB, murs qui sont faciles à monter seul.

## **Isolation des combles habitables de l'agrandissement :**

- La charpente est en sapin local (réalisée par une petite entreprise locale)
- Isolation des rampants avec des panneaux d'ouate de cellulose (intéressant pour l'inertie et la faible énergie grise)
- Membrane frein-vapeur à perméabilité variable en papier kraft (intéressant pour la faible énergie grise)
- Isolation du plancher intermédiaire en paille et en ouate de cellulose pour une bonne isolation phonique.

### *a) Le financement*

Il a obtenu 2000 euros par la région pour l'isolation des rampants puis il a financé le reste lui-même. Le cout total de la rénovation s'élève à 30 000 euros. Il aurait pu obtenir plus d'aides de la région et du département s'il avait fait rénover sa maison par une entreprise spécialisée mais ce n'était pas son but, d'autant plus que cela aurait coûté plus cher au final. Il souhaitait effectivement construire une maison durable et soucieuse de l'environnement, sans particulièrement de retour sur investissement. Mais de par sa rénovation il a considérablement réduit sa facture de chauffage et doublé sa surface habitable.

### *b) Le chauffage*

A l'origine, la maison était chauffée à l'électricité, par la suite, il a installé un poêle à bois 82 % de rendement de 4 kWh de déperditions thermiques et d'inertie de 12h qui suffira à terme à chauffer toute la maison pour réduire sa facture et rendre la maison durable. Cependant, il utilise encore aujourd'hui un peu d'électricité pour faire l'appoint.

De plus il a installé un chauffe-eau qui récupère la chaleur des eaux usées (échangeur thermique) lui permettant ainsi de réduire de moitié la consommation d'électricité pour chauffer l'eau.

Avant	Aujourd'hui	A terme
1300 euros de chauffage électrique	250 euros de bois (4 stère) 500 euros d'électrique	180 euros de bois (3 stère)

Un stère de bois (1 m<sup>3</sup> de bois pour des buches de 1 m de long) représente une énergie primaire de 1800kWh et une énergie finale de 1480 kWh.

En définitive, M. Lecoutey a trouvé la rénovation très intéressante, très enrichissante et bénéfique car il a appris beaucoup de choses et il a maintenant une maison durable et assez grande pour accueillir ses 2 enfants.

---

#### 4) CONSEILS POUR LES ANNEES SUIVANTES

Lors de la réalisation de notre projet, nous avons constaté que certains points auraient pu être améliorés, de ce fait, voilà quelques recommandations pour les années suivantes :

Tout d'abord au niveau de l'épaisseur des murs de la maquette, les résultats expérimentaux ne concordent pas réellement à la théorie (pertes thermiques). Ceci est dû en partie à la faible épaisseur d'isolants insérés, les premiers centimètres sont les plus importants donc nous pensons qu'en augmentant l'épaisseur les résultats seront plus significatifs.

Ensuite, nous conseillons à nos successeurs d'utiliser des panneaux d'isolants, il en existe de 5 cm d'épaisseur, ainsi en augmentait l'épaisseur des murs, ils rentreraient parfaitement. Vous pourrez prendre contact avec Kbane de Barentin.

On remarque aussi grâce aux photos thermiques que le chauffage grâce à une lampe 42 W placée dans la maquette n'est pas un chauffage homogène, pour une meilleure réalité, il serait donc préférable d'utiliser un chauffage homogène dans toute la pièce.

Pour simuler l'été, nous avons placé des glaçons et pains de glace dans la maquette, cependant le temps de refroidissement s'est avéré très long (20min) pour une baisse de température faible (2°C). L'équipe d'Info Energie nous a conseillé d'utiliser des glaçons d'eau salée qui seront beaucoup plus froids que des glaçons normaux. Cependant, nous n'avons pas eu le temps de refaire ces expériences.

Aussi, le toit pourrait être refait en utilisant les matériaux utilisés pour la toiture comme des tuiles et des isolants plus adaptés à la toiture. Il faudrait de plus essayer de représenter portes et fenêtres.

Enfin, nous conseillons vivement de contacter Info Energie de Rouen le plus tôt possible dans l'avancée du projet. Ils se feront un plaisir d'accueillir les prochains étudiants et de les aider.

---

#### 5) CE QUE LE PROJET NOUS A APORTE

Tout au long du projet, il a été nécessaire de s'entraider et de communiquer. En effet, le rapport étant très conséquent nous avons dû nous répartir les tâches. Comme certaines parties découlaient directement les unes des autres, il nous a fallu être transparent sur le travail effectué par chacun.

Bien sûr nous avons aussi pu faire connaissance avec des professionnels du milieu ce qui nous a apporté de solides connaissances pratiques sur l'efficacité énergétique et l'isolation thermique, ce qui est toujours un plus dans notre formation.

Par ailleurs, ce projet fut un réel approfondissement du cours de MRIE 2 que certains membres du groupe suivaient en parallèle. Nous avons pu compléter nos connaissances théoriques du sujet en apportant des acquis pratiques au travers de la maquette que nous avons réalisée, et des rencontres avec les professionnels.



Tout au long de ce projet, nous avons cherché à en savoir plus sur la transition énergétique, véritable phénomène de société qui ne cesse de prendre de l'ampleur à l'heure actuelle. Nous nous sommes efforcés d'utiliser un grand nombre de sources afin de comprendre tous les enjeux de l'isolation thermique durable et écologique, dans le cadre d'une construction ou d'une rénovation.

Nous avons observé le rôle primordial de la réglementation thermique instaurée par l'Etat. En effet, elle cadre actuellement et cadrera de plus en plus la construction et la rénovation du parc immobilier français pour réduire au maximum notre consommation et nos dégagements de gaz à effet de serre. De plus, la rénovation d'un logement est doublement bénéfique pour le particulier car elle réduira sa facture énergétique et améliorera le confort de son habitat tout en respectant l'environnement : il obtiendra ainsi une maison durable.

