

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET ISOLATION THERMIQUE



Étudiants :

Thomas BERDIN

Adrien BRUN

William FOSSET

Solène LEFRANC

Enseignant-responsable du projet :

JAMIL ABDULAZIZ

Date de remise du rapport : 11/06/2018

Référence du projet : STPI/P6/2017 – 2018 projet 33

Intitulé du projet : Efficacité énergétique et isolation thermique

Type de projet : Bibliographique, Expérimental, Modélisation

Objectifs du projet :

- Développer ses connaissances et définir précisément les différentes notions concernant l'efficacité énergétique et l'isolation thermique
- Prendre contact avec des professionnels
- Travailler en groupe
- Réaliser un travail expérimental en lien avec le thème de notre étude
- Comprendre et analyser les enjeux entourant les politiques d'efficacité énergétique et d'isolation thermique

Mots-clefs du projet : Efficacité énergétique, isolation thermique, performance énergétique, réglementation thermique

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|----|
| REMERCIEMENTS..... | 5 |
| NOTATIONS, ACRONYMES..... | 6 |
| Introduction..... | 7 |
| Méthodologie / Organisation du travail..... | 8 |
| Partie théorique..... | 9 |
| I - Efficacité énergétique et politique concernant la performance énergétique..... | 9 |
| 1. 1. Définition..... | 9 |
| 1. 2. La politique mise en place concernant l'efficacité énergétique en Europe..... | 9 |
| 1. 3. Les mesures liées aux enjeux d'efficacité énergétique dans le bâtiment..... | 9 |
| 2. 1. L'efficacité énergétique active..... | 10 |
| II - Notions de thermique..... | 12 |
| 2.1. Transfert thermique..... | 12 |
| 1.1 Flux thermique..... | 12 |
| 2.2. Modes de transfert thermique..... | 12 |
| 2.3. Bilan énergétique d'un bâtiment..... | 14 |
| III - Isolation..... | 16 |
| 3.1. Les différents isolants..... | 16 |
| 3.2. Quel isolant choisir et comment ?..... | 17 |
| 3.3. Les ponts thermiques..... | 18 |
| Expériences..... | 20 |
| Étude de cas..... | 23 |
| Conclusion et perspectives..... | 26 |
| Bibliographie..... | 27 |
| Crédits d'illustration..... | 27 |
| Annexes..... | 28 |

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier Monsieur Jamil ABDUL AZIZ, notre professeur référent qui nous a accompagné tout au long de ce projet.

Nous remercions Monsieur Alban BOURCIER, professeur d'urbanisme et directeur du patrimoine de l'INSA ROUEN ainsi que Monsieur Patrick DORE, responsable du pôle maintenance et travaux de nous avoir prêté une caméra thermique. Nous remercions aussi Monsieur Nicolas HELAN, technicien du pôle maintenance et travaux de nous avoir accompagné lors de notre expérience pour l'utilisation de la caméra thermique.

Nous remercions Madame Myriam GUILBAUD, responsable des ADM de nous avoir mis en contacte avec Monsieur Grégory MANRY.

Enfin, nous remercions Grégory MANRY, ingénieur chez DALKIA d'avoir pris le temps de nous rencontrer pour répondre à toutes nos questions sur le projet ENERGIESPRONG.

NOTATIONS, ACRONYMES

EE : Efficacité Énergétique

UE : Union Européenne

PAC : Pompe À Chaleur

CVC : Chauffage, Ventilation et Climatisation

ICF Habitat : Filiale logement de la SNCF

OSB : Oriented Strand Board

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

PVC : Polychlorure de vinyle

BIM : Building Information Modeling

INTRODUCTION

Le secteur des énergies est responsable de presque 85 % des émissions de gaz à effet de serre. L'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre provoquée par les changements climatiques auront d'importantes conséquences encore difficiles à cerner comme des précipitations et un nombre très variable de climats sur notre planète. L'enjeu environnemental et les modifications, à l'échelle planétaire, pourraient se traduire par des changements environnementaux importants, de fortes inondations, des sécheresses, de fortes chaleurs ou encore par de grandes périodes de froid à des endroits habituellement "chauds".

La nouvelle stratégie 20/20/20 mise en place par l'Union Européenne prévoit que d'ici 2020, les pays de l'UE devront baisser de 20 % leur consommation d'énergie, augmenter de 20 % la place des énergies renouvelables et réduire leur consommation d'énergie totale de 20 %. Le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique en UE est très élevé mais pourtant peu exploité et permettrait d'économiser plus de 160 milliards d'euros par an.

Afin de traiter le sujet de l'efficacité énergétique et de l'isolation thermique, nous allons dans un premier moment, au travers d'une partie théorique, parler de l'efficacité énergétique, nous aborderons ensuite quelques notions de thermique pour enfin traiter le sujet de l'isolation thermique. Dans un second temps, nous réaliserons une expérience permettant de tester les qualités isolantes de certains matériaux. Pour finir, nous effectuerons une étude de cas sur le projet ENERGIESPRONG s'inscrivant dans une démarche d'efficacité énergétique illustrant au mieux le sujet que nous devons traiter.

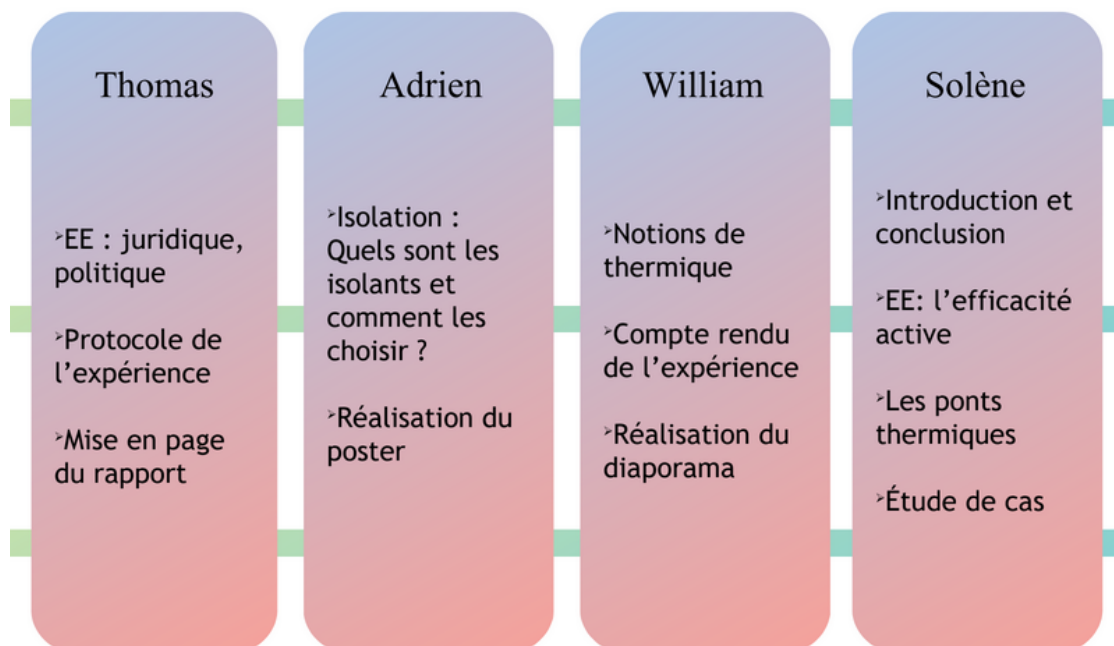
MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour réaliser ce projet, nous avons directement pensé à prendre contact avec Grégory MANRY pour réaliser notre étude de cas. Il a tout de suite accepté et nous a proposé une rencontre à l'INSA pour répondre à l'ensemble de nos questions, ce qui nous a permis de gagner un temps précieux. Nous avons pensé à lui car dans le cadre des conférences ADM en Janvier, il était venu nous présenter le projet ENERGIESPRONG qui est un projet très actuel sur l'efficacité énergétique et l'isolation thermique.

Afin de rendre cet entretien le plus intéressant possible, nous avons déjà rédigé la partie théorique et réalisé l'expérience ainsi que l'exploitation des résultats de cette dernière. Cela nous a permis de préparer nos questions à l'avance et d'avoir déjà des connaissances sur le sujet.

Ensuite, pour permettre une bonne avancée du projet, nous nous sommes répartis la rédaction des différentes parties. Sinon, pour la réalisation de l'expérience et la rencontre avec Grégory MANRY, nous étions tous présents.

Répartition du travail



PARTIE THÉORIQUE

I - Efficacité énergétique et politique concernant la performance énergétique

1. 1. Définition

L'efficacité énergétique est une stratégie permettant de réduire les consommations énergétiques, afin d'entraîner une réduction des coûts économiques, sociaux et écologiques liés à la production d'énergie. Cette stratégie s'inscrit dans une politique de développement durable qui a débuté dans les années 1960.

1. 2. La politique mise en place concernant l'efficacité énergétique en Europe

En 2010, le Conseil Européen a confirmé que l'objectif en matière d'efficacité énergétique était l'un des objectifs majeurs de la stratégie de l'Union Européenne pour l'emploi afin d'assurer une croissance durable et intelligente.

