

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Energétique.  
Spécialité : Energétique.

## Thème

# Modélisation d'un pont thermique dans une structure d'un bâtiment - Structure 3D entre deux étages

Présenté Par :

- 1) Mr.HADJ ACHOUR Housseem Eddine
- 2) Mr. MEHADJI RAHOU Abdelilah

Devant le jury composé de :

Hamidou BENZENINE		Université d'Ain Temouchent	Président
Bouhelal GUENDOZ		Université d'Ain Temouchent	Examinateur
Abdelhakim DORBANE		Université d'Ain Temouchent	Encadrant

*Année universitaire 2022/2023*

# Dédicace

Je dédie ce travail

À mes parents, pour vous mon père, pour vous ma mère Je témoigne ma grande reconnaissance et mon profond amour que Dieu vous garde. À mes frères et messœurs. À toute ma famille. À tous mes amis et bien aimés. À tous ceux qui vont collaborer à ma formation

*ABDELILAH*

# Dédicace

Je dédie ce travail à mon père, qui est à la fois mon modèle de vie, mon professeur et ma source d'inspiration inépuisable.

À ma mère, toi qui possèdes un paradis sous tes pieds et qui es la source inégalée d'affection et d'amour dans ma vie.

À mon frère et ma sœur, mes compagnons de route, avec qui j'ai partagé tant de moments précieux.

À ma famille, pilier solide sur lequel je m'appuie et qui m'a soutenu tout au long de cette aventure.

Et enfin, à tous mes amis proches, qui ont été présents à chaque étape de ce parcours et ont apporté leur soutien indéfectible.

Votre amour, votre encouragement et votre soutien ont été essentiels pour mener à bien ce travail, et je vous en suis profondément reconnaissant.

***HOUSSEM***

## Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude envers le bon Dieu, notre créateur, pour nous avoir accordé la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail de fin d'études.*

*Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements à notre encadreur, le Dr. DORBANE Abdelhakim, pour ses précieux conseils, son soutien constant et son expertise qui ont grandement contribué à l'aboutissement de notre projet.*

*Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont partagé leurs connaissances et leur expérience avec nous tout au long de notre étude. Leur engagement et leur dévouement ont été d'une grande importance pour notre apprentissage.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont apporté leur aide et leur soutien pendant notre parcours académique, en particulier nos familles. Leur amour, leur encouragement et leur soutien indéfectible ont été des sources d'inspiration et de motivation tout au long de notre parcours.*

*Nos sincères remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de ce travail. Nous sommes reconnaissants de votre soutien et de votre confiance.*

## Résumé

Notre projet de fin d'étude porte sur l'étude approfondie du transfert de chaleur entre un bâtiment à deux étages et son environnement extérieur. Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé la perte de chaleur à travers les ponts thermiques présents dans la structure du bâtiment. Afin de réduire ces pertes, nous avons proposé l'utilisation d'un isolant thermique pour minimiser les transferts de chaleur indésirables. En utilisant des simulations thermiques, nous avons évalué les performances énergétiques du bâtiment dans différents scénarios, en prenant en compte des températures hivernales de 0°C et des températures estivales de 40°C. À partir de ces résultats, nous avons formulé des recommandations concrètes pour optimiser l'efficacité énergétique du bâtiment et réduire son impact environnemental. En conclusion, notre projet offre des orientations pratiques pour améliorer le confort thermique, réduire la consommation d'énergie et favoriser la durabilité dans le domaine de la construction.

## ملخص

يركز مشروع التخرج لدينا على الدراسة المتعمقة لانتقال الحرارة بين مبنى مكون من طابقين وبيئته الخارجية. كجزء من هذه الدراسة، قمنا بتحليل فقدان الحرارة من خلال الجسور الحرارية الموجودة في هيكل المبنى. من أجل تقليل هذه الخسائر، اقترحنا استخدام العزل الحراري لتقليل انتقال الحرارة غير المرغوب فيه. باستخدام المحاكاة الحرارية، قمنا بتقييم أداء الطاقة للمبنى في سيناريوهات مختلفة، مع مراعاة درجات حرارة الشتاء البالغة 0 درجة مئوية ودرجات حرارة الصيف 40 درجة مئوية. بناءً على هذه النتائج، قمنا بصياغة توصيات محددة لتحسين كفاءة الطاقة في المبنى وتقليل تأثيره البيئي. في الختام، يقدم مشروعنا إرشادات عملية لتحسين الراحة الحرارية وتقليل استهلاك الطاقة وتعزيز الاستدامة في البناء.

## Abstract

Our graduation project focuses on the in-depth study of heat transfer between a two-floors building and its external environment. As part of this study, we analyzed the heat loss through the thermal bridges present in the building structure. In order to reduce these losses, we have proposed the use of thermal insulation to minimize unwanted heat transfer. Using thermal simulations, we evaluated the energy performance of the building in different scenarios, taking into account winter temperatures of 0°C and summer temperatures of 40°C. Based on these results, we have formulated concrete recommendations to optimize the building's energy efficiency and reduce its environmental impact. In conclusion, our project offers practical guidance to improve thermal comfort, reduce energy consumption and promote sustainability in construction.

# Table des matières

<b>Introduction Générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I. Généralités sur le pont thermique.....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	4
I.2 Generalites sur le transfert de chaleur .....	4
I.2.1 Modes de transfert de chaleur.....	4
I.3 Notions thermiques.....	7
I.3.1 Le flux de chaleur .....	7
I.3.2 La température .....	8
I.3.3 La résistance thermique .....	8
I.3.4 Analogie électrique .....	9
I.3.5 La conductivité thermique .....	10
I.3.6 Le coefficient de convection thermique.....	11
I.3.7 Les nombres adimensionnels .....	11
I.4 Les ponts thermiques .....	13
I.4.1 Le but des ponts Thermiques .....	13
I.4.2 Types de ponts thermiques.....	14
I.4.3 Application des ponts thermiques.....	18
I.5 L'isolation thermique .....	19
I.5.1 Les méthodes d'isolation thermique.....	20
<b>Chapitre II. Etude bibliographique.....</b>	<b>23</b>
<b>Chapitre III. Modélisation et Méthodologie .....</b>	<b>35</b>
III.1 La modélisation 3D.....	36
III.1.1 Fonctionnement de la modélisation 3D.....	36
III.1.2 Les types de modélisation 3D.....	36
III.1.3 Les étapes de modélisation 3D .....	38
III.2 Methodologie .....	39

III.2.1	Description de la méthode de modélisation 3D utilisée pour étudier le pont thermique	39
III.2.2	Présentation des données d'entrée nécessaires pour la modélisation.....	40
III.2.3	Les étapes de la modélisation numérique du pont thermique.....	40
<b>Chapitre IV.</b>	<b>Étude de cas.....</b>	<b>42</b>
IV.1	Description de la structure du bâtiment étudié .....	43
IV.2	Géométrie et conditions aux limites .....	43
IV.3	Simulation du transfert de chaleur à travers le pont thermique .....	44
IV.3.1	Maillage.....	45
IV.4	Resultats et discussions.....	46
IV.4.1	Premier cas .....	46
IV.4.2	Deuxième cas.....	49
IV.4.3	Comparaison entre les deux cas.....	52
IV.5	Conclusion du chapitre IV .....	53
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>55</b>
	<b>Perspectives.....</b>	<b>57</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>58</b>

# Liste des figures

Figure I-1 Transfert de chaleur par conduction. [1].....	5
Figure I-2 Illustration d'échange convectif entre un milieu fluide et une surface. [4].....	6
Figure I-3 Répartition du rayonnement solaire reçu par une surface. [6].....	7
Figure I-4 Schéma électrique équivalent des résistances thermiques parallèles. [9] .....	9
Figure I-5 Schéma électrique équivalent des résistances thermiques en série. [9].....	10
Figure I-6 Illustration de la différence de conductivité thermique de quelques matériaux usuels. [11] .....	10
Figure I-7 Ponts thermiques des liaisons [21].....	15
Figure I-8 Pont thermique ponctuel. [22] .....	16
Figure I-9 Pont thermique structurel. [23] .....	17
Figure I-10 Ponts thermiques intégrés. [21] .....	18
Figure I-11 Isolant intérieur (gauche) et extérieur (droite) dans une jonction plancher-mur. [24] .....	19
Figure I-12 Isolation par l'intérieure et par l'extérieure. [26] .....	20
Figure I-13 Principe d'isolation du plancher par le bas. [27] .....	21
Figure I-14 Principe d'isolation de la toiture. [28].....	21
Figure II-1 Résumé graphique de l'article "Transient modeling of high-inertial thermal bridges in buildings using the equivalent thermal wall method".....	25
Figure II-2 La précision de la détection des défauts augmente après l'application de la procédure mathématique IF.....	26
Figure II-3 Résumé graphique de l'article scientifique: « Slab-on-grade thermal bridges: A thermal behavior and solution review » .....	28
Figure II-4 Schéma des Ponts thermiques constructifs/structuraux .....	30
Figure III-1 Types de modèles 3D. ....	38
Figure IV-1 La géométrie du model étudié.....	43
Figure IV-2 Maillage (physics-controlled meshing).....	45
Figure IV-3 Variation des températures maximales et minimales à travers la structure .....	47
Figure IV-4 Variation des températures minimales et maximales au sein du premier étage ( $\alpha$ ) .....	47



Figure IV-5 Variation des températures minimales et maximales au sein du deuxième étage ( $\beta$ ) .....48

Figure IV-6 Variation des températures maximales et minimales à travers la structure .....50

Figure IV-7 Variation des températures minimales et maximales au sein du premier étage ( $\alpha$ ) .....51

Figure IV-8 Variation des températures minimales et maximales au sein du deuxième étage ( $\beta$ ) .....51

## Liste des tableaux

Tableau IV.1 Propriétés thermiques et physiques des matériaux utilisés .....44

Tableau IV.2 récapitulatif des températures minimales et les flux de chaleur pour le cas 1 .....46

Tableau IV.2 récapitulatif des températures minimales et les flux de chaleur pour le cas 2 .....49

# Introduction Générale

L'efficacité énergétique est une préoccupation majeure pour le secteur de la construction en raison de l'impact environnemental et économique de la consommation d'énergie dans les bâtiments. En effet, les bâtiments représentent une part importante de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, notamment pour le chauffage, la ventilation et la climatisation.

Pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, il est donc crucial de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage en limitant les pertes de chaleur. Les ponts thermiques sont des zones dans la structure d'un bâtiment où la chaleur se perd plus rapidement, entraînant des pertes de chaleur et une surconsommation d'énergie pour le chauffage.