Il nous a semblé clair que le choix de l'isolant reste déterminant pour l'habitat et qu'il doit être soigneusement effectué car chaque cas est unique. Les isolants biosourcés qui apparaissent depuis quelques temps s'imposent de plus en plus sur le marché, ils répondent en effet au mieux aux exigences strictes que nous imposent la nouvelle réglementation thermique et les labels. Ils permettent en parallèle de faire attention à l'énergie grise, c'est-à-dire le cycle de vie de l'isolant. Cette caractéristique devient en effet, grâce à la transition énergétique, un facteur important de décision.

Enfin, au sein du groupe, l'entente et la convivialité ont toujours été présentes, rendant le travail d'autant plus productif. Notre répartition équitable du travail nous a également apporté une cohésion certaine. C'est donc en équipe que nous avons effectué la partie expérimentale de notre projet, partie qui nous a tous fait prendre conscience, au travers de résultats concrets, de l'importance de la notion d'efficacité énergétique. Plus qu'une simple prise de conscience, elle doit devenir une priorité afin de préserver notre environnement.

Finalement, la rénovation du parc français suite à la transition énergétique apparaît comme un secteur d'activité porteur, qui continuera de se développer dans les décennies futures : dans notre course contre le réchauffement climatique, la maîtrise d'une énergie verte dans l'habitat jouera un rôle déterminant.

**I- Transferts thermiques et méthodes d'isolation**

- <http://www.thermique55.com/principal/thermique.pdf>
- [http://www.construireavecsaint-gobain.fr/wp-content/uploads/2012/10/4\\_ESS\\_HAB\\_INTRODUCTION\\_THERMIQUE.pdf](http://www.construireavecsaint-gobain.fr/wp-content/uploads/2012/10/4_ESS_HAB_INTRODUCTION_THERMIQUE.pdf)
- [http://www.isover.fr/var/isover/storage/synchronisation/doc/isover/ficheP/Isolation\\_thermique\\_guide\\_%20Isover.pdf](http://www.isover.fr/var/isover/storage/synchronisation/doc/isover/ficheP/Isolation_thermique_guide_%20Isover.pdf)
- <http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/tixier/L5C-05-confort.pdf>
- <http://www.conductivethermique.fr/>
- <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10254>
- <http://www.isolationthermique.fr/>
- <http://www.toutsurlisolation.com/Choisir-son-isolant/Comparer-les-isolants/La-performance-d-un-isolant>
- [http://www.cotemaison.fr/ite-isolation-par-l-exterieur\\_13959.html](http://www.cotemaison.fr/ite-isolation-par-l-exterieur_13959.html)
- <http://www.thermoconcept-sarl.com/index.php/fr/produits-caracterisation-thermique-cnd/analyseur-conductivite-thermique-hot-disk/conductivite-thermique-hot-disk>
- <http://philippe.berger2.free.fr/Bois/Systemes%20Constructifs/Thermique/thermique%20batiment.htm>
- Livret Info Energie
- Cours MRI2
- <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/dico/d/physique-thermographie-13360/>

**II- Isoler aujourd'hui : normes et enjeux environnementaux**

- [http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/fileadmin/redacteurs/Regles\\_de\\_l\\_Art/Rapports/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09.pdf](http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/fileadmin/redacteurs/Regles_de_l_Art/Rapports/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09.pdf)
- [http://www.enertech.fr/pdf/48/enjeux-de-la-renovation-thermique-des-batiments-en-france\\_v0.pdf](http://www.enertech.fr/pdf/48/enjeux-de-la-renovation-thermique-des-batiments-en-france_v0.pdf)
- <http://www.immobilierecologique.fr/pages/R%C3%A9novation-thermique-%3A-nouvelle-subvention-de-1-350-euros-et-les-autres-aides>
- <http://ecocitoyens.ademe.fr/mon-habitation/opter-pour-la-qualite/pour-des-batiments-de-qualite-les-certifications-et-labels>
- [http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/s-y-retrouver-dans-les-labels-du-batiment-article\\_82562/](http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/s-y-retrouver-dans-les-labels-du-batiment-article_82562/)
- <http://rt2012-leguide.com/prochaine-rt-la-reglementation-thermique-2020-ou>
- [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN\\_plaquetteRT2012\\_avril2011.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_plaquetteRT2012_avril2011.pdf)
- Rémi BOUCHE, Benoit BUISSON, Benoit CORMIER, Aurélie DELAIRE, Salem FARKH, Frank LEGUILLON, « Performance énergétique : les matériaux et procédés d'isolation », CSTB Editions, Socotec Juillet 2013.
- Philippe LEBLOND, « L'essentiel de la RT 2012 : Obligations et mise en œuvre de la RT », Editions LEMONITEUR, mars 2013.
- Paul de Haut, « Chauffage, isolation et ventilation écologiques », Editions EYROLLES Environnement, janvier 2011.
- Guide de l'ADEME, « J'éco-rénove J'économise, Isoler son logement », novembre 2013.
- <http://www.consommerdurable.com/2014/03/isolation-ecologique-quel-materiau-isolant-choisir-laine-de-verre-laine-de-cellulose-laine-de-chanvre-laine-de-mouton-laine-de-bois-liege-expanse-chenevotte-polystyrene/>
- [http://www.la-crea.fr/files/publications/Espace\\_Info\\_Energie/plaquette-eie-isolation-2013-download.pdf](http://www.la-crea.fr/files/publications/Espace_Info_Energie/plaquette-eie-isolation-2013-download.pdf)
- <http://www.dkomaison.com/articles/environnement/de-la-laine-de-mouton-pour-isoler-sa-maison-03-07-2009-460.htm>
- <http://www.futura-sciences.com/magazines/maison/infos/dico/d/maison-energie-grise-5782/>
- <http://www.consoglobe.com/energie-grise-c>
- [https://www.google.fr/search?q=energie+grise&rlz=1C1CHFX\\_frFR511FR511&oq=energie+grise&aqs=chrome.69i59j0j69i60j0i3.1712j0j4&sourceid=chrome&es\\_sm=122&ie=UTF-8](https://www.google.fr/search?q=energie+grise&rlz=1C1CHFX_frFR511FR511&oq=energie+grise&aqs=chrome.69i59j0j69i60j0i3.1712j0j4&sourceid=chrome&es_sm=122&ie=UTF-8)