Si l'amélioration de l'efficacité énergétique est un objectif affiché des politiques environnementales et énergétiques, son évolution réelle est soumise dans les faits à de nombreuses influences, économiques, sociales ou bien encore techniques.

1. 3. Les mesures liées aux enjeux d'efficacité énergétique dans le bâtiment

L'amélioration de la performance énergétique dans le secteur du bâtiment est un axe indispensable pour inscrire cette stratégie dans une politique de développement durable. Nous pouvons classer les différentes mesures mises en place par le gouvernement en plusieurs catégories.

Les mesures économiques visent à :

- intégrer les externalités, environnementales et économiques, liées aux consommations énergétiques, dans les démarches décisionnelles des consommateurs. Ceux-ci, ayant pour but d'acquiescer, d'améliorer ou utiliser des équipements générant ces consommations.

Les mesures financières incitatives visent à :

- réduire le coût des investissements liés à l'efficacité énergétique pour les consommateurs. Ces mesures ont pour but de déclencher des décisions d'investissement qui n'auraient pas forcément été prises autrement.

Les mesures informatives visent à :

- améliorer le renseignement auprès des consommateurs sur les importantes opportunités d'investissement disponibles sur le marché des énergies (prix, coûts, subventions).
- offrir aux futurs acquiesceurs une réelle prise de conscience liée aux gains d'efficacité énergétique dans le domaine de l'économie et de l'environnement.

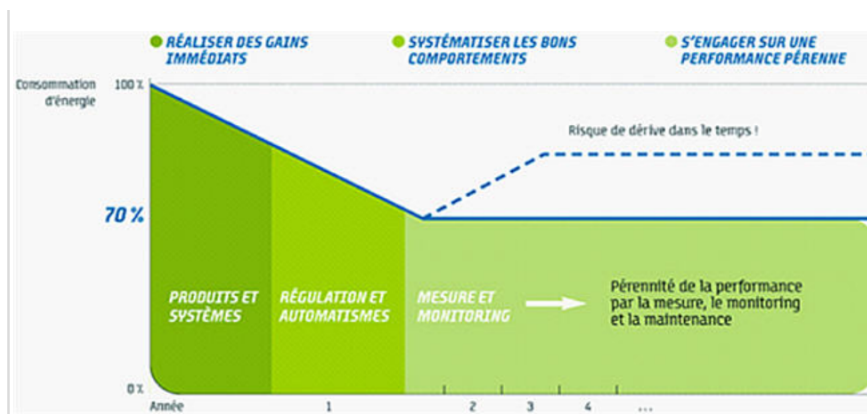
Exemples de mesures liées au domaine du bâtiment :

| <u>Cibles</u> | <u>Mesures</u> |
|--|--|
| Améliorer la performance thermique dans le domaine du bâtiment | Réduction de taxes locales / Crédit d'impôt pour les investissements d'isolation |
| | Étiquette énergie des logements et bureaux / Subventions au double vitrage |
| Investissements dans le bâtiment | Diagnostics de performance énergétique |
| Améliorer la conception des bâtiments | Normes d'isolation |

2. 1. L'efficacité énergétique active

L'efficacité énergétique se traduit au travers d'actions qui peuvent être catégorisées en deux groupes.

- L'efficacité énergétique passive, qui consiste à renouveler et améliorer le bâtiment et les systèmes énergétiques (isolation, modification du système d'éclairage, renouvellement du système de chauffage).
- L'efficacité énergétique active, qui se traduit par des techniques innovantes basées sur des produits performants et des systèmes intelligents.

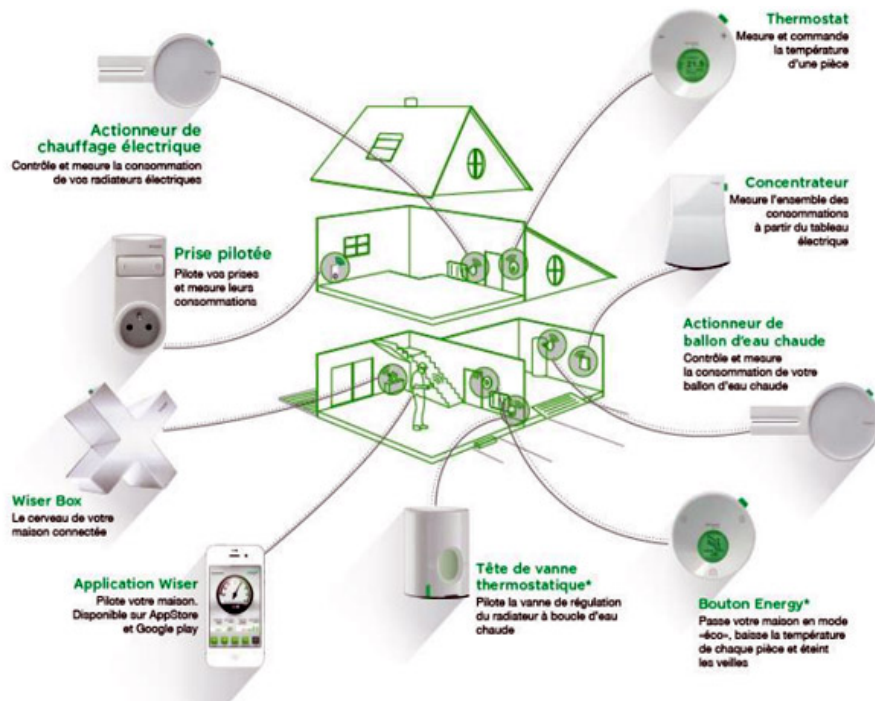


Les solutions actuelles pour augmenter l'efficacité énergétique de manière active dans le bâtiment sont la domotique (gestion du système d'éclairage et de chauffage, pilotage des ouvrants) et l'installation de systèmes pour produire de l'énergie renouvelable. (panneaux solaires, panneaux photovoltaïques, éoliennes)

Les solutions HOMES d'efficacité énergétique ACTIVE



L'efficacité énergétique active est intéressante d'un point de vue environnemental car elle permet de réduire de manière significative la surconsommation d'énergie. Cependant, elle est aussi très attractive d'un point de vue économique car elle permet de réduire considérablement la facture énergétique et le retour sur investissement est plus rapide (entre 3 à 13 ans) que pour l'efficacité énergétique passive (entre 6 et 45 ans)



II - Notions de thermique

Le formulaire associé aux grandeurs présentées se trouve en Annexe 1.

Définition

“L'énergie thermique est l'énergie cinétique d'un objet, qui est due à une agitation désordonnée de ses molécules et de ses atomes. Les transferts d'énergie thermique entre corps sont appelés transferts de chaleur et jouent un rôle essentiel en thermodynamique. Ils atteignent un équilibre lorsque la température des corps en contact est égale.”

2.1. Transfert thermique

1.1 Flux thermique

Lorsque deux faces d'un matériau de surface S et d'épaisseur e ont deux températures T_1 et T_2 différentes, un transfert thermique irréversible va s'effectuer spontanément de la source chaude vers la source froide. Le flux thermique (Watt) mesure la puissance thermique transférée à travers le matériau.

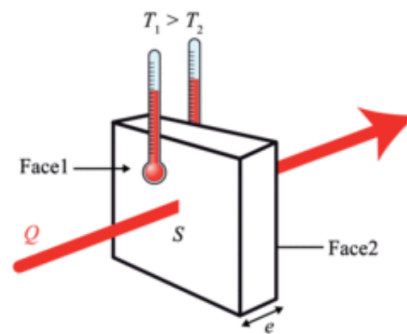


Figure 1 - flux thermique

On peut le lier à la densité de flux (W/m^2) qui correspond au flux de chaleur transmis d'un milieu à un autre par unité de surface.

Le coefficient de déperdition thermique surfacique est l'inverse de la résistance thermique surfacique totale R_T , à savoir la somme de la résistance thermique de conduction et de convection. Il sert à évaluer “la quantité de chaleur passant par seconde à travers $1 m^2$ de matériau stable pour une différence de température entre les deux ambiances de $1^\circ C$ ”. Il permet d'évaluer l'isolation d'une paroi.

2.2. Modes de transfert thermique

2.2.1. Conduction

Définition

La chaleur passe spontanément du corps chaud au corps froid par contact direct sans déplacement des atomes ou molécules. Il s'agit d'un transfert thermique par diffusion à l'échelle microscopique. La loi de Fourier permet de calculer le flux thermique par conduction $\varphi_{cond}(W)$.

La conductivité thermique “représente l'énergie (quantité de chaleur) transférée par unité de surface et de temps sous un gradient de température de 1 kelvin ou 1 degré Celsius par mètre”. Elle permet d'évaluer le caractère isolant d'un matériau. (voir annexe)

”La **résistance thermique de conduction** d’un élément exprime sa résistance au passage d’un flux de conduction thermique.” On peut faire l’analogie avec la résistance électrique qui joue le même rôle. La résistance électrique mesure la résistance au courant provoquée par une différence de potentiel.

Nous pouvons distinguer deux cas de conduction : celui d’un mur homogène et celui d’une paroi composite. On considère premièrement une paroi homogène de surface S et d’épaisseur e composée d’un matériau de conductivité. On considère ensuite un mur constitué de plusieurs couches de matériaux différents, ayant une épaisseur et une conductivité thermique différentes. Soient 1, 2, 3 les conductivités thermiques des matériaux et e_1 , e_2 et e_3 leur épaisseur.