Ainsi, la compréhension de l'impact des ponts thermiques sur les pertes de chaleur et la performance énergétique des bâtiments est essentielle pour proposer des solutions visant à réduire la consommation énergétique des bâtiments. C'est dans ce contexte que ce projet de fin d'études se propose de modéliser numériquement un pont thermique dans une structure de bâtiment en 3D à l'aide du logiciel COMSOL 5.6.

## Présentation du sujet de recherche

Le sujet de notre projet de fin d'études (PFE) porte sur l'étude du transfert de chaleur dans un bâtiment composé de deux étages, en prenant en compte les variations de température extérieure et intérieure. Nous nous intéressons particulièrement aux effets des ponts thermiques sur les pertes de chaleur et l'efficacité énergétique du bâtiment.

## Objectifs du PFE

Les objectifs de notre projet de fin d'études sont les suivants :

- 1 Analyser et comprendre les mécanismes de transfert de chaleur dans le bâtiment, en mettant l'accent sur les ponts thermiques et leur impact sur les pertes de chaleur.
- 2 Évaluer les performances énergétiques du bâtiment en termes de consommation d'énergie et de régulation thermique, en tenant compte des différentes conditions climatiques.

## **Justification de l'étude**

L'étude sur la modélisation d'un pont thermique dans une structure de bâtiment en 3D est justifiée par la nécessité d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments existants ou en cours de construction. Les ponts thermiques peuvent avoir un impact important sur les pertes de chaleur et donc sur la consommation énergétique des bâtiments.

L'utilisation des ponts thermiques est bénéfique pour améliorer le confort thermique dans les bâtiments. Les ponts thermiques sont des zones de la structure où le transfert de chaleur est plus élevé, ce qui peut entraîner des variations de température, des sensations d'inconfort et des pertes de chaleur.

En identifiant et en comprenant les ponts thermiques présents dans un bâtiment, il est possible de mettre en place des solutions efficaces pour les minimiser ou les éliminer. Cela permet d'améliorer l'isolation thermique du bâtiment, de réduire les pertes de chaleur et de maintenir une température intérieure plus stable.

En éliminant les ponts thermiques, on peut éviter les courants d'air froid, les surfaces froides, les sensations de paroi froide et les problèmes de condensation, ce qui contribue à un meilleur confort thermique pour les occupants. Un environnement intérieur thermiquement confortable favorise le bien-être des occupants et peut même avoir des effets positifs sur leur productivité et leur santé.

De plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments grâce à la réduction des ponts thermiques permet de réduire la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation. Cela se traduit par des économies financières pour les occupants et une réduction de l'empreinte environnementale liée à l'utilisation d'énergie.

## Chapitre I. **Généralités sur le pont thermique**

---

Le chapitre 1 donne une introduction générale sur le pont thermique, en mettant l'accent sur le transfert de chaleur. Il présente les différents modes de transfert de chaleur, tels que la conduction, la convection et le rayonnement. Ensuite, il aborde les notions thermiques essentielles, telles que le flux de chaleur, la température, la résistance thermique, l'analogie électrique, la conductivité thermique, le coefficient de convection thermique et les nombres adimensionnels. Le chapitre se concentre ensuite sur les ponts thermiques, expliquant leur but, les différents types de ponts thermiques et leurs applications. Enfin, l'importance de l'isolation thermique est abordée, avec une présentation des différentes méthodes d'isolation thermique utilisées.

---

## **I.1 Introduction**

Un bâtiment se compose de composants variables tels que les murs, les toits, les fondations, dans lesquels plusieurs changements physiques tels que la chaleur, l'humidité et le transfert d'air s'appliquent. Ces processus physiques déterminent le rendement du bâtiment.

La conception du bâtiment devrait faire appel à des matériaux/isolants rationnels et éviter les bords et les coins inutiles, car ils forment des ponts thermiques, ce qui augmente les pertes de chaleur.

Ce chapitre présente donc les notions de base du transfert de chaleur, les ponts thermiques et leurs isolations, ainsi que la modélisation 3D et ses différents types et étapes.

## **I.2 Generalites sur le transfert de chaleur**

Le transfert de chaleur est une discipline d'ingénierie qui concerne la production, l'utilisation, la conversion et l'échange de chaleur (énergie thermique) entre les systèmes physiques. C'est l'interaction énergétique qui résulte d'une différence de température entre deux corps.

### **I.2.1 Modes de transfert de chaleur**

Le transfert de chaleur peut s'effectuer au moyen de trois mécanismes différents : la conduction, la convection et le rayonnement.

#### **I.2.1.1 Conduction**

Ce mode de transfert est plus spécifique aux solides, c'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu ouventopaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. [1]

Un solide peut être représenté comme une succession de masses reliées. Les chocs de molécules les plus chaudes situées à gauche vont se propager le long du système, alors que les molécules plus froides vont se réchauffer par chocs avec leurs voisines. On voit bien que la transmission se fait sans transport de matière : C'est le principe de la conduction. [1]

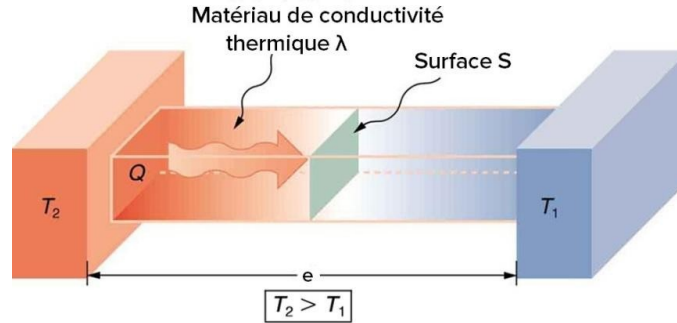


Figure I-1 Transfert de chaleur par conduction. [1]

La loi de Fourier a été établie expérimentalement par Joseph Fourier en 1822. Cette loi stipule que le temps de transfert de chaleur à travers un matériau est proportionnel au gradient négatif de la température et à la surface, perpendiculairement à ce gradient, à travers lequel la chaleur circule.[2]

$$\Phi = -\lambda \times S \times \frac{dT}{dx} \quad (I.1)$$

Avec :

$\Phi$  : le flux de chaleur (W/ m<sup>2</sup>).

$\lambda$  : la conductivité thermique

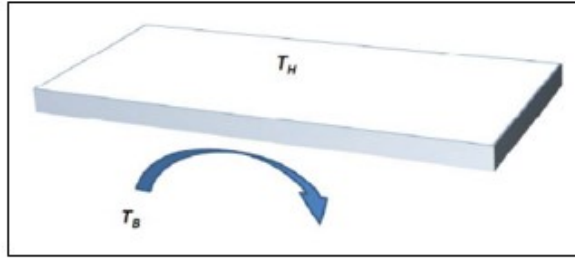
S : la section m<sup>2</sup>.

dT/dx : changement de température par rapport à la distance (K/m).

### I.2.1.2 Convection

Ce mode de transfert est spécifique aux fluides car il s'accompagne d'un transfert de masse, les particules fluides ont plus de liberté à se mouvoir grâce au vide qui les sépare. L'étude de transfert de chaleur par convection détermine surtout les échanges de chaleur produits entre un fluide et une paroi. Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue : [3]

- **La convection naturelle (libre)** : Le mouvement provient de l'action de la différence de température entre le fluide et la paroi qui provoque une diminution ou augmentation de la densité et donc d'un mouvement de circulation du fluide.
- **La convection forcée** : Le mouvement est imposé par une action extérieure (pompe, ventilateur... etc.).



**Figure I-2 Illustration d'échange convectif entre un milieu fluide et une surface. [4]**

La loi de Newton représentée par l'équation ci-dessous introduit la relation entre le flux échangé entre la surface et le fluide et la surface d'échange :

$$\Phi = h \times S \times (T_s - T_f) \quad (I.2)$$

Avec

$\Phi$  : le flux de chaleur (W/ m<sup>2</sup>).

$h$  : le coefficient de transfert de chaleur par convection (W/(m<sup>2</sup>·K)).

$S$  : la surface sur laquelle le transfert de chaleur (m<sup>2</sup>).

$T_s$  : la température de la surface (K).

$T_f$  : la température du fluide (K).

Le coefficient  $h$  dépend de nombreux paramètres : **[5]**

Caractéristique du fluide.

Nature de l'écoulement.

La température.

La forme de la surface d'échange.

### **I.2.1.3 Rayonnement**

Le transfert de chaleur par rayonnement est le transport d'énergie dû à l'émission d'ondes électromagnétiques ou de photons à partir d'une surface ou d'un volume. Il ne nécessite pas de fluide caloporteur et peut se produire sous vide. **[4]**

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques suivant le processus : **[6]**

**Emission** : Il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique.

**Transmission** : La transmission de cette énergie électromagnétique se fait par propagation d'ondes avec une partie absorbée par le milieu traversé.

**Réception :** A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique ou absorption. En effet, les photons qui arrivent sur un matériau, excitent les électrons qui se recombinent avec les trous en dissipant de la chaleur.

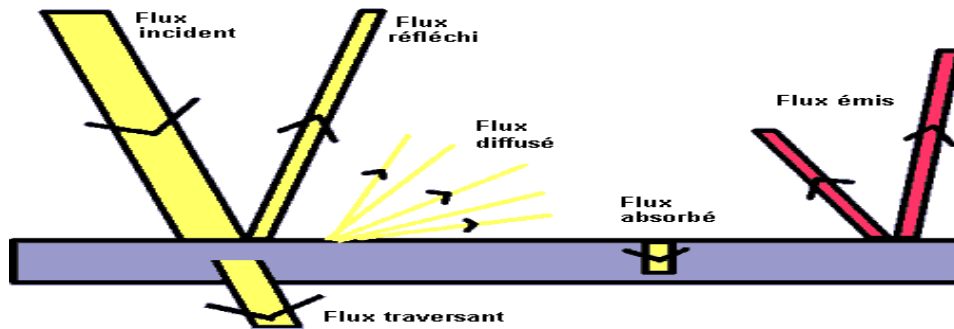


Figure I-3 Répartition du rayonnement solaire reçu par une surface. [6]

Principe et conditions : Tous les corps matériels sont considérés capables d'émettre de l'énergie sous forme de rayonnement et d'en recevoir dès que la température est supérieure au zéro absolu. 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. [6]

Ce mode de transfert est décrit par la loi de Stefan.

$$\Phi = \varepsilon \times \delta \times S \times T^4 \quad (I.3)$$

Avec

$\Phi$  : le flux de chaleur ( $W/m^2$ ).