**Annexe 4 :**

- <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/vitrages-basse-emissivite-low-e>
- <http://www.vgi-fiv.be/wp-content/uploads/2012/11/Un-autre-regard-sur-les-vitrages-et-leurs-fonctions-2e-edition-Fr.pdf>
- <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10397>
- <http://www.inoutic.de/fr/conseils-pour-l-039achat-de-fenetres/economiser-l-039energie/valeur-u-fenetres/valeur-u-fenetres.html>
- [http://www.interpane.com/medien/service/Bible\\_Interpane\\_Chapitre\\_4.pdf](http://www.interpane.com/medien/service/Bible_Interpane_Chapitre_4.pdf)
- <http://www.france-chauffage.fr/isolation-du-logement/isolation-des-sols>

Illustration de couverture : <http://www.electricite-et-energie.com/coefficient-isolation-thermique-bien-comprendre-pour-isoler-efficacement/>

Illustration n°1 : <http://www.docstoc.com/docs/154508760/Conduction-Convection-Radiation>

Illustration n°2 : Issu d'un PDF

Illustration n°3 : <http://www.projetvert.fr/comment-evaluer-la-deperdition-chaleur/>

Illustration n°4 : <http://www.radiateur-electrique.org/forum/est-que-emissivite-infrarouge-t631.html>

Illustration n°5 et 6 : Issu d'un PDF

Illustrations n°7 et 8 : [http://www.la-crea.fr/files/publications/Espace\\_Info\\_Energie/plaquette-eie-isolation-2013-download.pdf](http://www.la-crea.fr/files/publications/Espace_Info_Energie/plaquette-eie-isolation-2013-download.pdf)

Illustration n°9 : <http://www.jp-toiture.fr/camera-thermique>

Illustration n°10 : Issu d'un PDF

Illustration n°11 : [http://www.maisonsdominiquecharles.com/userfiles/image/La-gestion-des-ponts-thermiques%20\(7\).jpg](http://www.maisonsdominiquecharles.com/userfiles/image/La-gestion-des-ponts-thermiques%20(7).jpg)

Illustration n°12 : [http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/fileadmin/redacteurs/Regles\\_de\\_l\\_Art/Rapports/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09.pdf](http://www.reglesdelart-grenelle-environnement-2012.fr/fileadmin/redacteurs/Regles_de_l_Art/Rapports/rapport-rage-parc-residentiel-existant-2012-09.pdf)

Illustration n°13 : <http://conseils.xpair.com/livret/performanceet-etiquette-energetique.htm>

Illustration n°14 : <http://www.acermi.com/marque-acermi/un-etiquetage-qui-engage/>

Illustration n°15 : <http://www.ville-amenagement-durable.org/fichiers/HvxVJb2suYMpqSCOIItb0Q.html>

Illustration n°16 : Imprim'écran de la maquette sous Solid'Works

Illustration n°17 et 18 : Photo réalisée par la caméra thermique d'info energie

Illustrations n°19 et 20 : <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10397>

Illustration n°21 : Issu d'un PDF

Illustration n°22 : [http://www.ville-saint-priest.fr/uploads/tx\\_belinkressources/logement\\_isolation.pdf](http://www.ville-saint-priest.fr/uploads/tx_belinkressources/logement_isolation.pdf)

Illustrations n°23, 24 et 25 : <http://www.lemoniteur.fr/185-regles-et-normes/article/actualite/21604782-comment-ca-marche-l-isolation-des-combles-perdus>

Illustration n°26 : <http://www.combles-isolation.fr/>

Illustration n°27 : Issu d'un PDF

Illustration n°28 : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Convection>

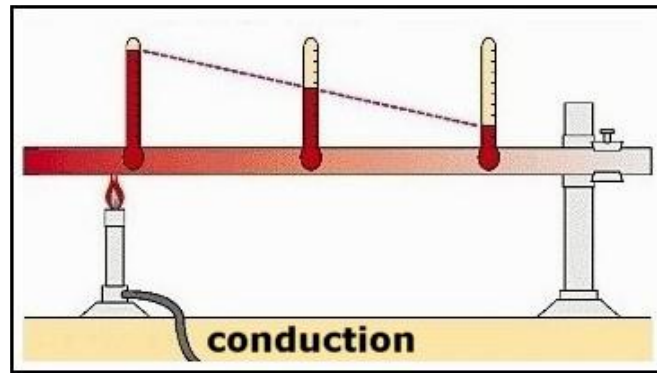
Illustration 29 : Issu d'un PDF

Illustration n°30 : <http://geo.la-crea.fr/?config=config/config-thermo-rouen.xml>

Illustration n°31 : Photos prises par M. Lecoutey lors de son auto-rénovation

Annexe 1 :

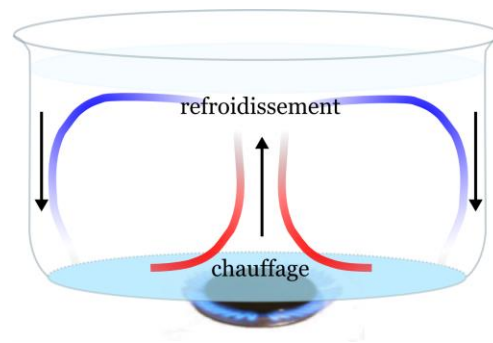
*Illustration n° 27 : Représentation de la*