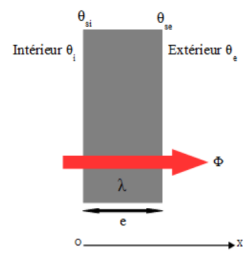


Figure 2 - mur homogène

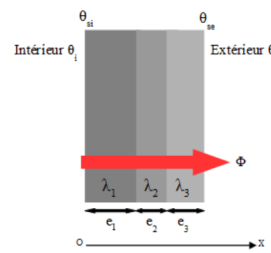


Figure 3 - mur composite

2.2.2. Convection

Définition

“La convection thermique est donc la conjugaison de deux mécanismes physiques, la diffusion moléculaire (conduction thermique) et l’advection (entraînement par le mouvement du fluide).” C’est un transfert thermique à échelle macroscopique qui n’est possible qu’avec les liquides et les gaz.

La convection peut être naturelle, dans le cas par exemple d’une casserole d’eau que l’on chauffe. L’eau chaude monte naturellement et laisse place à l’eau froide qui est chauffée à son tour.

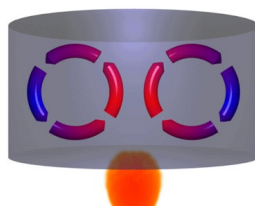


Figure 4 - Convection naturelle

Elle peut aussi être forcée lorsque la circulation d’un fluide est provoquée artificiellement, dans le cas par exemple d’un ventilateur.

La loi de Newton permet de calculer le flux thermique par convection $\varphi_{conv}(W)$.

Le coefficient de transmission thermique par convection dépend de trois facteurs : la vitesse de circulation du fluide, l’écart de température et la nature du fluide. Dans le cas d’une paroi, on distingue deux coefficients de transmission thermique par convection :

- h_i : dépend de la température à l’intérieur du local et de la face interne de la paroi;

- h_e : dépend de la température à l'extérieur du local et de la face externe de la paroi.

On peut donc définir la résistance thermique surfacique d'échange superficiel intérieur ($m^2 \cdot C/W$), qui est l'inverse du coefficient de transmission thermique par convection à l'intérieur du local. On peut aussi définir la résistance thermique surfacique d'échange superficiel extérieur ($m^2 \cdot C/W$), qui est l'inverse du coefficient de transmission thermique par convection à l'extérieur du local.

2.2.3. Rayonnement

Définition

“Tous les corps matériels, dont la température est supérieure à 0 K, sont capables d'émettre de l'énergie sous forme de rayonnement et d'en échanger entre eux. Un corps à la température T émet des ondes de plusieurs fréquences différentes et la répartition de cette énergie dépend de la température du corps. La quantité d'énergie émise est liée à la température”.

Le transfert de chaleur par rayonnement s'effectue en trois étapes :

- émission : l'énergie de la source est convertie en énergie électromagnétique.
- transmission : les ondes électromagnétiques sont propagées et éventuellement absorbées par les milieux traversés.
- réception : le rayonnement électromagnétique est converti en énergie thermique.

La loi de Stefan permet de calculer le flux thermique par rayonnement $\Phi_{ray}(W)$.

Le facteur d'émission ε dépend du matériau concerné. On distingue les corps noirs des corps gris. Les corps noirs sont considérés comme des surfaces idéales qui absorbent totalement le rayonnement reçu. Par exemple, le soleil est considéré comme un corps noir. Pour les corps noirs, $\varepsilon=1$. Parallèlement, les corps gris, ou corps réel, réfléchissent une partie du rayonnement. Dans ce cas, $\varepsilon < 1$.

2.3. Bilan énergétique d'un bâtiment

Définition : Le bilan énergétique d'un bâtiment consiste à étudier tous les apports et les déperditions thermiques de celui-ci.

2.3.1 Apports intérieurs

Il existe plusieurs sources d'énergie intérieures à la structure. Premièrement, le chauffage représente une grande partie des apports d'énergie. Ensuite, il ne faut pas négliger le rayonnement humain, l'électroménager et le multimédia qui contribuent à chauffer le bâtiment.

2.3.2 Apports extérieurs

Le rayonnement solaire représente une grande partie de l'apport énergétique. Ce rayonnement peut-être direct (et se transmettre à travers les vitrages) ou indirect (et se transmettre à travers les murs). Le choix des menuiseries et des vitrages est donc important.

2.3.3 Déperdition thermique

Les déperditions thermiques peuvent arriver de différents endroits dans le bâtiment : la toiture, les murs, le plancher, les portes et les fenêtres, par

renouvellement d'air, par les fuites et enfin par les ponts thermiques. Leur mécanisme sera développé dans la partie isolation.

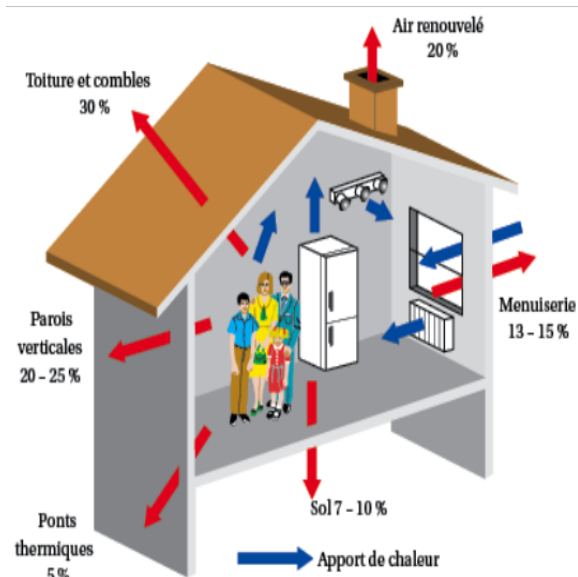


Figure 5 - *Bilan énergétique d'une habitation*

III - Isolation

3.1. Les différents isolants

L'amélioration de l'isolation d'un bâtiment est essentielle afin de permettre une réduction de nos émissions de gaz à effet de serre. Elle permet aussi de diminuer notre dépendance aux énergies fossiles et nucléaires, et de diminuer notre consommation d'énergie totale impliquant ainsi de grandes économies pour le consommateur. En France, le secteur du Bâtiment représente 25% des émissions de CO₂ mais aussi 45,8% de la consommation d'énergie nationale, ce qui en fait un des principaux responsables du réchauffement climatique.

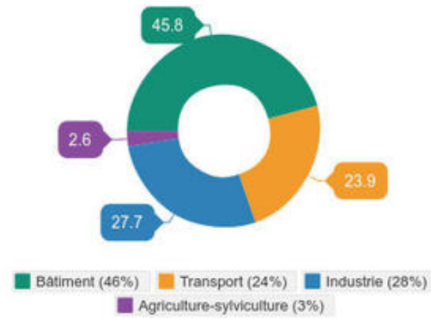
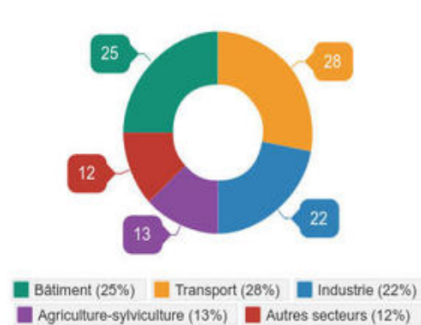


Figure 6 - Répartition des émissions de CO₂ des différents secteurs d'activité

Figure 7 - Répartition de la consommation d'énergie globale

On peut séparer un grand nombre d'isolants en différentes catégories. Il existe 5 types d'isolants et ceux-ci ont tous pour but d'isoler une pièce des transferts de chaleur.

- Les isolants minces sont des isolants constitués de plusieurs couches de feuilles d'aluminium le plus souvent avec des couches intermédiaires de mousse ou de feutre d'origine végétale par exemple. Ils ont pour objectif d'isoler des rayonnements, qui sont une grande source de pertes énergétiques.
- Les isolants en laines végétales, constitués de matière végétale comme le chanvre, le bois, la paille ... Ils ne sont que très peu polluants et ont un bon rapport prix/performance.
- Les isolants en laines animales comme la laine de mouton ou la plume de canard. Il faut néanmoins étudier leur comportement mécanique en amont car ils ne sont pas adaptés à toutes les situations.
- Les isolants en laines minérales comme la laine de verre et la laine de roche sont les plus utilisés. Ils offrent une bonne isolation thermique et acoustique à prix réduit.
- Les isolants polystyrènes sont étudiés et conçus pour répondre aux contraintes mécaniques ainsi qu'aux besoins d'isolation thermique.