$\varepsilon$  : l'émissivité du matériau (entre 0 et 1).

$\Delta$  : la constante de Stefan-Boltzmann,  $W/(m^2 \cdot K)$

$S$  : la surface ( $m^2$ ).

$T$  : la température (K).

### I.3 Notions thermiques

#### I.3.1 Le flux de chaleur

Pour tous les modes de transfert de transfert thermique, on définit le flux de chaleur ou la puissance thermique  $\Phi$  comme la quantité de chaleur  $Q$  (J) traversant une surface isotherme  $S$  pendant un temps  $\Delta t$ . Il est exprimé habituellement par analogie à l'électricité à travers une résistance dite thermique. [5]



$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \text{ [W]} \quad (\text{I.4})$$

Si on considère deux surfaces S1 et S2 respectivement à des températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$  (ex :  $\theta_1 > \theta_2$ ), on a la relation suivante : [5]

$$\Phi = \frac{\theta_1 - \theta_2}{R} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

R : La résistance thermique entre les deux surfaces.

Une densité de flux de chaleur  $\Phi$  correspond à un flux de chaleur par unité de surface. On utilise la densité parce que le flux thermique n'est pas uniforme sur toute la surface.

### I.3.2 La température

La température est une grandeur physique mesurable (généralement selon l'échelle Celsius). Elle est reliée aux sensations de froid et de chaud dues au transfert thermique entre un corps et son environnement. [7]

De ce fait, les transferts d'énergie sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température. La valeur de la température en tout point de l'espace est un scalaire décrivant un champ de température : [7]

- Champ de température indépendant du temps en régime permanent ou stationnaire.
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit variable ou instationnaire.

### I.3.3 La résistance thermique

La résistance thermique (R) est une propriété thermique qui mesure la résistance qu'une épaisseur de matériau oppose au passage de la chaleur. Elle constitue en fait son pouvoir isolant qui est d'autant plus fort que le R est élevé. Elle dépend du coefficient de conductivité thermique ( $\lambda$ ) du matériau et de son épaisseur. [8]

$$R = \frac{\Delta T}{\Phi} \quad (\text{I.6})$$

La résistance thermique de convection : La résistance thermique de convection d'un élément exprime sa résistance thermique au passage d'un flux de chaleur d'origine convective à travers une surface. Elle est donnée par la relation : [7]

$$R_v = \frac{1}{h} \quad (I.7)$$

La résistance thermique de conduction : La résistance thermique d'une paroi détermine son degré d'opposition au transfert de chaleur. Plus elle est importante, plus le corps est considéré isolant. Elle est donnée par la relation : [7]

$$R_c = \frac{e}{k} \quad (I.8)$$

### I.3.4 Analogie électrique

La loi d'Ohm relie une différence de potentiel  $\Delta U$  à une intensité de courant  $I$  ( $\Delta U = R.I$ ) à travers une résistance électrique  $R$ , par analogie, on peut relier la différence de température au flux de chaleur qui passe au travers un mur de longueur  $e$  et une section  $S$  en définissant la résistance thermique  $R_{conduction}$  : [7]

$$R_c = \frac{e}{\lambda.S} \quad (I.9)$$

Pour déterminer la résistance totale, la représentation schématique suivante peut être utilisée :

- Arrangement en parallèle :

$$I = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \cdot \Delta U. \quad \Phi = \left(\frac{1}{R_{th1}} + \frac{1}{R_{th2}} + \frac{1}{R_{th3}}\right) \cdot \Delta T \quad (I.10)$$

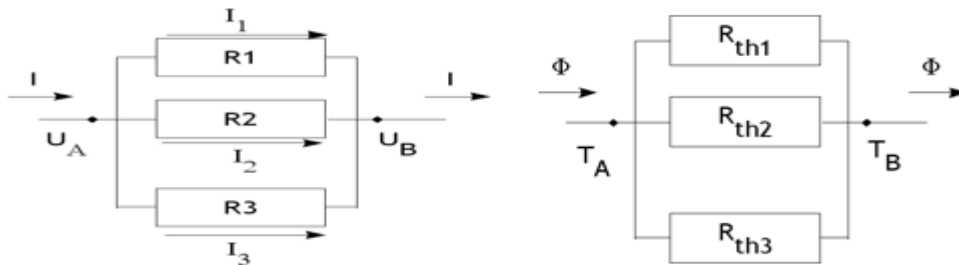


Figure I-4 Schéma électrique équivalent des résistances thermiques parallèles. [9]

- Arrangement en série :

$$\Delta U = (R_A + R_B + R_C) \cdot I. \quad \Delta T = (R_{th1} + R_{th2} + R_{th3}) \cdot \Phi \quad (I.11)$$

Avec:

$R_{th1}$ ,  $R_{th2}$  et  $R_{th3}$  : les résistances thermiques (K/W).

$(1/R_{th})$  : conductance thermique.

$\Delta T$  : la différence de température (K).

$\Delta U$  : la différence de tension (V).

$R_A$ ,  $R_B$  et  $R_C$  : les résistances individuelles dans le système ( $\Omega$ ).

$I$  : courant (A).

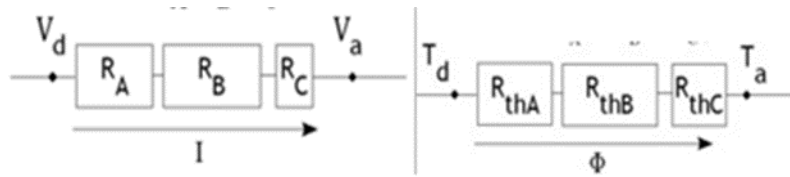


Figure I-5 Schéma électrique équivalent des résistances thermiques en série. [9]

### I.3.5 La conductivité thermique

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) est la grandeur qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur. Elle représente le flux de chaleur traversant un matériau d'épaisseur d'un mètre, pour une différence de température d'un kelvin entre les deux faces entrante et sortante. [10]

Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. La conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau et de la température, mais d'autres paramètres tels que l'humidité et la pression interviennent également. [10]

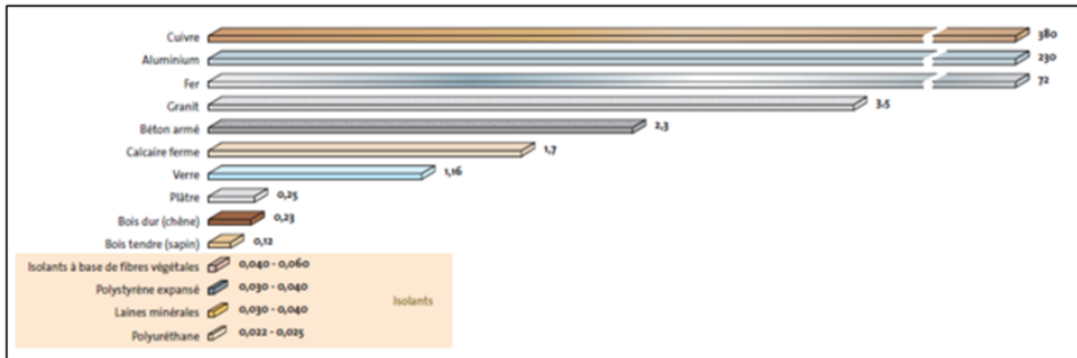


Figure I-6 Illustration de la différence de conductivité thermique de quelques matériaux usuels. [11]

### I.3.6 Le coefficient de convection thermique

Le coefficient de transfert de chaleur convectif ( $h$ ) est un coefficient qui permet de quantifier un transfert de chaleur réalisé par un phénomène de convection au sein d'un fluide en mouvement. Il représente la résistance thermique d'une couche de fluide relativement stagnante entre une surface de transfert de chaleur et le milieu fluide. [12]

Il dépend de la nature du fluide et de celle de la paroi en contact, de la longueur et l'élément suivant lequel s'écoulent les courants de convection, de la vitesse de ces courants et, fréquemment, de la différence de température. [13]

### I.3.7 Les nombres adimensionnels

- **Le nombre de Reynolds**

Le nombre de Reynolds détermine le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) qui influencera directement l'échange de chaleur. Si ce nombre est supérieur à 3200 ; le régime est donc turbulent, sinon, il est laminaire. [14]

$$Re = \frac{\rho C D_h}{\mu} = \frac{C D_h}{\nu} \quad (I.12)$$

Avec :

$\rho$  : La masse volumique de fluide ( $\text{Kg.m}^{-3}$ ).

$C$  : La vitesse du fluide ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

$D_h$  : Diamètre hydraulique (m).

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide ( $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).

$\nu$  : La viscosité cinématique du fluide ( $\text{m}^2.\text{s}$ ).

- **Le nombre de Nusselt**

Le nombre de Nusselt ( $Nu$ ) traduit la qualité de l'échange thermique : une augmentation de ce nombre traduit une contribution importante de l'écoulement sur l'échange de chaleur avec la paroi. [15]

$$Nu = \frac{h.L}{\lambda} \quad (I.13)$$

Avec :

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$ ).

$\lambda$  : La conductivité thermique du fluide ( $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ ).

$L$  : Longueur caractéristique (m).

- **Le nombre de Prandtl**

Le nombre de (Pr) compare l'aptitude du fluide à diffuser la quantité de mouvement par le biais de sa viscosité à son aptitude à diffuser la chaleur par le biais de sa diffusivité thermique. [15]

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{\lambda} \quad (\text{I.14})$$

- **Le nombre de Grashof**

Le nombre de Grashof (Gr) est défini comme le rapport des forces de flottabilité aux forces visqueuses et est utilisé pour déterminer le régime d'écoulement des couches limites fluides dans les systèmes laminaires. [16]

$$\text{Gr} = \frac{g\beta\Delta T L_c^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (\text{I.15})$$

Avec :

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $\text{m.s}^{-2}$ )

$\beta$  : Coefficient de dilatation.