conduction

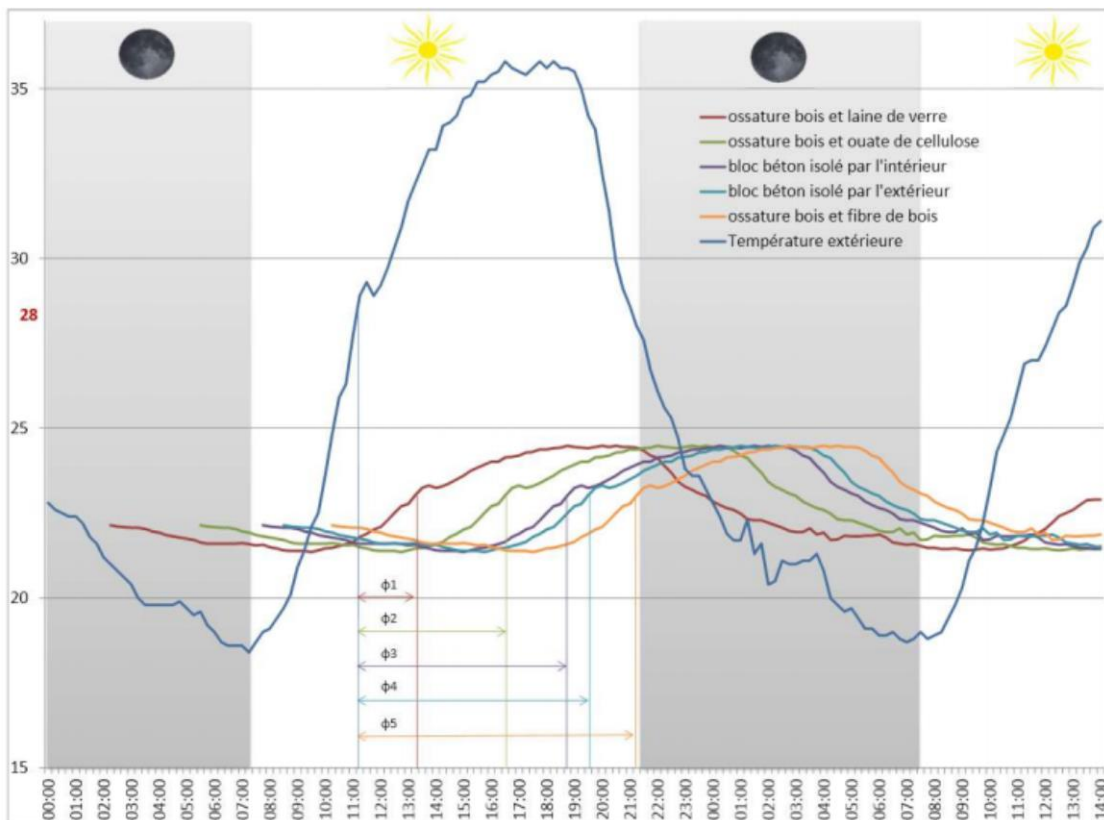
Annexe 2 :

*Illustration n°28 : Représentation de la convection*



Annexe 3 :

*Illustration n°29 : Graphique représentatif du déphasage*



## 1) Les vitres

Les vitres représentent plus de 10% des déperditions de chaleur, c'est pourquoi elles sont un secteur privilégié de l'isolation thermique. Aujourd'hui l'offre de vitrage est très vaste et évolue sans cesse : double - triple vitrage, utilisation de gaz isolant.... Ceci s'explique notamment par la notion de confort thermique qui est devenue indispensable aujourd'hui dans nos habitations. En effet, outre une température ambiante agréable, l'isolation thermique par les vitres permet d'éviter le phénomène de paroi froide et ainsi réduit le risque de condensation sur les fenêtres à l'intérieur des pièces. Avant d'énoncer les différents types de vitrage, il me semble nécessaire d'indiquer les coefficients et indices explicitant leur efficacité afin de pouvoir les comparer.

Le coefficient U caractérise la transmission thermique d'un objet : c'est le flux de chaleur qui traverse 1m<sup>2</sup> de paroi séparant deux espaces dont la différence de température est de 1°C, il s'exprime en W/m<sup>2</sup>.K . Pour avoir la véritable valeur U de la vitre on doit prendre en compte plusieurs coefficients :

- Ug : la valeur U du vitrage seul : elle est fonction du gaz isolant et du nombre de vitre
- Uf : la valeur U du cadre.
- Ψg : le coefficient linéaire de transmission thermique du joint d'écartement du vitrage. Il dépend du matériau utilisé des intercalaires utilisés pour la séparation des vitrages.

Il faut de plus tenir compte de la surface du vitrage(Ag), la surface du cadre(Af) et le périmètre de la vitre(Ig)

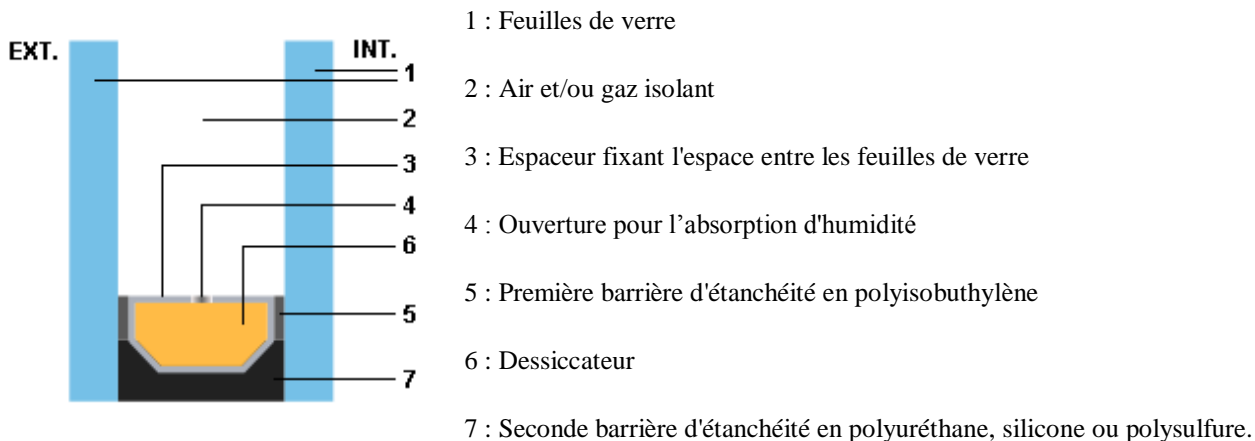
Ainsi : 
$$\frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + I_g \cdot \Psi_g}{(A_g + A_f)}$$

Pour la suite, on s'intéressera au coefficient Ug qui est de loin le plus important.

### Le système double vitrage

Le double vitrage est constitué de deux feuilles de verre, espacées par un espace hermétique formé d'air ou d'un gaz isolant.

#### Illustration n°19 : Le double vitrage



Du fait de son efficacité par rapport au simple vitrage et son relatif faible coût par rapport au triple vitrage, le double vitrage est aujourd'hui devenu une référence. En effet, il est même devenu obligatoire dans la construction de nouveaux bâtiments récemment.