3.2. Quel isolant choisir et comment ?

Il y a donc un grand choix d'isolants, il faut donc savoir lequel choisir. Il existe tout d'abord des isolants plus efficaces que d'autres car tous les matériaux ne sont pas égaux devant les transferts de chaleur. Il existe différentes grandeurs pour les caractériser. La conductivité thermique (λ) est la capacité du matériau à se laisser traverser par la chaleur (en W/(m.K)). Plus elle est faible, plus le matériau est isolant. La résistance thermique d'un matériau (R) est l'aptitude d'un matériau à ralentir le transfert de chaleur réalisé par conduction (m².K/W). Plus elle est élevée, plus le matériau est isolant.

| | λ en W/(m.K) | | R en M2K/W pour 200mm |
|--------------------|----------------------|-------|--------------------------|
| | mini | maxi | |
| Laine de verre | 0,032 | 0,040 | 5,00 |
| Laine de roche | 0,034 | 0,040 | 5,00 |
| Laine de chanvre | 0,041 | 0,044 | 4,55 |
| Polystyrène (PSE) | 0,031 | 0,038 | 5,26 |
| Liège | 0,029 | 0,035 | 5,71 |
| Plume de canard | 0,040 | 0,042 | 4,76 |
| Polyuréthane | 0,021 | 0,028 | 7,14 |
| Laine de bois | 0,038 | 0,060 | 3,33 |
| Laine de mouton | 0,039 | 0,042 | 4,76 |
| Laine de lin | 0,037 | 0,041 | 4,88 |
| ouate de cellulose | 0,038 | 0,040 | 5,00 |
| Laine de coton | 0,039 | 0,042 | 4,76 |

Tableau comparatif des différents isolants

Ensuite, on comprend qu'il n'y a pas un isolant unique pour les différentes applications. En effet, un toit s'isole différemment d'un simple mur ou même d'un sol. Certains isolants, de par leurs différentes caractéristiques sont plus propices à certaines applications.

| Application/ Type d'isolant | Combles | Plafonds | Murs | Cloisons | Sois et planchers : dessus |
|-----------------------------|---------|----------|------|----------|----------------------------|
| Laine de verre | oui | oui | oui | oui | |
| Laine de roche | oui | oui | oui | oui | oui |
| Laine de chanvre | oui | oui | oui | oui | |
| Polystyrène PSE | | | oui | oui | oui |
| Polystyrène XPS | | | | oui | oui |
| Plume de canard | oui | oui | oui | oui | |
| Polyuréthane | oui | | oui | | oui |
| Fibre de bois | oui | oui | oui | oui | oui |
| Laine de mouton | oui | oui | oui | oui | |
| Laine de lin | oui | oui | oui | oui | |
| Ouate de cellulose | oui | oui | | | |
| Laine de coton | oui | oui | oui | oui | |
| Textiles recyclés | oui | oui | oui | oui | |
| Verre cellulaire | | | | | oui |
| isolant mince (PMR) | oui | | | | |

Tableaux des différentes applications possible par isolant

Afin d'isoler correctement un bâtiment, il est nécessaire d'isoler à la fois l'intérieur et l'extérieur du bâtiment. De plus, on considère que plus de 20% des pertes de chaleur sont dues aux ouvertures sur l'extérieur telles que les portes ou les fenêtres, il est donc primordial de les isoler correctement. Pour les fenêtres par exemple, on peut opter pour un double vitrage, et il existe également des volets isolants.

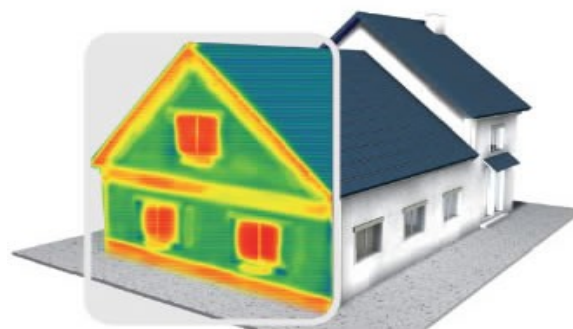
Mais tout cela n'est pas suffisant, une bonne isolation passe aussi par une isolation interne qui nécessite de prêter attention aux points problématiques comme la toiture ou le sol. De plus, l'isolation d'un mur est la partie primordiale de l'isolation d'un bâtiment. Le but est de doubler l'épaisseur du mur d'une épaisseur d'isolant sur toute la surface en contact avec l'extérieur. Le mur peut être isolé de l'extérieur ou de l'intérieur. L'isolation par l'intérieur est plus simple et moins coûteuse car elle concerne une plus petite surface et les travaux simples ne nécessitent pas l'intervention d'un professionnel. Cependant, cela réduit le volume de la pièce et ne permet pas de traiter certains ponts thermiques. L'isolation par l'extérieur est la plus efficace mais aussi la plus chère, et elle implique de disposer d'un espace autour du bâtiment et d'un permis de construire dans le cas d'une rénovation, car cela modifie l'aspect du bâtiment et augmente l'emprise au sol.

3.3. Les ponts thermiques

Les ponts thermiques sont des discontinuités, géométriques ou au sein des matériaux d'un bâtiment, responsables d'importante pertes thermiques et donc énergétiques.

Ils ont une part d'autant plus importante dans la perte thermique quand le bâtiment a une bonne isolation générale. Il existe trois grandes catégories de ponts thermiques :

- les ponts thermiques linéaires, qui se situent à la jonction entre deux murs, le plancher et un mur, le sol et un mur ou encore entre le toit et un mur. Ils sont les plus nombreux mais ne sont pas nécessairement les plus durs à résoudre.
- Les ponts thermiques ponctuels, qui se situent au niveau des angles du bâtiment, c'est-à-dire, à la jonction entre deux murs et le sol par exemple. Ces ponts thermiques sont très difficiles à éliminer du fait de leur géométrie.
- Les ponts thermiques structurels, qui se situent au sein même des isolants. Ils sont dus à la mise en place des isolants mais aussi à leur fabrication.

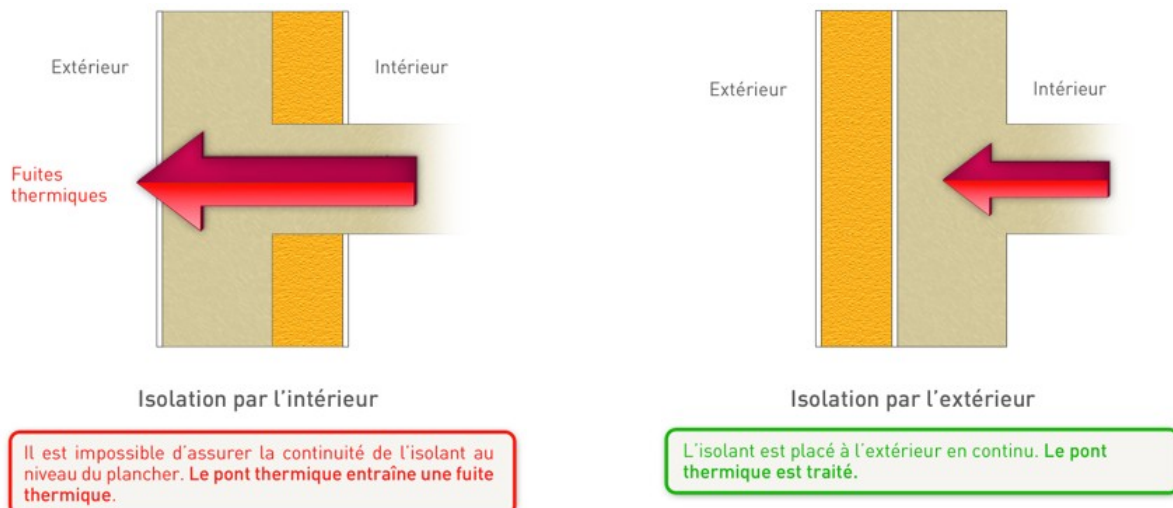


Les ponts thermiques doivent absolument être éliminés car ils sont à l'origine de nombreux désagréments économiques mais ils impactent aussi le confort thermique des usagers. Les pertes thermiques importantes se traduisent par une augmentation de la facture énergétique et par une diminution du confort thermiques, autant en été qu'en hiver puisque la climatisation et le chauffage seront plus sollicités pour pallier aux désagréables sensations de chaud en été et de froid en hiver.

Il y a aussi, à moyen et long terme, des risques sanitaires. En effet, les ponts thermiques provoquent de la condensation ce que donne naissance à de la moisissure au sein même du logement.

Pour pallier au problème des ponts thermiques, il existe plusieurs solutions :

- Dans le cas où le bâtiment n'est pas encore construit, on peut y remédier dès la conception. Pour cela, il est primordial de sélectionner les bons procédés des constructions mais aussi les bons matériaux pour l'isolation.
- Dans le cas où le bâtiment est déjà construit, on peut alors limiter voire éliminer les ponts thermiques en améliorant ou en complétant son isolation. Si les dissipations d'énergie proviennent des fenêtres, il est très simple d'y remédier en changeant le simple vitrage par du double voire même triple vitrage et en changeant la menuiserie. Sinon, le logement peut être isolé par l'intérieur ou par l'extérieur.



L'isolation par l'intérieure sera la plus économique mais sera la moins efficace. A l'inverse, l'isolation par l'extérieure sera plus onéreuse mais elle reste la plus efficace. Cette dernière permet aussi de ne pas perdre de l'espace à l'intérieur du logement. On peut aussi associer les deux types d'isolation pour rendre l'isolation d'autant plus efficace.