$\Delta T$  : Différence de température ( $\text{°C}$ )

$L_c$  : Longueur caractéristique (m)

- **Le nombre de Richardson**

Le nombre de Richardson est le nombre sans dimension qui exprime le rapport de l'énergie potentielle à l'énergie cinétique, il est utilisé pour déterminer la stabilité de l'écoulement dans un fluide stratifié. [16]

$$\text{Ri} = \frac{\text{Energie potentielle}}{\text{Energie cinétique}} = \frac{Gr}{Re^2} \quad (\text{I.16})$$

- **Le nombre de Rayleigh**

Le nombre de Rayleigh (Ra) pour un fluide est un nombre sans dimension associé à un écoulement entraîné par la flottabilité. Il est étroitement lié au nombre de Grashof, et les deux

nombres sont utilisés pour décrire la convection naturelle (Gr) et le transfert de chaleur par convection naturelle (Ra). [17]

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta\Delta T L_c^3}{\nu\alpha} \quad (I.17)$$

Avec :

g : l'accélération due à la gravité (m/s<sup>2</sup>).

β : la dilatation thermique du fluide (K<sup>-1</sup>).

ΔT : Différence de température kelvins (K).

Lc : Longueur (m).

ν : la viscosité (m<sup>2</sup>/s).

α : Diffusivité thermique du fluide (m<sup>2</sup>/s)

## I.4 Les ponts thermiques

Les ponts thermiques sont des zones de la construction qui présentent une conductivité thermique supérieure à celle des autres parties de la paroi. Ils se produisent lorsque la chaleur est transférée par des éléments de construction ayant une conductivité thermique plus élevée que celle des matériaux qui les entourent. Les ponts thermiques peuvent se produire dans nombreux endroits différents, tels que les liaisons entre les murs intérieurs et extérieurs, les planchers et les plafonds, les coins de la construction, les fenêtres, les portes, les poutres et les colonnes.

Les ponts thermiques sont un problème courant dans les bâtiments, car ils peuvent entraîner une augmentation de la perte de chaleur et une diminution de l'efficacité énergétique. Cela peut se traduire par une augmentation de la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation, ainsi que par des problèmes de confort thermique pour les occupants du bâtiment. [18],[19]

### I.4.1 Le but des ponts Thermiques

Les ponts thermiques sont des zones dans un bâtiment où la barrière thermique est compromise, ce qui permet à la chaleur de s'échapper plus facilement. Les ponts thermiques peuvent avoir des effets négatifs importants sur l'efficacité énergétique d'un bâtiment, entraînant des coûts de chauffage plus élevés et des températures intérieures inconfortables.

Le but des ponts thermiques est donc de minimiser ou d'éliminer ces zones de perte de chaleur. Cela peut être réalisé de plusieurs manières, comme l'utilisation d'isolants thermiques, de

matériaux à faible conductivité thermique, ou encore de l'installation de rupteurs de ponts thermiques. Les rupteurs de ponts thermiques sont des éléments situés dans les parois d'un bâtiment qui rompent la continuité thermique de la paroi, empêchant ainsi la chaleur de s'échapper.

En réduisant les ponts thermiques, on peut améliorer considérablement l'efficacité énergétique d'un bâtiment, ce qui se traduit par des économies de coûts de chauffage et une réduction des émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation d'énergie.

## **I.4.2 Types de ponts thermiques**

Les ponts thermiques les plus courants sont les ponts thermiques linéaires, mais il existe en réalité 4 différents types de ponts thermiques :

- Ponts thermiques linéaires.
- Ponts thermiques ponctuels.
- Ponts thermiques structurels.
- Ponts thermiques intégrés.

### **I.4.2.1 Ponts thermiques linéaires**

Les ponts thermiques linéaires sont des zones spécifiques d'un bâtiment où l'isolation thermique est interrompue, créant ainsi une perturbation dans le flux de chaleur. Ils se trouvent généralement à la jonction de deux parois ou lors d'un changement de plan horizontal ou vertical, tels que les planche rehauts et bas, les refends, les fenêtres, les portes fenêtres, les portes extérieures et les balcons.

Ces ponts thermiques linéaires peuvent causer des pertes de chaleur importantes, ce qui peut entraîner une augmentation des coûts de chauffage et de refroidissement pour le propriétaire du bâtiment. Pour minimiser ces pertes de chaleur, il est important de prendre en compte les ponts thermiques linéaires lors de la conception et de la construction d'un bâtiment, ainsi que lors de toute rénovation ultérieure. Cela peut inclure l'utilisation de matériaux isolants appropriés, l'installation de barrières thermiques, ou l'utilisation de techniques de construction telles que le double mur avec une lame d'air entre les deux murs.

Cette perte de chaleur provoquée est exprimée par le Coefficient de transmission thermique linéique  $\Psi$  (prononcer : «valeur psi») exprimé en (W/m.k).

Ce coefficient est défini comme la déperdition supplémentaire due à une perturbation, d'une longueur d'un mètre, pour une différence de température d'un degré Celsius entre l'ambiance intérieure et extérieure. [20]

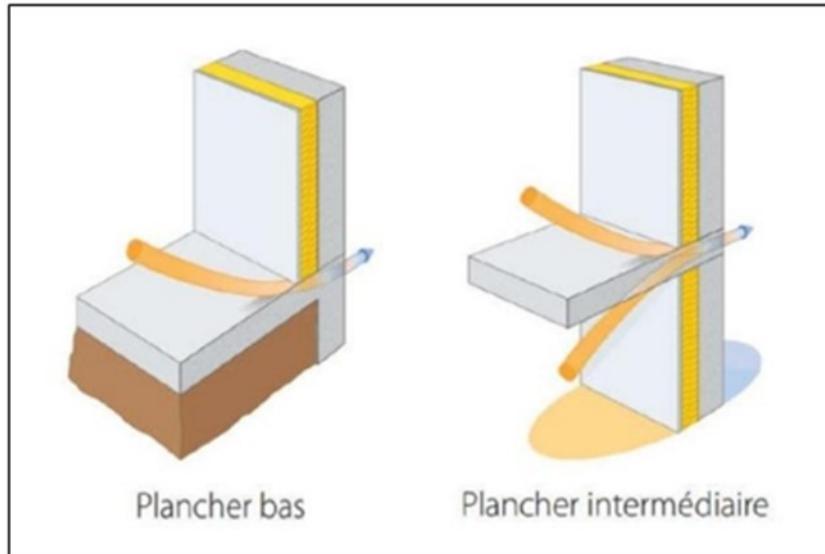


Figure I-7 Ponts thermiques des liaisons [21]

Les ponts thermiques linéaires sont les plus courants. Les principaux endroits où ils peuvent être retrouvés sont les suivants :

- Jonction entre le mur extérieur et le plancher bas.
- Jonction entre le mur extérieur et le plancher haut.
- Jonction entre le mur extérieur et le mur de refend.
- Jonction entre le mur extérieur et le plancher intermédiaire.
- Jonction entre le balcon et la dalle.

#### I.4.2.2 Ponts thermiques ponctuels

Les ponts thermiques ponctuels (ou ponts thermiques localisés) sont des zones spécifiques d'une structure de construction où la chaleur est plus facilement transférée à travers le matériau que dans le reste de la structure. Les ponts thermiques ponctuels sont souvent causés par des éléments structurels tels que des colonnes, des poutres ou des liaisons entre différents types de matériaux.



Ces zones peuvent causer des pertes de chaleur importantes et réduire l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Ils peuvent également créer des zones de condensation, ce qui peut entraîner des problèmes d'humidité et de moisissures.

Pour minimiser les ponts thermiques ponctuels, il est important de concevoir la structure de manière à réduire les variations de température à travers les différents matériaux. Cela peut être accompli en utilisant des matériaux isolants, en créant des barrières thermiques et en évitant les interruptions dans les couches d'isolation. L'utilisation de matériaux isolants tels que la mousse de polyuréthane ou la laine de verre peut également aider à réduire les pertes de chaleur.

Un pont thermique ponctuel est une perturbation qui se réfère à un point. La perte de chaleur provoquée par ce pont thermique est exprimée par le coefficient ponctuel de transmission thermique la valeur  $\chi$  (prononcer : «valeur chi») exprimé en  $W/(m \cdot K)$ .

La valeur  $\chi$  est définie comme la déperdition supplémentaire due à une perturbation ponctuelle pour une différence de température d'un degré Celsius entre l'air intérieur et extérieur.

[20]

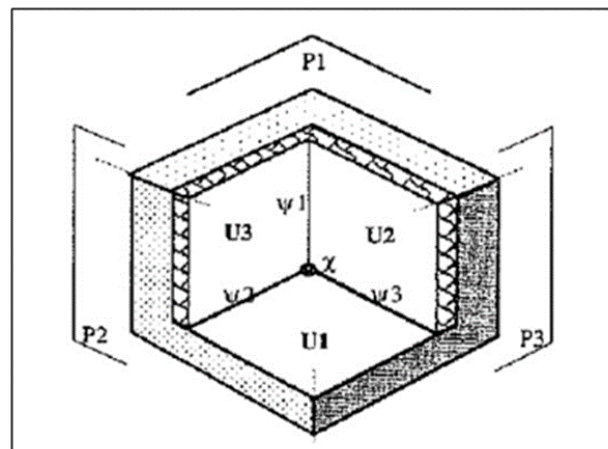


Figure I-8 Pont thermique ponctuel. [22]

### I.4.2.3 Ponts thermiques structurels

Les ponts thermiques structurels sont des zones de faiblesse dans l'isolation thermique d'un bâtiment, où la chaleur peut s'échapper plus facilement. Ils se produisent là où les éléments de la structure du bâtiment traversent l'enveloppe du bâtiment, tels que les colonnes, les poutres, les murs de soutènement, les planchers et les toits.

Les ponts thermiques structurels peuvent avoir un impact significatif sur la performance thermique d'un bâtiment et sur les coûts de chauffage et de refroidissement associés. Ils peuvent également contribuer à des problèmes tels que la condensation et la moisissure, qui peuvent affecter la qualité de l'air intérieur.

Il existe plusieurs moyens de réduire les ponts thermiques structurels, notamment en utilisant des matériaux isolants de qualité, en assurant une bonne étanchéité à l'air et en concevant les détails de la construction de manière à minimiser les zones de faiblesse.

En résumé, les ponts thermiques structurels sont un défi important dans la conception et la construction de bâtiments économes en énergie, et leur gestion efficace est essentielle pour atteindre des performances thermiques optimales et améliorer la qualité de vie des occupants.