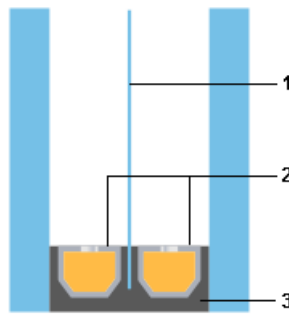
## Le système triple vitrage

### Illustration n°20 : Le triple vitrage

1 : Film tendu

2 : Espaceur métallique

3 : Mastic thermodurcissable



Le triple vitrage n'est pas encore très répandue certainement car il représente un fort investissement et pourtant ses performances énergétiques sont encore meilleures que celle du double vitrage.

Le double ou triple vitrage n'est pas toujours uniquement constitué de vitres mais il y a dans le meilleur des cas l'utilisation de gaz isolant et de ce que l'on appelle une couche à basse émissivité.

### La couche basse émissivité

Comme il l'a été expliqué précédemment, de l'énergie est émise par radiation c'est ce que l'on nomme l'émissivité. Cette émissivité est quantifiée par une valeur comprise entre 0 et 1. Plus cette valeur est grande, plus l'objet a une forte émissivité et ainsi plus il y a de pertes de chaleur.

A titre d'exemple, un vitrage standard a une émissivité de 0.84. En d'autres termes cela veut dire qu'il rayonne 84% du maximum théorique à sa température.

Un vitrage basse émissivité ou "Low E" a quant à lui une émissivité de 0.04 ainsi il ne laisse échapper que 4% de la chaleur qu'il a emmagasiné. Ce système fonctionne aussi bien l'été et il empêche donc la chaleur de rentrer par rayonnement dans l'habitat. De plus cette couche basse émissivité a un autre avantage, elle est en effet capable de laisser passer les rayons solaires ce qui permet de conserver les apports solaires tels que la lumière et la chaleur. Ceci s'explique par le fait que les rayons du soleil ont une courte longueur d'onde en comparaison aux rayons infrarouges qui correspondent à la chaleur émise par les matériaux à l'intérieur du bâtiment. Ainsi en hiver ce système permet de profiter au maximum de l'énergie solaire afin de chauffer l'habitat. Cependant ce système a un inconvénient : il absorbe une partie de la luminosité extérieure et on doit donc utiliser des sources de luminosité artificielle, surtout en hiver.

Afin de quantifier cette perte de luminosité on utilise le coefficient de transmission lumineuse TL. Exprimé en %, il correspond à la quantité de lumière naturelle qui pénètre au travers d'un vitrage. Plus cette valeur est élevée, plus l'éclairage naturel est important et moins le recours à l'éclairage artificiel est nécessaire.

Enfin l'utilisation de ce système absorbe une petite partie de l'énergie solaire. Pour quantifier cette perte on utilise ce qu'on appelle le facteur solaire g. Exprimé en %, il représente la transmission totale d'énergie solaire au travers d'un vitrage. Ainsi, plus ce facteur est élevé, plus les apports solaires sont importants.



Illustration n°21 : Représentation de la transmission lumineuse et du facteur g

Il faut ainsi trouver la combinaison qui vous convient entre économies énergétique et pertes de luminosité

### *Le gaz isolant*

Du gaz isolant peut être injecté entre les vitres à la place de l'air. Ce gaz a de meilleures capacités isolantes que l'air c'est à dire qu'il est plus dense et a une plus faible conductivité thermique.

On utilise le plus souvent l'Argon. L'argon a un coefficient de conductivité thermique plus faible que celui de l'air : 0,016W/(m.K) contre 0,024W/(m.K) pour l'air soit 50 % moins conducteur de chaleur à pression normale et à 0°C. De plus, à pression normale et à une température de 15°C, l'argon possède une masse volumique de 1,67g/L contre 1,2g/L pour l'air, soit 40 % plus lourd que l'air. Or le gaz au contact de la vitre froide (vitre extérieure en été) se refroidit et donc redescend tandis que le gaz au contact de la vitre chaude se réchauffe et remonte. Ainsi plus le gaz est léger, plus ce transfert de particule se fait rapidement et ainsi plus il y a de transfert de chaleur par phénomène de convection. On en conclut que plus le gaz est lourd, plus la perte de chaleur par convection est limitée.

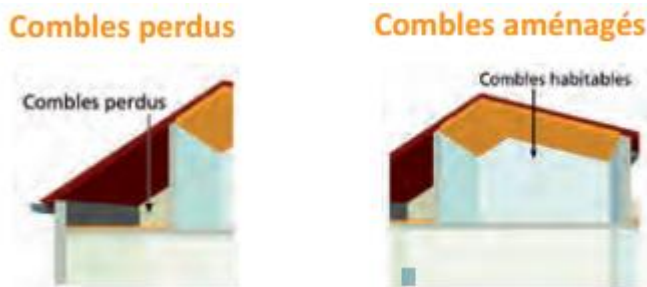
Il existe des gaz encore plus performant que l'argon tel que le krypton : il est deux fois plus lourd et est deux fois moins conducteur que l'argon. Cependant son coût de production est bien supérieur à celui de l'argon, c'est pourquoi il n'est pas très répandu.

L'utilisation du gaz isolant peut réduire jusqu'à 25 % les pertes de chaleur du double vitrage. Enfin, il est important de noter que l'utilisation de ce système est très fiable puisqu'en moyenne seulement 5 % du gaz s'échappe en 25 ans.

## 2) Le toit

L'isolation des combles et des toitures est la plus importante mais aussi la plus rentable puisqu'ils représentent entre 25 et 30% des déperditions thermiques. Ceci s'explique par le fait que la densité de l'air chaud est plus faible que celle de l'air froid, ainsi au niveau de la toiture l'air est plus chaud et les déperditions thermiques sont alors importantes. De plus, en été une isolation des combles performante est indispensable pour garder de la fraîcheur puisque la toiture est la surface la plus exposée au rayonnement solaire.

On distingue deux types de combles : les combles perdus et les combles aménagés.