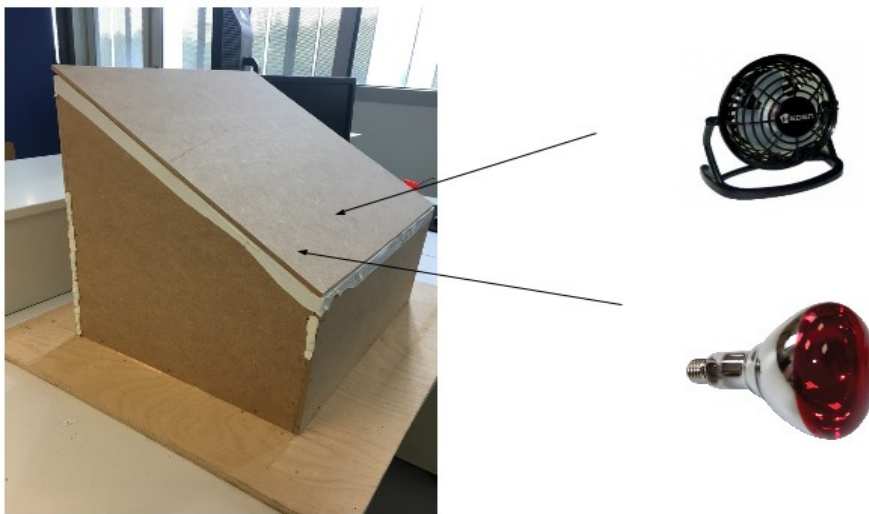
EXPÉRIENCES

But de l'expérience : Le but de l'expérience est de tester et comparer le caractère isolant de différents matériaux : liège, polystyrène et laine de verre.

Protocole :

Les matériaux utilisés pour la réalisation de la maquette sont des planches de bois, du scotch double face, de la gomme tackante, des clous, des baguettes de bois et de la colle à bois.

L'expérience débute par la conception de la maquette en bois permettant un relevé précis des températures en fonction des matériaux testés.



Nous avons, dans un premier temps, placé à l'intérieur de notre maquette une ampoule comme source de chaleur. Nous avons trouvé judicieux de placer au sein de celui-ci un ventilateur portable permettant de répartir uniformément l'air afin de permettre un relevé précis à l'aide d'une caméra thermique. (photo ci dessous)

Afin de réaliser nos différents relevés, nous avons utilisé une caméra thermique qui nous a permis d'enregistrer les différents rayonnements infrarouges émis par la source de chaleur, qui varient en fonction de leur température. La caméra thermique ne permet pas de voir derrière un obstacle ou une paroi mais elle reproduit numériquement la chaleur emmagasinée. Elle montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'intérieur.

Le modèle que nous avons utilisé est la FLUKE TI 100.



Nous avons ainsi réalisé successivement différents relevés de température de la maquette recouverte de différents isolants. Nous avons voulu vérifier leur efficacité ou inefficacité, afin de pouvoir ensuite les comparer les uns avec les autres. **LAB24**

Compte rendu :

Les relevés de l'expérience se trouvent en Annexe 3.

Nous allons calculer les flux thermiques par conduction au travers des différents isolants afin de pouvoir les comparer. En se plaçant dans le cas d'un mur homogène, nous pouvons utiliser la loi de Fourier dans la forme suivante :

$$\Phi_{\text{cond}} = (\lambda_{(\text{isolant})} / e) * S * (\theta_{\text{si}} - \theta_{\text{se}})$$

avec :

S : surface de l'élément considéré (m²);

e : épaisseur de l'élément constituant le mur (m);

$\theta_{\text{si}} - \theta_{\text{se}}$: différence des températures superficielles entre la face intérieure et la face extérieure (°C);

$\lambda_{(\text{isolant})}$: conductivité thermique du matériau (W.m⁻¹.K⁻¹).

Le but étant de comparer nos isolants, on considère seulement la température sur la face externe de l'isolant et la température sur la face externe du bois (ce qui correspond à la face interne de l'isolant). Les isolants ayant la même surface, ce paramètre est fixé.

| isolant | conductivité (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) | résistance thermique (m ² .K/W) | épaisseur (mm) |
|----------------|--|--|----------------|
| liège | 0.058 | 0.219 | 10 |
| polystyrène | 0.030 | 0.3 | 9 |
| laine de verre | 0.046 | 0.9 | 40 |

Figure : Caractéristiques des isolants.

Chaque isolant a été testé trois fois : une fois seul, positionné sur les faces gauche et arrière de la maquette et deux fois avec ce dernier sur une face et un des autres isolants sur une autre.

| isolant | si (°C) | se (°C) | Flux/S (Watt/m ²) |
|----------------|---------|---------|-------------------------------|
| liège | 31.5 | 24.6 | 40 |
| polystyrène | 29.9 | 24.5 | 18 |
| laine de verre | 30 | 22.3 | 8.9 |

Figure : Calculs de flux avec les résultats de la première expérience.

De plus, sur les relevés des essais avec deux isolants directement sur la maquette, on voit que la laine de roche affiche une température plus basse que les deux autres, ce qui appuie les résultats précédents. Néanmoins, le liège est plus froid que le polystyrène, ce qui n'est pas en accord avec le calcul précédent (les isolants ne devaient pas avoir bien refroidi).

Ces résultats semblent montrer que la laine de verre est le meilleur isolant, suivie du polystyrène puis du liège. Cependant, nous pouvons nuancer ces affirmations.

En effet, pour obtenir ces résultats, nous avons utilisé 40 mm de laine de verre contre seulement 9 et 10 mm de polystyrène et liège. La laine de verre est donc performante mais encombrante.

De plus, nous avons attendu seulement 5 minutes après avoir posé l'isolant pour faire nos mesures, ce qui est insuffisant pour laisser la chaleur correctement traverser la paroi.

Enfin le technicien Nicolas Helan qui a supervisé notre expérience nous a expliqué que les isolants emmagasinent la chaleur la journée et la rediffuse la nuit et qu'en conséquence, ce temps mis par les isolants à redistribuer la chaleur est à prendre en compte lors d'un choix d'isolant. Le choix d'un isolant dépend donc d'une multitude de paramètres à prendre en compte selon les cas.

Nous disposions aussi d'un "isolant mince", dont le but n'est pas de jouer sur la conductivité du matériau mais sur son rayonnement afin de renvoyer la chaleur. Nous n'avons cependant pas pu l'expérimenter car le métal fausse les mesures qui sont celles du corps qui rayonne. Une possibilité aurait été de coller un bout de scotch (ou d'un matériau peu réfléchissant, fin et avec une forte conductivité) pour pouvoir prendre les mesures.

ÉTUDE DE CAS

Pour illustrer notre sujet, nous avons décidé de traiter le projet ENERGIESPRONG comme étude de cas. Ce projet, d'abord lancé aux Pays-Bas, est arrivé en France en 2016 grâce à l'entreprise Greenflex. Il consiste à rénover des logements, généralement appartenant à des bailleurs sociaux. Le but de la rénovation est d'avoir $E=0$ sur une période de 30 ans, c'est-à-dire, que le logement produise autant d'énergie qu'il n'en consomme tout en ayant un confort thermique élevé.

Dans le cadre de ce projet novateur, le chantier pilote ENERGIESPRONG lancé par le bailleur social ICF Habitat a été remporté par le groupement Bouygues, Alterea, Ranson et Dalkia sur 12 maisons individuelles à Longueau (près d'Amiens). L'équipe en charge du projet a pour rôle d'adapter et de déployer la démarche sur le marché français.



Pour réaliser cette étude de cas, nous avons eu la chance de rencontrer Grégory MANRY, qui est un acteur majeur de ce projet puisqu'il est ingénieur au sein de Dalkia et il a participé à la conception du dossier pour répondre à l'appel d'offre d'ICF Habitat.

Cette rencontre nous a permis d'avoir toutes les informations nécessaires pour réaliser notre étude cas.

Ainsi, pour parvenir à l'objectif $E=0$, Les logements sont rénovés car ce sont de vraies passoires thermiques. Des panneaux solaires photovoltaïques sont donc installés sur les toits, des systèmes CVC intelligents sont mis en place et une isolation par l'extérieure est réalisée.

L'isolation se fait à l'aide de panneaux préfabriqués ce qui permet de faire la rénovation en seulement une semaine et aussi permettre aux locataires de rester chez eux le temps des travaux. Les panneaux préfabriqués ont un intérêt en terme d'isolation mais ils permettent aussi de revaloriser les façades, de par leur esthétisme de qualité.

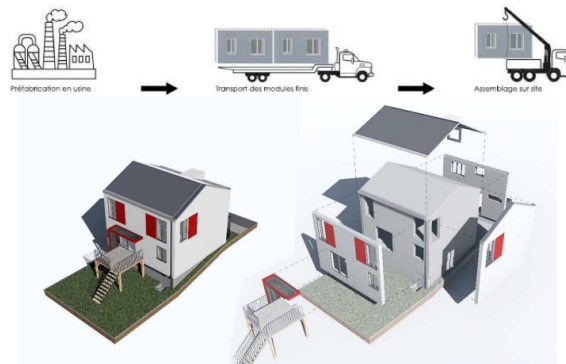
L'installation est garantie 30 ans et n'implique pas de surcoût pour les locataires car les économies faites sur les dépenses énergétiques servent à financer l'installation. Ainsi, la maintenance et l'exploitation se fait par l'entreprise Dalkia sur toute la période des 30 ans.