A titre d'exemple, les tiges métalliques utilisées pour fixer au mur vertical les Matériaux d'isolation thermique comme les panneaux de laine de verre créent des ponts Thermiques. Donc ils sont liés aussi à la technique de mise en œuvre d'un isolant. [23]

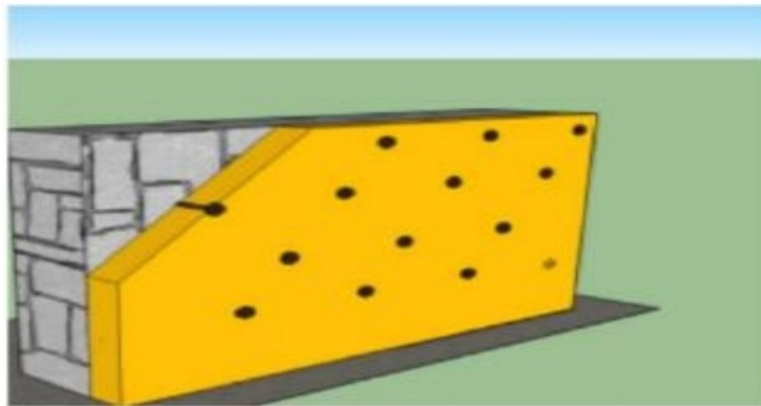


Figure I-9 Pont thermique structurel. [23]

#### I.4.2.4 Ponts thermiques intégrés

Ils sont dus à un défaut de conception de la paroi isolante elle-même. En effet, celle-ci étant Composée de différents matériaux assemblés entre eux, une mauvaise réalisation de L'assemblage peut être à l'origine du problème. Donc ils sont liés à la technique de mise en Œuvre d'un isolant).

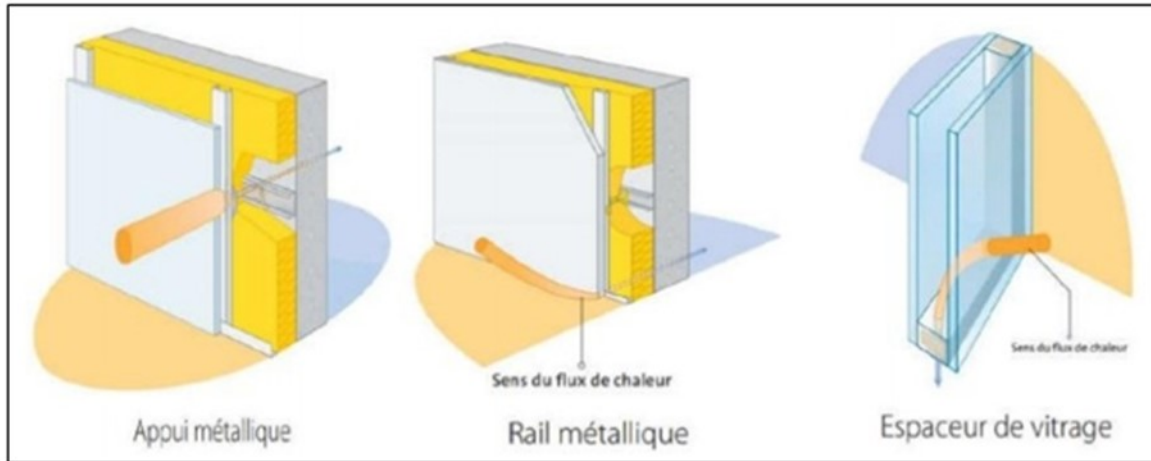


Figure I-10 Ponts thermiques intégrés. [21]

### I.4.3 Application des ponts thermiques

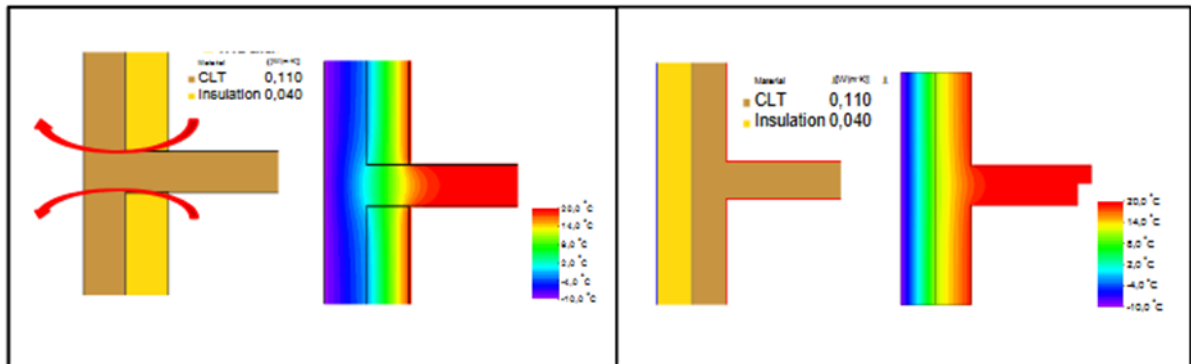
Pour minimiser l'impact des ponts thermiques, les techniques suivantes peuvent être utilisées :

- Utilisation de matériaux isolants de qualité : Les matériaux isolants tels que la laine de verre, la laine de roche, le polystyrène expansé et le polyuréthane sont utilisés pour réduire les pertes thermiques.
- Utilisation de systèmes de ventilation adéquats : Les systèmes de ventilation adéquats permettent de réduire l'humidité et éviter la formation de moisissures dans les zones à risque de ponts thermiques.
- Réduction de la surface des ponts thermiques : Cela peut être réalisé en utilisant des éléments de construction tels que des rupteurs de ponts thermiques, des caissons de volets, des encadrements de fenêtres isolants, etc.
- Utilisation de revêtements extérieurs efficaces : Les revêtements extérieurs tels que les bardages ventilés et les enduits peuvent aider à réduire les pertes de chaleur à travers les murs.

En résumé, pour minimiser les effets des ponts thermiques, il est important ; d'utiliser des matériaux isolants de qualité, des systèmes de ventilation adéquats, des éléments de construction pour réduire la surface des ponts thermiques et des revêtements extérieurs efficaces.

## I.5 L'isolation thermique

Les ponts thermiques devraient être évités le mieux possible par des mesures structurelles adéquates. Le but est d'amener les effets négatifs à un point qui est tolérable et ne causera aucun dommage pour les éléments du bâtiment. La prévention des ponts thermiques doit commencer par la conception du bâtiment. Avec une évaluation multidimensionnelle lors de la planification et de la conception détaillée, les ponts thermiques et leurs conséquences possibles peuvent être efficacement évités en utilisant l'isolation thermique.[24]



**Figure I-11** Isolant intérieur (gauche) et extérieur (droite) dans une jonction plancher-mur. [24]

L'isolation est le phénomène de ralentissement du flux de chaleur, d'électricité ou de son et peut être utilisée à la fois pour gagner de la chaleur et empêcher la perte de chaleur de l'environnement.[25]

Les objectifs de l'isolation thermique dans le bâtiment sont : [25]

- La réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage pendant la période d'hiver et pour la climatisation pendant l'été en offrant les conditions de confort.
- Protection de l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

## I.5.1 Les méthodes d'isolation thermique

### I.5.1.1 Les murs

- **L'isolation des murs par l'intérieur** : La continuité de l'isolation dans cette méthode d'isolation est très délicate à assurer au niveau des murs porteurs intérieurs, mais aussi au niveau des sols, fondations, plafonds et balcon. Sa mise en œuvre est réalisée selon des procédés différents. Le plus couramment utilisé est la pose de panneaux isolants par simple collage ou vissage sur des tasseaux en bois. [26]
- **L'isolation des murs par l'extérieur** : Ce procédé est surtout employé lors de travaux de rénovation. Il consiste à fixer par collage ou mécaniquement sur une ossature en bois ou en métal des panneaux isolants en polystyrène. L'ensemble est ensuite recouvert par un enduit de façade étanche. [26]

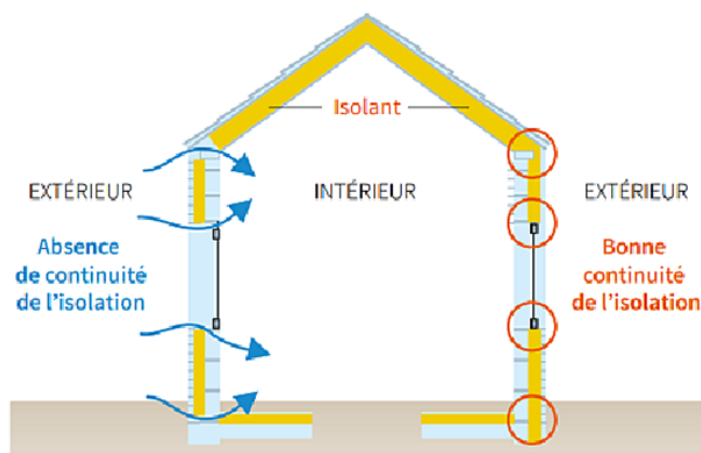


Figure I-12 Isolation par l'intérieure et par l'extérieure. [26]

### I.5.1.2 Le plancher

L'isolation du plancher d'un bâtiment est similaire à celle des murs. L'isolation peut se faire par le haut et c'est une méthode analogue à une isolation des murs par l'extérieur ou l'isolant et fixé sur la face inférieure du plancher et peut être recouvert d'un parachèvement. Comme elle peut se faire par le bas qui est une méthode analogue à celle de l'isolation par l'intérieur ou l'isolant est posé au sol et recouvert d'un revêtement ayant pour but de permettre la circulation. [27]

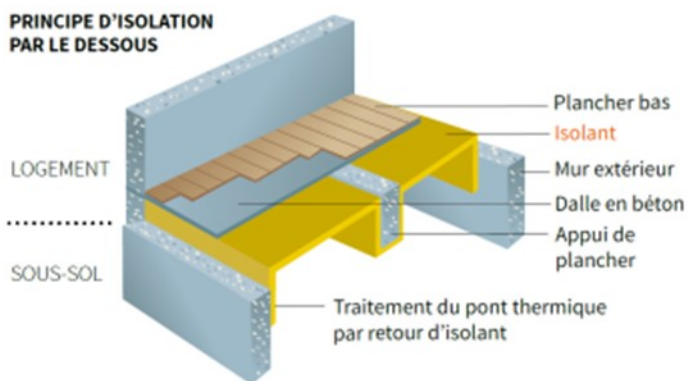


Figure I-13 Principe d'isolation du plancher par le bas. [27]

### I.5.1.3 La toiture

Isoler la toiture permet de réduire une grande partie des déperditions thermiques. Cette méthode peut être effectuée par isolation par l'intérieur qui consiste à poser un isolant sous forme de feuille semi-rigide ou en rouleau. Ou par isolation par l'extérieur qui est plus difficile et compliquée à réaliser et nécessite la dépose de la toiture afin d'installer l'isolant en panneau ou en rouleau. [28]