*Illustration n°22 : Position des combles perdus et aménagés*

### **Les combles perdus**

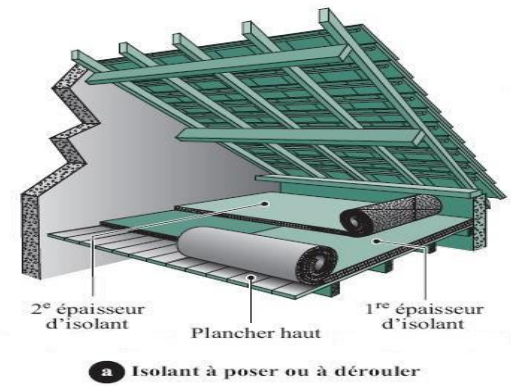
Situés sous des toits inclinés, ce sont des endroits non habitables. Ainsi ils ne sont pas chauffés et doivent donc être isolés des pièces qui le sont. Il est souvent possible d'atteindre une haute performance énergétique de ces combles puisqu'il y a aucune limite d'épaisseur des isolants.

Il existe différentes manières d'isoler le plancher, cela dépend du type de charpente, de l'accessibilité et de la configuration du sol.

On peut utiliser un matériau isolant en panneau ou en rouleau à dérouler ou à poser

### Illustration n°23 : Disposition de l'isolant en panneau ou en rouleau

Deux couches sont nécessaires afin d'éviter les ponts thermiques. En effet, il faut mettre la première couche entre les solives puis dérouler la deuxième sur la première dans l'autre sens.



Si l'accessibilité est difficile il existe une autre solution : celle de l'isolant en vrac disposé par soufflage. Cette méthode est certainement moins efficace à long terme que celle des panneaux car il peut y avoir un phénomène de tassement de l'isolant.

### Illustration n°24 : Isolation en vrac

Enfin, il est possible de disposer manuellement le matériau isolant. En effet, par épandage l'isolant est réparti entre les solives.



### Illustration n°25 : Isolation manuelle par épandage

Il faut souligner que pour chaque manière d'isoler il est nécessaire de mettre en place un pare vapeur. Son rôle est d'assurer l'étanchéité de l'isolant en empêchant le cheminement et la stagnation de la vapeur d'eau à travers la paroi.

## **Les combles habitables**

Les combles habitables sont des pièces chauffées, situées sous des toitures inclinées. Pour isoler ces combles il existe deux techniques différentes : l'isolation sous rampant et l'isolation sur toiture.

L'isolation sous rampant est semblable à l'isolation des combles perdus par le fait qu'on utilise soit des panneaux ou des rouleaux entre et sous les chevrons soit on souffle l'isolant en vrac dans un caisson préalablement établi. La seule différence avec les combles perdus est l'aménagement d'une lame d'air ventilé d'au moins 3 cm entre l'isolant et la couverture. Cette lame d'air évite que l'humidité stagne sous la couverture et ainsi évite tout risque de condensation et de moisissure.

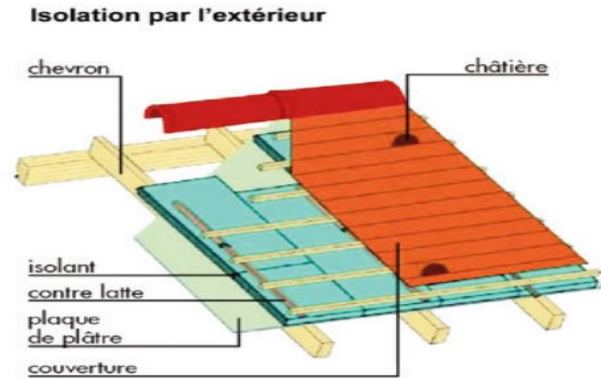
Il est aussi possible d'utiliser une couche d'isolant mince afin de perfectionner encore son isolation. Cette couche est de plus en plus utilisée dans l'isolation des combles mais peut aussi être utilisée pour l'isolation des murs. Ils sont



composés de plusieurs films d'aluminium et d'une ou plusieurs couches donnant l'épaisseur finale (film à bulles, laine végétale ou minérale...). Ces isolants minces doivent être utilisés comme des compléments d'isolation et non pas comme des isolants classiques.

L'isolation sur toiture est aussi couramment utilisée et consiste à fixer des panneaux rigides d'isolant au-dessus de la charpente mais toujours sous la couverture. Cette technique a de multiples avantages puisqu'elle augmente le volume habitable évite les ponts thermiques en créant une réelle enveloppe isolante.

*Illustration n°26 : Isolation sur la toiture*



### 3) Le sol

Le sol représente aujourd'hui plus de 15 % des déperditions thermiques de l'habitat, il est ainsi un secteur privilégié pour réaliser des économies de chauffage. Il existe différents types de sol et ainsi différentes manières d'isoler.

#### **Isolation des sols existants (rénovation)**

- Sol au-dessus d'un vide sanitaire ou local non chauffé accessible

Le vide sanitaire est un espace situé entre le premier plancher et la terre et permet d'assurer l'étanchéité du sol. Cet espace de 20 à 80cm doit nécessairement être ventilé pour éviter la stagnation de l'humidité. Dans le cas d'un sol avec vide sanitaire accessible il est préférable d'isoler par le dessous et ainsi sur le plafond du vide sanitaire ou de la cave. Cette méthode d'isolation est simple à mettre en œuvre car elle n'impacte pas le sol du rez de chaussé. Pour faciliter la pose de l'isolant, il est conseillé de les utiliser sous forme de panneaux rigides.