Nous allons maintenant vous expliquer plus en détails la réalisation du projet ENERGIESPRONG sur les 12 logements à Longueau.

Initialement, ces logements étaient chauffés au gaz, grâce à une chaudière individuelle gaz. Ainsi, la première modification consiste à rendre le logement tout électrique. Pour ce faire, les chaudières sont remplacées par des PAC. Dans ce projet, il a été décidé de mettre un module énergétique pour trois logements pour des raisons économiques mais aussi d'efficacité. De plus, dans la cuisine, la gazinière est remplacée par une

plaque vitrocéramique et dans la salle de bain, la baignoire est remplacée par une douche pour limiter la surconsommation d'eau et d'énergie.

L'énergie est produite par des panneaux solaires photovoltaïques, qui ont une durée de vie de 30 ans. Leur efficacité maximale est atteinte au bout de 3 ans environ et diminue peu à peu.

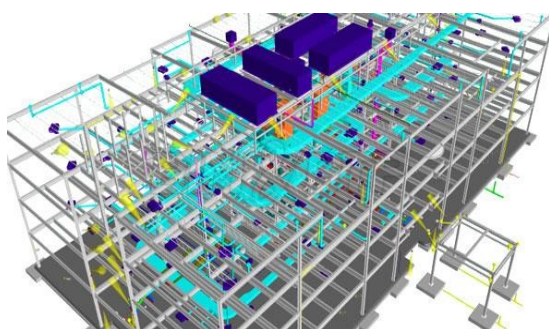


En terme d'isolation, les façades ont été préfabriquées par un entrepreneur local afin de limiter les coûts liés au transport. Une façade nécessite environ 6 semaines de fabrication. Ces façades font 320 mm d'épaisseur et sont composées de différentes couches. En effet, elles sont constituées d'un pare vapeur agrafé sur les montants en ossature bois, d'un montant en épicea en 45x220 avec un entraxe de 0.6 m, de laine de verre de 220 mm semi rigide entre les montants en ossature bois, de laine de roche de 80 mm fixée par des agrafes, de panneaux d'OSB3 en 12 mm remplissant le rôle de contreventement et d'un pare pluie fixé sur l'OSB par des agrafes. Enfin, La vêtture est du type panneaux composites avec une ossature bois, du polyrey de 8 mm fixé à l'aide de vis, d'une tôle laquée aluminium et d'une fausse lucarne en structure bois, y compris l'habillage en tôle laquée. L'isolation passe aussi par le changement de la verrerie qui sera donc désormais du double vitrage avec une menuiserie en PVC.



Nous avons vu que pour atteindre l'objectif $E=0$, ce projet repose sur l'efficacité énergétique active et passive. Toutefois, il est aussi important de sensibiliser les locataires aux bons gestes du développement durable. Ainsi, un système de coaching énergétique a été mis en place. Il a pour but d'apprendre aux locataires d'appréhender le projet dans les meilleures conditions en expliquant son objectif et son fonctionnement. Le coaching se fera aussi par la pose de capteurs contacts au niveau des portes et fenêtres et des capteurs thermiques sur les reprises de VMC. Ces capteurs permettront d'enregistrer les comportements des locataires et ainsi les accompagner pour adopter des réflexes du développement durable.

D'un point de vue juridique, le projet ENERGIESPRONG est plus difficile à mettre en œuvre qu'aux Pays-Bas, car en France il faut obtenir un permis de construire puisque les façades rajoutées augmentent l'emprise au sol du logement.

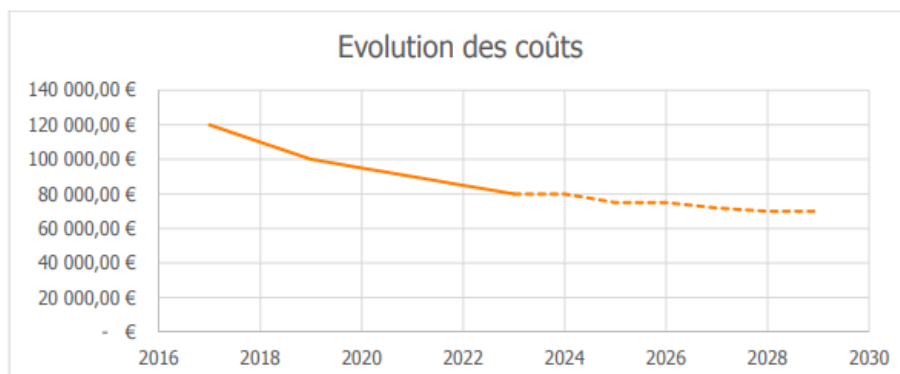


Dans ce projet, il a été décidé de mettre en place le BIM exploitation. Le BIM exploitation est une modélisation 3D du logement avec l'ensemble des canalisations et des réseaux électriques notamment, ce qui facilite la maintenance en simplifiant le travail

du technicien. Cette décision a été prise car le projet de Longueau est un projet pilote et donc il était important pour Dalkia d'utiliser des outils technologiques comme celui-ci.

La première façade du projet a été posée le 25 Mai et une inauguration aura lieu le 25 Juin. Pour les projets ENERGIESPRONG à venir, il est prévu de mettre en place une usine mobile afin de limiter les coûts de transport des façades mais aussi pour réduire l'empreinte carbone du chantier. De plus, au fil des projets les coûts liés à l'étude et à l'installation pourront être réduits. Actuellement, un projet de rénovation sur 160 logements à Wattrelos (près de Roubaix).

| Planification | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 |
|------------------------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Unités de lgt | 10 | 500 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Coût par lgt yc études | 120 k € | 105 k€ | 100 k€ | 95 k€ | 90 k€ | 85 k€ | 75 k€ | 72 k€ | 70 k€ | 70 k€ |



CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour conclure, nous pouvons dire que le sujet du projet est très actuel, comme l'illustre parfaitement notre étude de cas. En effet, la question de la transition énergétique avec des bâtiments à haute efficacité énergétique se pose car nous développons chaque jour de nouvelles technologies consommatrices d'énergie mais nous produisons aussi beaucoup trop de gaz à effet de serre. Comme nous l'avons vu au travers de ce rapport, des solutions pour lutter contre les pertes de chaleur et les dépenses inutiles d'énergie existent et sont mises en œuvre.

Dans ce projet, nous avons découvert ce qu'est l'efficacité énergétique. Nous en savons aussi plus sur les caractéristiques des isolants, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons expérimenté la théorie sur la qualité de certains isolants comme le polystyrène, le liège et la laine de verre avec une maquette et une caméra thermique. Et enfin, nous avons approfondi nos connaissances sur le projet ENERGIESPRONG grâce à des recherches, mais surtout grâce à Grégory MANRY qui a pris le temps de nous parler plus en détails de son projet et de répondre à nos questions.

Ce projet nous a aussi permis de développer de nouvelles compétences. En effet, nous avons dû développer notre autonomie ainsi que notre esprit d'équipe. Nous avons aussi dû prendre des initiatives pour réaliser notre étude de cas et notre expérience. Lors de ce projet, nous avons aussi amélioré notre capacité d'écoute au sein du groupe. Nous avons aussi dû améliorer nos prestations écrites et orales.

Pour finir, ce projet nous a apporté une grande richesse d'un point de vue personnel puisque nous avons acquis de nouvelles connaissances scientifiques, mais cela nous a aussi permis de découvrir davantage le projet ENERGIESPRONG et de rencontrer des gens passionnés par leur travail.

Pour conclure ce projet, Grégory MANRY nous a généreusement proposé de nous accompagner sur le chantier de Longueau. Ainsi, nous irons voir le résultat final le 27 juin, à la suite de notre soutenance orale. Ce sera aussi une occasion pour chacun d'entre nous d'en apprendre encore plus sur un sujet, auquel nous pourrions être confronté en temps qu'ingénieurs, qui est la transition énergétique.