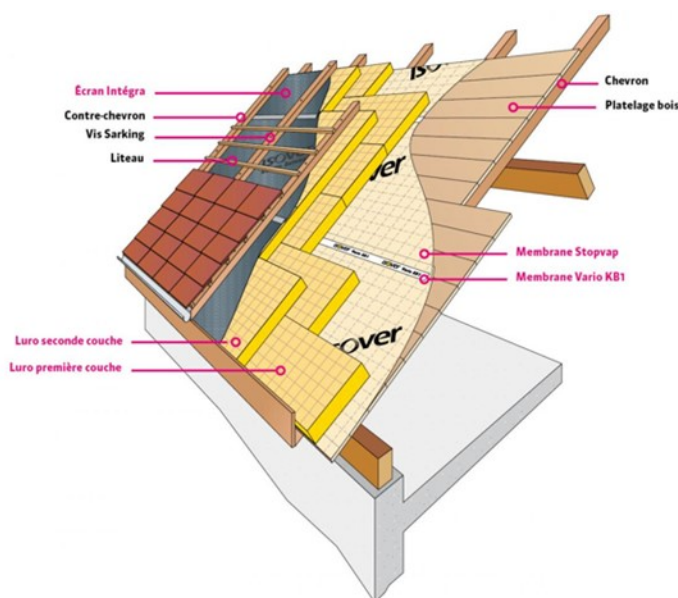


Figure I-14 Principe d'isolation de la toiture. [28]

En dernier, l'isolation thermique est une mesure importante pour améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment et réduire les coûts de chauffage et de climatisation. En utilisant des matériaux d'isolation appropriés, en veillant à une installation correcte et en adoptant des pratiques

d'utilisation économe de l'énergie, on peut réduire considérablement les pertes de chaleur en hiver et de fraîcheur en été. Cela peut non seulement réduire les coûts d'exploitation, mais aussi contribuer à la protection de l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. En somme, l'isolation thermique est une stratégie gagnant-gagnant pour les propriétaires de bâtiments et l'environnement.

IV.

### **Conclusion**

Les ponts thermiques sont un problème courant dans les bâtiments, car ils peuvent entraîner une augmentation de la perte de chaleur et une diminution de l'efficacité énergétique. Pour cela, ils devraient être évités le mieux possible par des mesures structurelles adéquates en utilisant des matériaux isolants de qualité, des systèmes de ventilation adéquats, des éléments de construction pour réduire la surface des ponts thermiques et des revêtements extérieurs efficaces et donc minimiser ses effets

## Chapitre II. Etude bibliographique

---

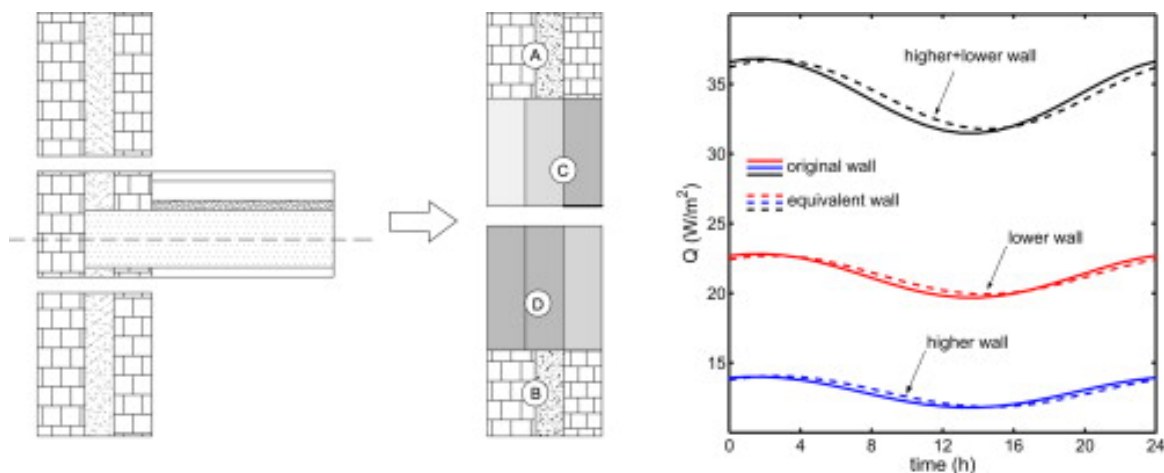
Le deuxième chapitre s'intéresse à faire une synthèse des travaux précédents sur la modélisation des ponts thermiques. L'objectif de l'étude bibliographique sur les ponts thermiques dans les enveloppes de bâtiments est de fournir un aperçu complet des recherches réalisées dans ce domaine. L'étude vise à examiner les différentes méthodes de modélisation, d'évaluation et d'analyse des performances des ponts thermiques. Elle met en évidence l'importance de représenter avec précision les ponts thermiques dans la conception des bâtiments et les évaluations d'efficacité énergétique. L'étude met également en avant l'importance des techniques de mesure, telles que la thermographie infrarouge, et des méthodes numériques pour évaluer les performances des ponts thermiques dans des conditions réelles.

---



Une revue de littérature est une évaluation critique des recherches existantes et des articles universitaires sur un sujet spécifique. Elle sert de base pour comprendre l'état actuel des connaissances, identifier les lacunes de recherche et orienter les études futures. Dans le contexte des ponts thermiques dans les enveloppes des bâtiments, la revue de littérature offre un aperçu complet des recherches menées dans ce domaine. Elle explore différents aspects tels que la modélisation, l'évaluation et l'analyse des performances des ponts thermiques. En examinant les résultats et les méthodologies des différentes études, la revue de littérature met en évidence l'importance de représenter et d'évaluer avec précision les ponts thermiques dans la conception des bâtiments et les évaluations de l'efficacité énergétique. Elle souligne également l'importance des techniques de mesure, telles que la thermographie infrarouge, et des méthodes numériques pour évaluer les performances des ponts thermiques dans des conditions réelles. Globalement, la revue de littérature constitue une ressource précieuse pour les chercheurs, les architectes et les professionnels du bâtiment intéressés par la compréhension et la résolution des défis posés par les ponts thermiques dans les bâtiments.

De nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude des ponts thermiques. Aguilar et al. (2014) [29] proposent une méthode pour modéliser la réponse transitoire des ponts thermiques à forte inertie dans les bâtiments en utilisant la méthode du mur thermique équivalent. La méthode consiste à ajuster les propriétés thermiques d'un mur équivalent à trois couches pour tenir compte de la distribution de température à travers le pont thermique dans un scénario de conduction de chaleur à l'état stationnaire. Les auteurs analysent deux configurations différentes de pont thermique résultant de la jonction d'un mur vertical avec une dalle intermédiaire ou de sol en utilisant cette méthode. Ils discutent de la faisabilité de mettre en œuvre cette approche dans les outils de simulation énergétique des bâtiments. L'étude révèle que négliger le pont thermique dans les simulations conduit à une sous-estimation de 25% du flux de chaleur à travers le pont. Lorsque le pont thermique est modélisé mais que son inertie thermique est ignorée, une réponse différée du flux de chaleur est obtenue. En revanche, la simulation basée sur la méthode du mur thermique équivalent correspond étroitement aux performances dynamiques réelles du pont thermique. Les résultats démontrent l'efficacité de la méthode proposée pour capturer avec précision le comportement transitoire des ponts thermiques à forte inertie dans les bâtiments. Cette approche a le potentiel d'être intégrée dans les outils de simulation énergétique des bâtiments pour améliorer la précision de l'analyse des ponts thermiques et des prédictions de performance énergétique.

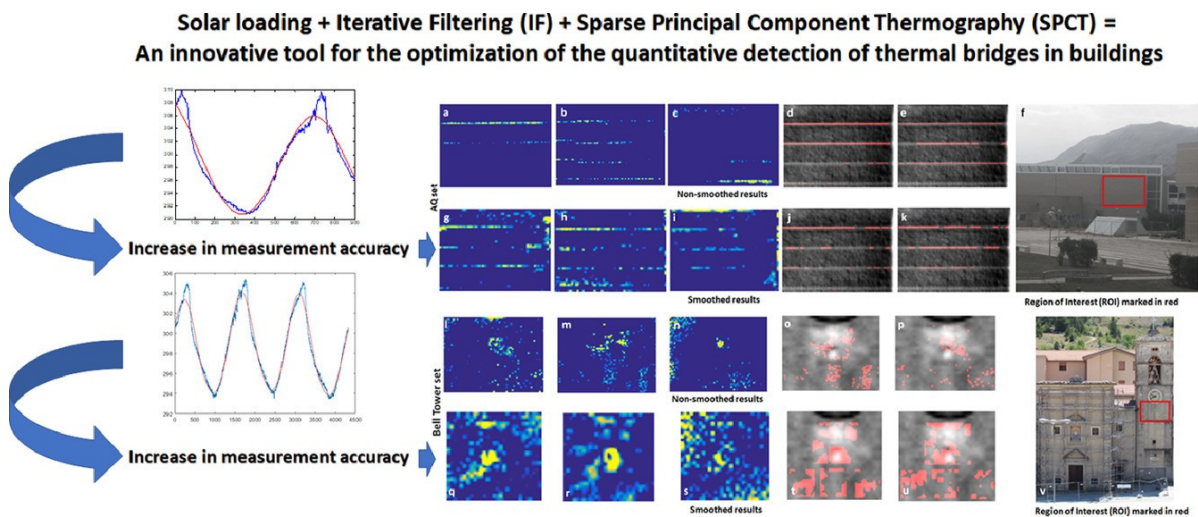


**Figure II-1** Résumé graphique de l'article “Transient modeling of high-inertial thermal bridges in buildings using the equivalent thermal wall method”

D'autre part, Kang et al. (2022) [30] ont réalisé une étude de cas utilisant la thermographie infrarouge pour évaluer le pont thermique d'un bâtiment existant dans un cadre pratique sur site. L'objectif était d'évaluer le comportement thermique des murs extérieurs et d'améliorer la performance globale d'isolation du bâtiment. L'étude s'est concentrée sur la comparaison des indicateurs de performance du pont thermique obtenus à partir d'une modélisation en régime permanent avec les mesures prises sur le terrain, en tenant compte de la convergence et de l'incertitude. Une analyse bayésienne de la chaîne de Markov Monte Carlo (MCMC) a été utilisée pour examiner la validité des résultats et obtenir des résultats d'évaluation sous forme de distributions, y compris l'incertitude. La mesure a été réalisée sur une période de trois jours et les résultats ont indiqué que la section du pont thermique présentait une perte de chaleur 1,221 fois supérieure à celle de la section sans pont thermique. Cependant, il y avait un écart de 6,7% par rapport à la méthode numérique et l'incertitude était relativement élevée à 0,225 (18,4%, IC 95%), ce qui était attribué à l'influence des conditions sur le terrain et mettait en évidence les limites du modèle de mesure en régime permanent. En ce qui concerne la convergence des résultats, il a été observé que les résultats de mesure convergeaient continuellement à mesure que le temps de mesure augmentait. Cela suggère que des résultats valides peuvent être obtenus sur le terrain en effectuant des mesures pendant une durée suffisante, même lors de l'utilisation d'une méthode de mesure du pont thermique en régime permanent. Dans l'ensemble, l'étude démontre l'application pratique de la thermographie infrarouge pour l'évaluation in situ des ponts thermiques dans les bâtiments. L'utilisation de l'inférence bayésienne et la prise en compte de la convergence et de

l'incertitude contribuent à une évaluation plus réaliste et quantitative de la performance des ponts thermiques, ce qui aide à identifier et à améliorer les problèmes d'isolation dans les bâtiments existants.