- Sol au-dessus d'un vide sanitaire inaccessible ou d'un terre-plein

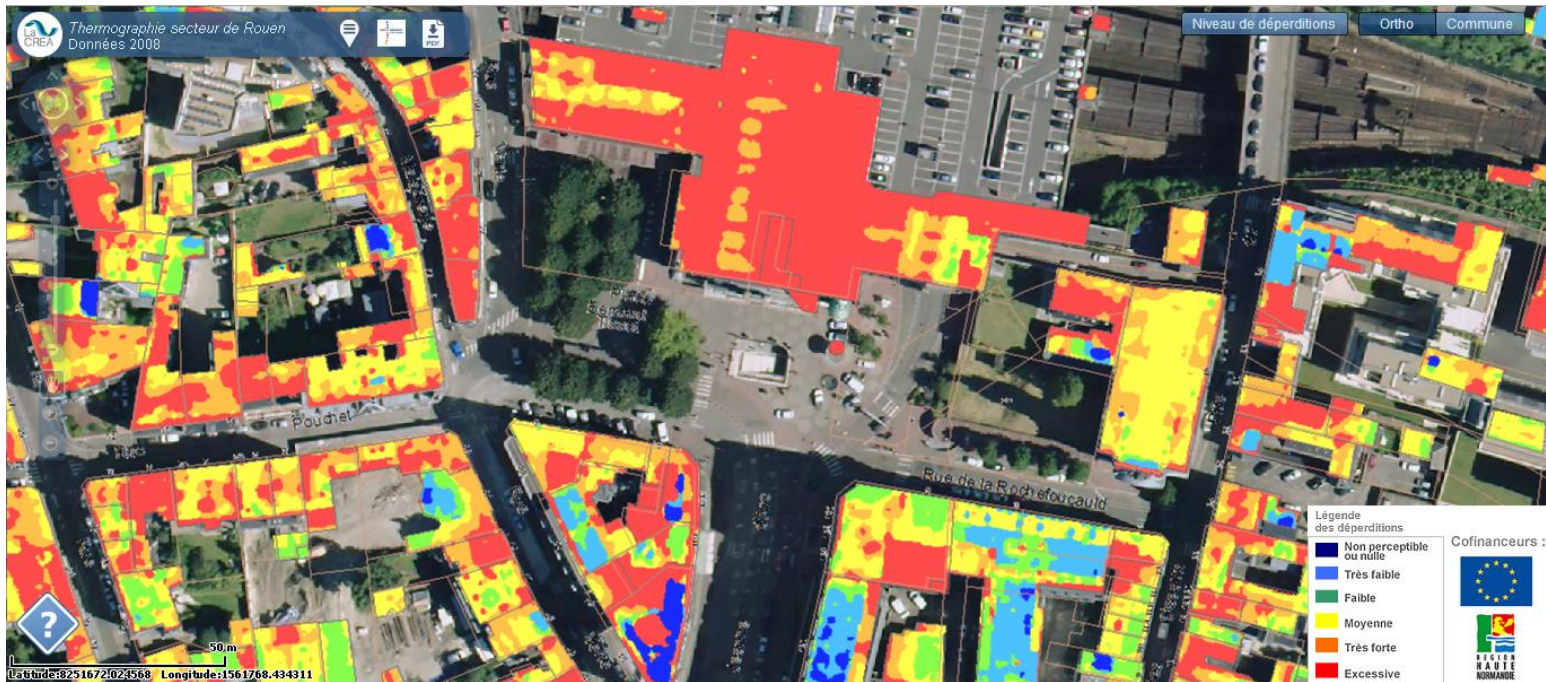
Dans ce cas il est plus difficile d'isoler son sol. En effet il faut retirer le revêtement du sol existant pour ensuite fixer sur la dalle de béton la plaque d'isolant. Cependant, il est nécessaire de prêter attention au type d'isolant à utiliser. En effet, il doit être résistant au poids et à la pression et il est préférable de le recouvrir d'un film plastique afin de le protéger avant de couler la chape par-dessus.

#### **Isolation lors de la construction**

- L'idéal est d'avoir les moyens de créer un vide sanitaire ventilé, d'y poser les plaques d'isolants et enfin d'intégrer un plancher chauffant. Il existe différents types de plancher chauffant mais le plus largement utilisé est celui qui utilise de l'eau préalablement chauffé par notre chaudière, pompe à chaleur... Des tubes dans lesquelles circule l'eau sont fixés sur les panneaux isolants, on y coule par-dessus une dalle de béton et enfin le revêtement du sol. L'avantage du chauffage par le sol est qu'elle garantit un chauffage homogène.
- S'il n'est pas possible de créer un vide sanitaire, il existe différentes méthodes d'isolation sur terre-plein :
  - La dalle flottante : cela consiste à couler deux couches de béton prenant en sandwich l'isolant
  - La dalle sur terre-plein : il s'agit de couler le béton directement sur l'isolant. Il faut cependant placer un film en polyane sur l'isolant au préalable
  - Le hourdis de polystyrène ou polymère : l'hourdis consiste à positionner l'isolant entre les poutrelles de béton et ensuite de couler la dalle par-dessus.

Annexe 5 :

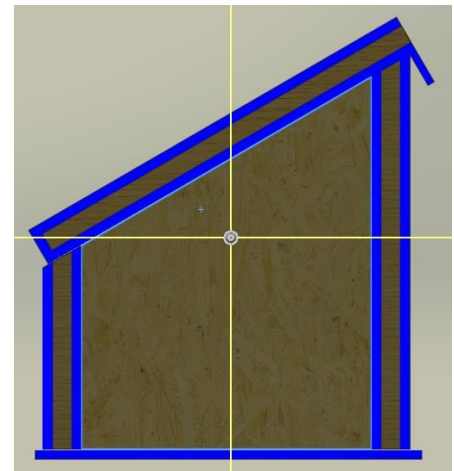
*Illustration n°30 : Thermogramme de la ville de Rouen*