BIBLIOGRAPHIE

- <http://www.actis-isolation.com/news/120pdf11.pdf>
- Malek JEDIDI Omrane BENJEDDOU. La thermique du bâtiment. DUNOD, 2016. 198. Collection technique & ingénierie. ISBN 978-2-10-074343-8.
- Cours d'Initiation aux transferts thermiques. Chap II Conduction. L.ESTEL. INSA de Rouen. 2015.
- Technique de l'ingénieur. Convection thermique et massique - Principes généraux. Jacques PADET. 2005.
- <https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/exigences-reglementaires-construction-des-batiments>
- <http://encyclopedie-energie.org/articles/les-politiques-d'efficacite-energetique-problematiques-moyens-et-outils-d'evaluation>
- http://www.2020energy.eu/sites/default/files/pdf/efficacite_energetique.pdf
- http://eolehna1.pagespro-orange.fr/fichiers/r_cochet.pdf
- www.gimelec.fr/content/download/975/8570/version/4/file/Plaque_Efficacite-Energetique_Active_avril20081-2010-00804-01-E.pdf
- <http://www.pont-thermique.fr/>
- <http://www.toutsurlisolation.com/Isolation-thermique/Reussir-son-isolation-thermique/Qualite-de-mise-en-aeuvre/Les-ponts-thermiques>
- <https://www.placo.fr/Solutions/Solutions-par-benefice/Isolation-thermique/Isolation-thermique>
- <http://www.energiesprong.fr/index.php/actualite/>

CRÉDITS D'ILLUSTRATION

- Image de couverture : <http://www.avelyse.fr/>
- Figure 1 - reussite-bac.com, Transferts d'énergie entre systèmes macroscopiques
- https://www.reussite-bac.com/imprimer/revisions/TS/physique-chimie/fiches-de-revision/transferts-d-energie-entre-systemes-macroscopiques-t_pch18
- Figure 4 - Wikipédia, Convection, https://fr.wikipedia.org/wiki/Convection#Convection_naturelle
- Figure 5 - Annabac.com, Bilan énergétique d'une habitation. <https://www.annabac.com/annales-bac/bilan-energetique-d-une-habitation>
- https://www.placo.fr/var/placo/storage/images/media/images/le-batiment-emissions-de-co2/1818460-1-fre-FR/Le-batiment-emissions-de-CO2_large.jpg
- https://www.placo.fr/var/placo/storage/images/media/images/consommation-d-energie-du-batiment/1818463-1-fre-FR/Consommation-d-energie-du-batiment_large.jpg

ANNEXES

Annexe 1 – Notions de thermique : formulaire

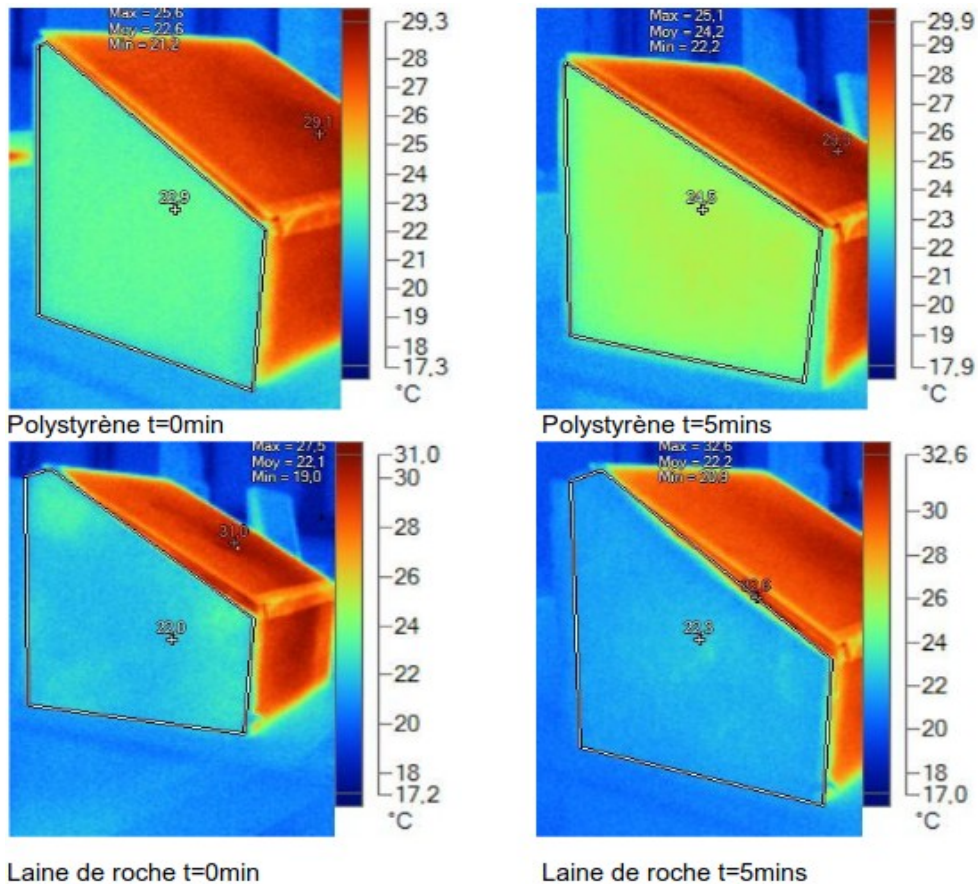
| Variable | Expression | |
|--------------------------------------|--|--|
| Chaleur | | |
| Quantité de chaleur | $Q = m * C * \Delta\theta$ | Q: Quantité de chaleur sensible (J) m: masse du corps (kg) $\Delta\theta$: différence de température entre l'état initial et l'état final (°C) C: chaleur massique (J/kg°C), chaleur nécessaire pour élever la température d'un corps de 1°C. |
| Transfert thermique | | |
| Flux thermique | $\phi = \frac{Q}{\Delta t}$ | ϕ : flux thermique; Q: quantité de chaleur transférée (J); Δt : durée du transfert (s). |
| Densité de flux | $\varphi = \frac{\phi}{S}$ | φ : densité de flux; ϕ : flux thermique (W); S: surface (m²). |
| Flux thermique à travers une surface | $\phi = U * S * (\theta_1 - \theta_2)$ | S: surface d'échange (m²); $\theta_1 - \theta_2$: différence de température entre l'extérieur et l'intérieur (K ou °C); U: coefficient de déperdition thermique surfacique (W/m²°C). |
| Coefficient de déperdition thermique | $U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \sum \frac{e}{\lambda}}$ $= \frac{1}{r_i + r_e + \frac{e}{\lambda}}$ | h_i : coefficient de transmission thermique intérieur par convection (W/m²°C); h_e : coefficient de transmission thermique extérieur par convection (W/m²°C); e: épaisseur de la paroi (m); λ : conductivité thermique du matériau (W/m°C); r_i : résistance thermique d'échange superficiel intérieur (m²°C/W); r_e : résistance thermique d'échange superficiel extérieur (m²°C/W). |

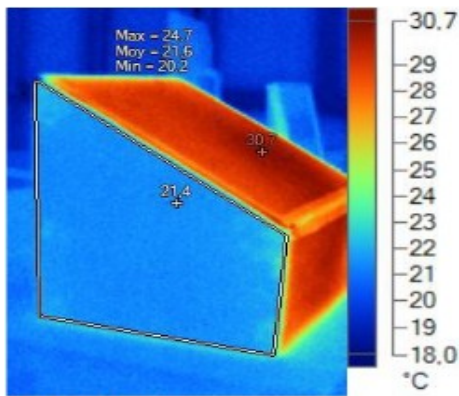
| | | |
|--|---|---|
| Flux thermique par conduction (loi de Fourier) | $\phi_{cond} = - \lambda * S * \frac{d\theta}{dx}$ | S: surface de l'élément considéré (m ²); dθ/dx: variation de la température par unité de longueur lorsqu'on se déplace dans la direction de propagation de la chaleur; λ: conductivité thermique du matériau exprimé (W.m ⁻¹ .K ⁻¹). |
| Cas d'un mur homogène | $\phi_{cond} = \frac{\lambda}{e} * S * (\theta_{si} - \theta_{se})$ | S: surface de l'élément considéré (m ²); e: épaisseur du matériau (m); θ _{si} - θ _{se} : différence des températures superficielles entre la face intérieure et la face extérieure (°C); λ: conductivité thermique du matériau (W.m ⁻¹ .K ⁻¹). |
| Résistance thermique (mur homogène) | $R = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{\phi_{cond}} = \frac{e}{\lambda * S}$ | φ _{cond} : flux thermique par conduction dissipé à travers le mur (W); S: surface de l'élément considéré (m ²); e: épaisseur du matériau (m); θ _{si} - θ _{se} : différence des températures superficielles entre la face intérieure et la face extérieure (°C); λ: conductivité thermique du matériau (W.m ⁻¹ .K ⁻¹). |
| Cas d'un mur composite | $\phi_{cond} = \frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{e_3}{\lambda_3}} * S * (\theta_{si} - \theta_{se})$ | S: surface de l'élément considéré (m ²); e1, e2, e3: épaisseurs des éléments constituant le mur (m); θ _{si} - θ _{se} : différence des températures superficielles entre la face intérieure et la face extérieure (°C); λ1, λ2, λ3: conductivités thermiques des matériaux (W.m ⁻¹ .K ⁻¹). |
| Résistance thermique (mur composite) | $R = \sum_{i=1}^n R_i$ | |
| Flux thermique par convection (loi de Newton) | $\phi_{conv} = h_c * S * (\theta_1 - \theta_2)$ | S: Surface de l'élément (m ²); θ ₁ - θ ₂ : différence de température intérieure et extérieure (°C); h _c : coefficient d'échange convectif (w/m ² °C). |
| Résistance thermique | $r_i = \frac{1}{h_i} \text{ et } r_e = \frac{1}{h_e}$ | |
| Flux thermique par rayonnement (loi de Stefan) | $\phi_{ray} = \varepsilon * \sigma * S * (T_s^4 - T_a^4)$ | φ _{ray} : flux thermique par rayonnement (W); S: surface d'échange (m ²); σ: constante de Stefan-Boltzmann égale à 5,67 10 ⁻⁸ W/m ² .K ⁴ ; T _s : température de la surface du mur (K); T _a : température ambiante (K); ε: facteur d'émission ou émissivité du matériau. |
| Flux thermique par rayonnement simplifié | $\phi_{ray} = h_r * S * (T_1 - T_2)$ | > φ _{ray} : flux thermique par rayonnement (W); > S: surface d'échange (m ²); > T ₁ : température la plus chaude (K ou °C); > T ₂ : température la plus froide (K ou °C); > h _r : coefficient de transmission thermique par rayonnement (W/m ² °C). avec h _r = 4 * ε * σ * T _m ³ |