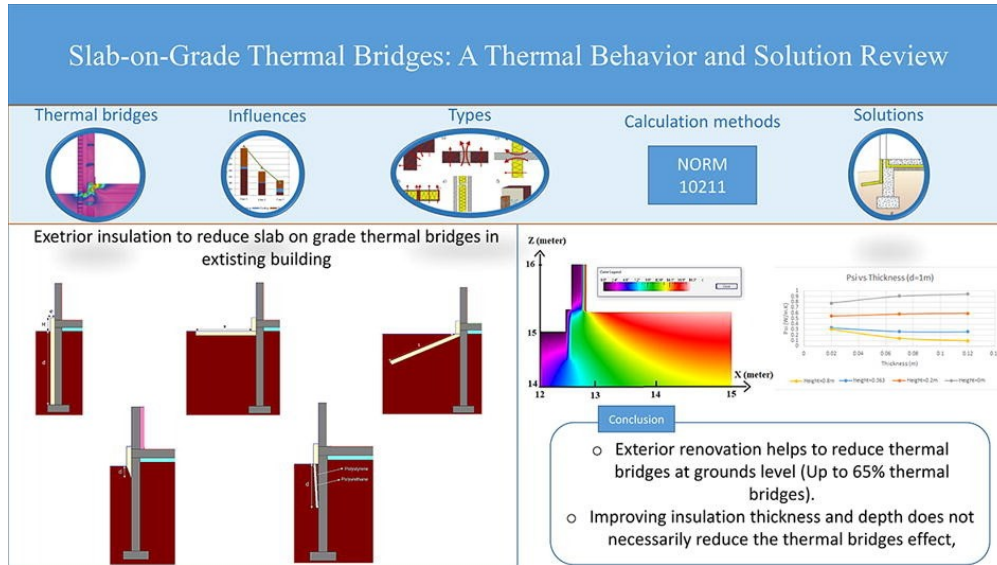
Sfarra et al. (2019) [31] propose une approche innovante pour améliorer la détection des ponts thermiques dans les bâtiments en utilisant la thermographie infrarouge (IRT) sur site et des outils mathématiques. La méthode standard actuelle de détection des ponts thermiques est affectée par la précision de détection et l'effet d'ombre portée causé par l'environnement environnant, ce qui peut masquer ou modifier l'empreinte thermique des défauts. Pour remédier à ces limitations, les auteurs appliquent une méthode d'analyse de données multiscalaires appelée filtrage itératif (IF) pour décrire la nature multiscalaire du signal électromagnétique dans la région infrarouge à ondes longues (LWIR). La méthode IF réduit l'influence des ombres sur la façade, améliorant ainsi la détection des ponts thermiques grâce à la technique de thermographie en composantes principales éparses (SPCT). SPCT offre plus de flexibilité en introduisant un terme de pénalisation, s'appuyant sur les avantages de la thermographie en composantes principales (PCT). L'étude démontre comment la précision de la détection des défauts augmente après l'application de la procédure mathématique IF. Les résultats sont discutés sur la base d'études de cas impliquant différents types de bâtiments. De plus, les auteurs incluent une comparaison du rapport signal sur bruit (SNR) avec les données brutes pour évaluer davantage les résultats. Ce travail met en évidence le potentiel des outils mathématiques, en particulier IF et SPCT, pour améliorer la détection des ponts thermiques lors des procédures d'économie d'énergie et de travaux de rénovation dans les bâtiments.



**Figure II-2 La précision de la détection des défauts augmente après l'application de la procédure mathématique IF**

De plus, Garrido et al. (2017) [32] présentent une procédure automatisée pour la détection et la caractérisation des ponts thermiques dans les bâtiments à l'aide de la thermographie infrarouge. L'étude aborde la subjectivité et les limitations associées aux inspections réalisées par des opérateurs humains. La procédure utilise des caractéristiques géométriques et des différences de température pour détecter les ponts thermiques et calcule la transmittance thermique linéaire pour leur caractérisation. De plus, un processus de rectification des images thermiques est incorporé pour améliorer la précision. L'approche proposée améliore la détection des ponts thermiques de 15 % par rapport aux méthodologies existantes, réduisant les faux positifs et les faux négatifs. Cette recherche contribue au domaine en proposant une méthode automatisée pour améliorer la précision de l'analyse des ponts thermiques et les performances énergétiques et thermiques des bâtiments.

Aussi, El Saied et al. (2022) [33] ont réalisé une revue complète axée sur les ponts thermiques (PT), en particulier les PT de dalle sur terre-plein, dans le but de réduire les pertes de chaleur à travers les enveloppes des bâtiments, notamment les fondations de plancher. L'article commence par définir différents types de PT et présente les normes utilisées pour leur évaluation. Différentes approches d'évaluation des PT sont discutées, notamment la méthode des valeurs U, l'approche par équivalence et la méthode tridimensionnelle dynamique, qui aborde spécifiquement les pertes de chaleur à travers les fondations et le sol dans les bâtiments existants. L'article met en évidence l'influence du sol sur les PT et décrit comment les pertes thermiques à travers les PT sont inversement proportionnelles à la conductivité thermique du sol. Des études de cas sont présentées pour étayer cette analyse. De plus, l'article explore les solutions d'isolation extérieure au niveau du sol, en mettant particulièrement l'accent sur le type d'isolation double trapézoïdale, qui a le potentiel de réduire les PT jusqu'à 65% par rapport aux cas sans isolation. En conclusion, l'article suggère des orientations de recherche futures pour combler les lacunes de la littérature actuelle et approfondir notre compréhension des PT et de leurs stratégies d'atténuation.



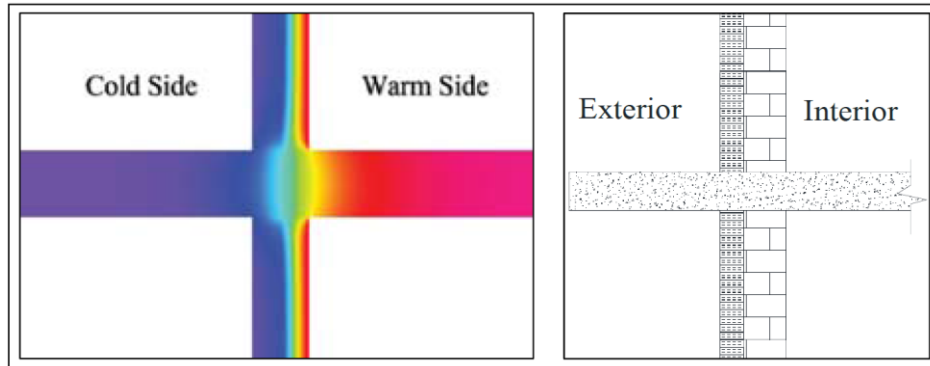
**Figure II-3 Résumé graphique de l'article scientifique: « Slab-on-grade thermal bridges: A thermal behavior and solution review »**

D'ailleurs, Theodosiou and Papadopoulos (2008) [34] examinent l'impact des ponts thermiques sur la demande énergétique des bâtiments avec des constructions de murs en double brique, en se concentrant sur le contexte des bâtiments grecs. Malgré la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique, telles que les exigences en matière d'isolation spécifiées par la réglementation, les ponts thermiques dans l'enveloppe du bâtiment restent un point faible dans les constructions. L'étude examine des configurations représentatives d'isolation thermique des murs dans les bâtiments grecs afin de comprendre l'influence des ponts thermiques sur la consommation d'énergie. Les constructions à double paroi couramment utilisées en Grèce sont particulièrement sujettes à l'apparition de ponts thermiques par rapport aux façades isolantes thermiques typiques que l'on trouve en Europe centrale. L'analyse de l'impact des ponts thermiques permet de mieux comprendre les possibilités de mesures de rénovation énergétique dans les anciens bâtiments. Cette recherche contribue à souligner l'importance d'atténuer les ponts thermiques pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments et respecter les normes réglementaires.

Aussi, Capozzoli et al. (2013) [35] ont réalisé une analyse de sensibilité des ponts thermiques dans les bâtiments afin de répondre aux exigences de la Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (EPBD refondue). L'étude met l'accent sur l'importance des détails de

construction qui ont un impact significatif sur les pertes de chaleur dans l'enveloppe des bâtiments. Pour atteindre les objectifs de la directive en matière de bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle, les concepteurs doivent utiliser des composants de construction innovants et prêter attention à la conception appropriée des nœuds structurels pour minimiser les pertes d'énergie. Les auteurs ont réalisé une analyse de sensibilité basée sur les valeurs de transmission thermique linéaire de différents types de ponts thermiques en utilisant la méthodologie spécifiée dans la norme EN ISO 10211. En définissant des variables de conception en entrée et en appliquant des modèles de régression non linéaire, ils ont évalué la contribution de chaque variable à l'écart de transmission thermique linéaire pour différents types de ponts thermiques. L'analyse a utilisé un nombre significatif de cas générés grâce à une technique d'échantillonnage, et la méthode ANOVA-FAST a été utilisée pour évaluer l'impact de chaque variable d'entrée. L'étude offre des informations précieuses aux concepteurs et souligne la nécessité de méthodes numériques précises pour évaluer les avantages d'une conception appropriée en réduisant les effets des ponts thermiques.