**\*\* produits difficiles à trouver au détail**

Synthétiques	Utilisation										Caractéristiques isolantes				Caractéristiques techniques					Autres caractéristiques		
	Isolants	Conditionnement	Masse Volumique	Murs par l'intérieur	Murs par l'extérieur	Plancher/ Combles perdus	Rampant (Toiture par l'intérieur)	Support de couverture (Toiture par l'extérieur)	Sol / Sous chape	Conductivité thermique (lambda en W/ m. K)	Epaisseur pour Rse (en cm)	Tarif (en euros par m²)	Capacité hygroscopique	Résistance à la diffusion de la vapeur d'eau	Classement au feu	Temps de séchage (en h pour 20 cm)	Eco-Bilan	Isolation Phonique	Durée de Vie			
Synthétiques	Panneaux	10 à 30 kg/m³							0,030 à 0,040	18 à 24	**	Non	30 à 100	B	6	●	Moyenne	50				
	Panneaux	25 à 45 kg/m³							0,029 à 0,036	17 à 22	44 à 47	Non	80 à 200	E	6	●	Moyenne	50				
Minéraux	Rouleaux	10 à 40 kg/m³							0,038	23	13 à 15	Non	1	A-B	6	●	Bonne	10				
	Rouleaux	30 kg/m³							0,04	24	9 à 11	Non	1	A-B	6	●	Bonne	50				
Minéraux	Rouleaux	20 à 40 kg/m³							0,037	22	23 à 32	Moyenne	1 à 2	C-D	6	●	Faible	50				
	Rouleaux	20 à 40 kg/m³							0,038 à 0,042	23 à 25	31 à 33	Moyenne	1 à 2	E	7	●	Faible	50				
Fibre de bois	Panneaux souples	25 à 50 kg/m³							0,038 à 0,040	23 à 24	37 à 39	Faible	1 à 2	E	7,5	●	Bonne	100				
	Panneaux denses	140 à 280 kg/m³							0,037 à 0,046	22 à 28	36 à 38	Faible	3 à 8	E	15	●	Bonne	100				
Liège	Vrac								0,040 à 0,045	24 à 27	37 à 39	Faible	5 à 30	E	9	●	Bonne	100				
	Panneaux	110 à 150 kg/m³							0,036 à 0,042	22 à 25	**	Faible	5 à 30	E	13	●	Bonne	100				
Ouate de cellulose	Panneaux	40 à 70 kg/m³							0,039	23	35 à 37	Moyenne	2	E	12	●	Bonne	50				
	Vrac insufflé								0,038 à 0,044	23 à 26	16 à 18	Moyenne	1 à 2	B-E	10	●	Bonne	50				
Isolants biosourcés ou recyclés	Vrac déversé								0,037 à 0,040	22 à 24	9 à 11	Moyenne	1 à 2	B-E	10	●	Bonne	50				
	Panneaux	18 à 25 kg/m³							0,039	23	41 à 43	Moyenne	2 à 3	F	5	●	Bonne	50				
Laine de coton ou 'Mélisse'	Rouleaux	18 à 25 kg/m³							0,039	23	35 à 37	Moyenne	2 à 3	F	5	●	Bonne	50				
	Panneaux	10 à 30 kg/m³							0,035 à 0,040	21 à 24	28 à 36	Forse	1 à 2	C	5	●	Bonne	30				
Laine de mouton	Rouleaux	10 à 30 kg/m³							0,035 à 0,042	21 à 25	20 à 28	Forse	1 à 2	C	5	●	Bonne	30				

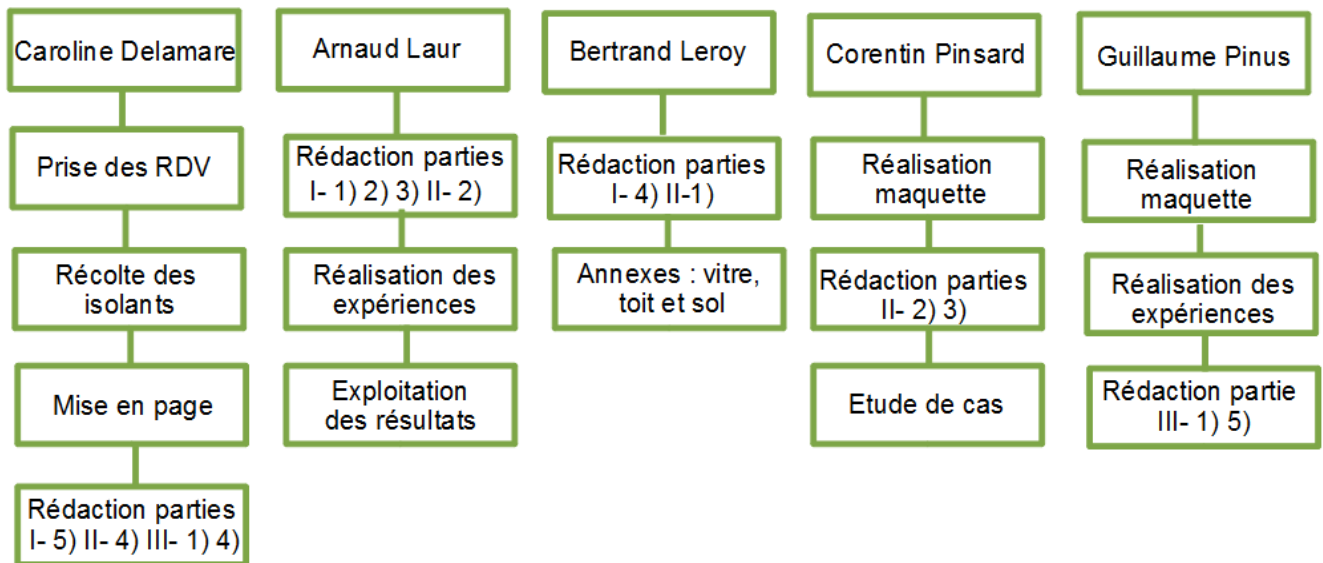
Annexe 7 :



Annexe 8 :



Annexe 9 :



Annexe 10 :



Annexe 11 :

testo Logiciel testo IRSoft

Analyse Rapport Caméra Vidéo Archive Paramètres

Palette Arc-en-ciel Émissivité 0,94 Humidité 40,0 % HR  
 Température réfléchie 18,0 °C Température ambiante 14,0 °C  
 Intensité 0 W/m<sup>2</sup> Point de rosée 0,6 °C

Ouvrir Égalisation d'histogramme Annuler les modifications  
 Fichier Couleurs Paramètre Audio Superposition d'images Copier les paramètres actuels Paramètres

IR000769.BMT IR000771.BMT IR000773.BMT IR000777.BMT IR000780.BMT IR000781.BMT

Image thermique

Echelle de température  
 Échelle 27,0 °C Valeurs limites Isotheme  
 Auto  
 24,3

N°	Temp. [°C]	Émiss.	Temp. réflé. [°C]	Remarque
M1	25,7	0,94	18,0	
M2	26,2	0,94	18,0	
M3	26,5	0,94	18,0	

Remarque

Image réelle

t895-2 320x240 Pixels enregistré 15/05/2014 15:03:23 Minimum: 24,0 °C Valeur moyenne: 25,1 °C Maximum: 28,1 °C



*Illustration n°31 : Photos de l'auto-rénovation*