Annexe 2 - Conductivité thermique de quelques matériaux

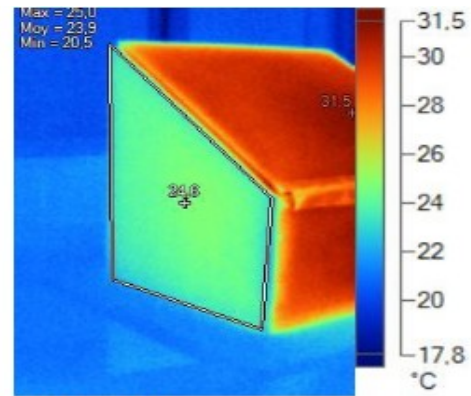
| Matériaux | Conductivité (W/m.K) |
|----------------------------|----------------------|
| Air sec immobile | 0.0262 |
| Marbre | 2.5 |
| Verre | 0.5 à 1 |
| Eau | 0.6 |
| Laine | 0.05 |
| Liège | 0.05 |
| Paille | 0.0404 |
| Béton ordinaire | 1.6 à 2.1 |
| Terre sèche | 0.17 à 0.58 |
| Bois | 0.13 à 0.2 |
| Mousse d'EPDM (élastomère) | 0.04 |
| Mousse de polyuréthane | 0.025 |
| Polystyrène | 0.04 |
| Aluminium 2 | 237 |
| Acier doux 2 | 46 |

Annexe 3 - Relevés de l'expérience

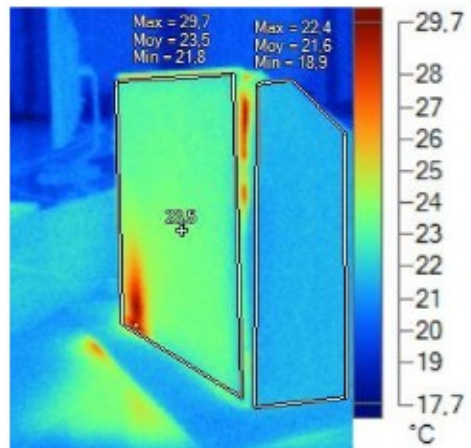
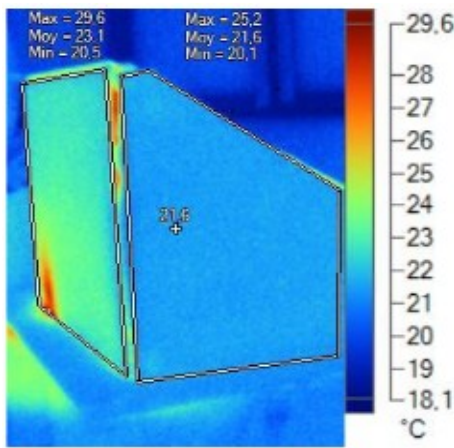




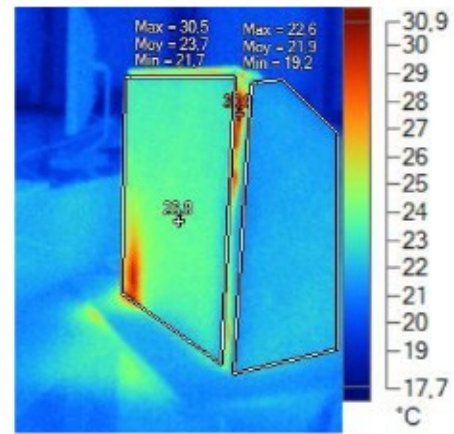
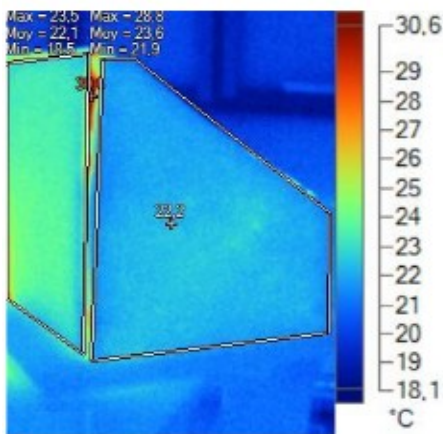
Liège-t=0min



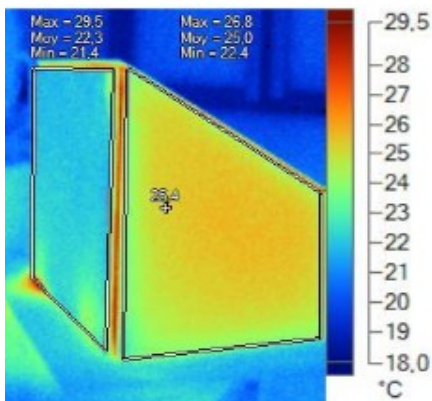
Liège t=5mins



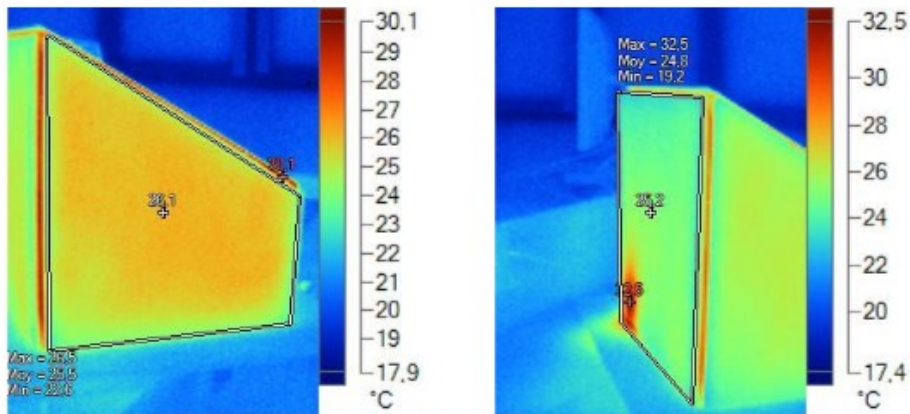
Laine de roche (photo de gauche) et polystyrène (photo de droite) à t=0min



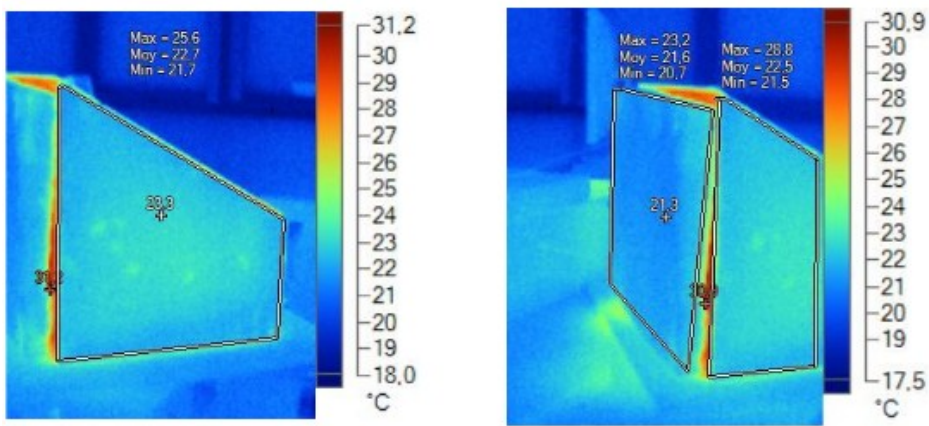
Laine de roche (photo de gauche) et polystyrène (photo de droite) à t=5mins



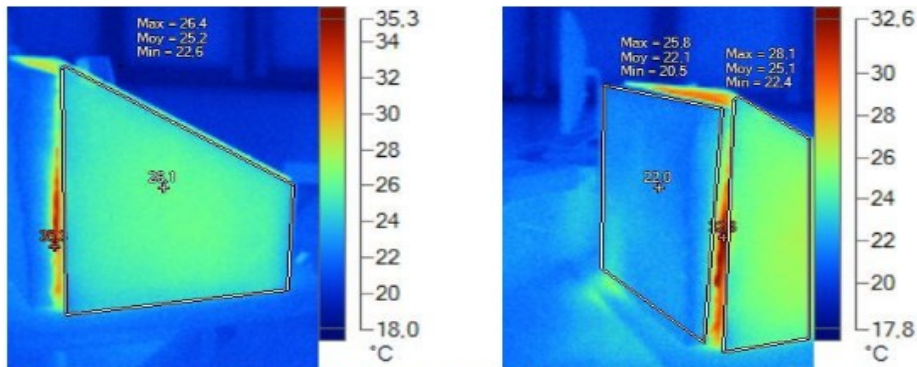
Polystyrène (face de côté-photo de droite) et liège (face arrière) à t=0min



Polystyrène (face de côté-photo de droite) et liège (face arrière) à t=5mins



Liège (photo de gauche) et laine de roche (photo de droite) à t=0min.



Liège (photo de gauche) et laine de roche (photo de droite) à t=5mins.