Alhawari & Mukhopadhyaya (2018) [36] ont fourni un aperçu des ponts thermiques dans les enveloppes des bâtiments et de leurs impacts sur la performance énergétique, la durabilité et la qualité de l'air intérieur. À mesure que l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est devenue une priorité mondiale, les ponts thermiques sont reconnus comme une contribution significative à une mauvaise efficacité énergétique des bâtiments. L'article passe en revue différents types de ponts thermiques et leurs effets néfastes sur la performance des bâtiments. Les auteurs mettent en évidence le défi particulier posé par les dalles de balcon exposées, qui présentent un problème complexe de pont thermique nécessitant des solutions de conception thermique et structurelle intégrées. Ils discutent de diverses études numériques et expérimentales axées sur les ponts thermiques des balcons. Les résultats suggèrent que l'utilisation de matériaux à faible conductivité thermique dans la construction peut contribuer à réduire l'impact des ponts thermiques. Bien que des solutions efficaces pour les ponts thermiques soient discutées, les auteurs soulignent la nécessité de poursuivre la recherche et l'innovation pour développer des approches plus efficaces, notamment pour résoudre le problème des ponts thermiques des balcons. Dans l'ensemble, cet article souligne l'importance de comprendre et de réduire les ponts thermiques afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.



**Figure II-4 Schéma des Ponts thermiques constructifs/structuraux**

De même, Quinten & Feldheim (2015) [37] ont mené une étude sur la modélisation dynamique des ponts thermiques multidimensionnels dans les enveloppes des bâtiments. Ils ont passé en revue les méthodes existantes et ont proposé une nouvelle méthode mixte pour modéliser avec précision le transfert de chaleur à travers les ponts thermiques et les incorporer dans les programmes de simulation énergétique des bâtiments. Les chercheurs ont testé quatre approches basées sur la méthode du mur équivalent sur des cas simples à une dimension. Cependant, ils ont constaté que la meilleure approche était une cinquième méthode, qui combinait les principes de la méthode des facteurs de structure et d'une méthode harmonique. Cette méthode mixte a donné des résultats très précis et a fourni une solution unique. Les chercheurs ont ensuite testé la méthode mixte sur un scénario de pont thermique à deux dimensions à la jonction entre un plancher et un mur extérieur, et les résultats ont montré une amélioration de la précision par rapport aux approches conventionnelles.

Martin et al. (2011) [38] ont abordé les défis liés au calcul précis du transfert de chaleur à travers les ponts thermiques dans des conditions dynamiques, en tenant compte de leur impact sur la demande énergétique des bâtiments. Avec la mise en place de réglementations visant à économiser l'énergie et l'augmentation des niveaux d'isolation dans les bâtiments, la proportion de pertes de chaleur attribuables aux ponts thermiques a augmenté. L'article a présenté le problème associé au calcul correct du transfert de chaleur des ponts thermiques dans les programmes d'évaluation de la demande énergétique des bâtiments, en tenant compte de leur inertie thermique. Les auteurs ont présenté différents modèles existants pour calculer les ponts thermiques et ont comparé leurs performances. L'étude s'est concentrée sur les conditions dynamiques et a examiné deux types de ponts thermiques : l'un avec une inertie similaire à celle du mur homogène et l'autre avec une

inertie significativement plus faible. L'objectif était d'analyser les différences et les défis posés par ces deux types de ponts thermiques dans les calculs de transfert de chaleur dynamique.

Par hailleurs, Ascione et al. (2013) [39] présentent une nouvelle méthode pour implémenter le transfert de chaleur bidimensionnel et tridimensionnel dans les logiciels de simulation énergétique dynamique afin de prendre en compte avec précision les ponts thermiques dans les simulations énergétiques des bâtiments. Traditionnellement, les programmes de simulation énergétique des bâtiments se sont basés sur des calculs unidimensionnels de flux de chaleur, négligeant l'impact des ponts thermiques. La méthodologie proposée améliore les capacités des logiciels de simulation en incorporant le transfert de chaleur bidimensionnel et tridimensionnel. La méthode est basée sur la théorie de la représentation d'état des fonctions de transfert et introduit des simplifications pour réduire le temps de calcul et les ressources requises. Les auteurs valident la méthode proposée en la comparant à l'approche originale et à des solutions numériques obtenues à l'aide de méthodes de volumes finis. Ils analysent deux ponts thermiques courants dans les structures de bâtiments caractérisées par des discontinuités dans les matériaux et la géométrie. À travers de nombreuses comparaisons avec des études de dynamique des fluides numériques (CFD) plus intensives en termes de calculs, la méthode proposée démontre son efficacité. Les erreurs maximales observées étaient inférieures à 4,5%, même en tenant compte de la variation horaire de la température extérieure et du rayonnement solaire. Les résultats confirment que la méthode de représentation d'état simplifiée est adaptée pour évaluer avec précision les ponts thermiques, offrant ainsi de meilleures capacités de simulation tout en maintenant une efficacité de calcul.

D'autant plus, Fuchs (2022) [40] ont proposé un aperçu complet du transfert de chaleur conducteur dans les ponts thermiques, qui sont des composants des bâtiments caractérisés par des pertes thermiques plus élevées par rapport à leur environnement. La modélisation précise des ponts thermiques est cruciale pour l'analyse des performances énergétiques et la conception durable. L'article aborde les limitations des approches actuelles de modélisation thermique, qui sacrifient souvent la précision pour les géométries complexes ou simplifient trop les matériaux utilisés. L'auteur souligne l'importance de comprendre la modélisation thermique par éléments finis pour la conception computationnelle et paramétrique dans des boucles de rétroaction en temps réel. L'article comble les lacunes en introduisant les concepts physiques et computationnels pertinents



et les méthodes nécessaires pour calculer la dissipation d'énergie stationnaire et la conductance thermique des ponts thermiques avec des géométries et des matériaux complexes. La présentation est autonome, cohérente et accessible à un large éventail de lecteurs. L'article couvre des sujets tels que l'équation de la chaleur, la modélisation par éléments finis, les performances énergétiques, la simulation, la conception computationnelle et les méthodes de calcul. Il fournit également un exemple détaillé d'un pont thermique en poutre en I isolée pour illustrer les concepts abordés. Dans l'ensemble, cet aperçu complet par Fuchs constitue une ressource précieuse pour comprendre et modéliser le transfert de chaleur conducteur dans les ponts thermiques, contribuant à l'avancement de l'architecture durable et à la conception de bâtiments économes en énergie.

En outre, Omle et al. (2023) [41] ont réalisé une étude comparant les performances de nouvelles méthodes numériques et traditionnelles pour les simulations à long terme du transfert de chaleur dans les murs avec des ponts thermiques. Des expériences précédentes ont montré que les méthodes leapfrog-hopscotch et Dufort-Frankel adaptées sont les plus efficaces parmi les méthodes numériques explicites et stables pour résoudre les problèmes de transfert de chaleur dans les murs de bâtiments. Dans cette recherche, les auteurs ont mesuré les temps d'exécution de ces méthodes réussies et les ont comparés à d'autres solveurs disponibles tels que l'analyse thermique transitoire ANSYS et les routines intégrées de MATLAB. Trois résolutions de maillage différentes ont été utilisées, et il a été observé que le temps d'exécution de leurs méthodes changeait linéairement avec la taille du maillage, ce qui n'était pas le cas pour les autres méthodes. De plus, les auteurs ont réalisé une simulation à long terme (un mois d'hiver complet) de systèmes spatiaux bidimensionnels en utilisant les deux meilleures versions de leurs méthodes. L'objectif était d'examiner les ponts thermiques de différentes formes dans les bâtiments et d'évaluer leur impact sur l'efficacité énergétique. L'étude porte sur la conduction de la chaleur, l'isolation thermique, la simulation à long terme, les types de ponts thermiques, l'analyse thermique transitoire et l'utilisation du logiciel ANSYS. En comparant les performances et les temps d'exécution de différentes méthodes numériques, cette recherche contribue à améliorer la compréhension et l'efficacité des simulations de transfert de chaleur dans les murs avec des ponts thermiques, ce qui permet finalement d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Également, Ben Larbi (2005) [42] présente une approche de modélisation statistique pour évaluer la conductivité thermique ( $\psi$ ) des ponts thermiques en 2D dans les bâtiments. L'objectif est de fournir aux concepteurs de bâtiments des outils pratiques et simples pour évaluer les ponts thermiques courants. L'étude se concentre sur trois exemples : la jonction entre une dalle de sol et un mur, la jonction entre un plancher et un mur, et la jonction entre un toit et un mur. Des simulations informatiques sont effectuées pour calculer la conductivité thermique pour différentes valeurs de variables clés. Un modèle de régression non linéaire est ensuite utilisé pour ajuster les résultats numériques. Les résultats démontrent une bonne concordance avec des erreurs relatives inférieures à 5%. Cette recherche offre des perspectives précieuses sur la modélisation statistique du transfert de chaleur pour les ponts thermiques, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et analyse de la performance thermique des bâtiments.

Ainsi, Asdrubali et al. (2012) [43] a présenté une méthodologie quantitative pour évaluer les ponts thermiques dans les bâtiments. L'article met en évidence l'importance de traiter les composants plus faibles de l'enveloppe du bâtiment, tels que les portes, les fenêtres et les ponts thermiques, pour réduire efficacement les pertes de chaleur. L'approche proposée implique la réalisation d'enquêtes thermographiques et un traitement analytique ultérieur pour estimer l'effet des ponts thermiques en tant qu'augmentation en pourcentage de la transmittance thermique des parois. La méthodologie est validée par des analyses expérimentales et numériques, fournissant un outil fiable pour évaluer les pertes de chaleur dans les bâtiments à haute isolation et évaluer les avantages du traitement des ponts thermiques. L'étude souligne le rôle de la thermographie infrarouge comme outil rapide et efficace pour quantifier les effets des ponts thermiques. Les résultats contribuent à optimiser les performances énergétiques en traitant efficacement les ponts thermiques et en réduisant les pertes de chaleur dans les bâtiments.

### **Conclusion de la revue de littérature**

En conclusion, la revue de littérature sur les ponts thermiques dans les enveloppes des bâtiments offre des perspectives précieuses sur divers aspects de leur modélisation, évaluation et analyse de performance. Plusieurs études se sont concentrées sur le développement de méthodes et techniques pour représenter avec précision le transfert de chaleur à travers les ponts thermiques et les incorporer dans les programmes de simulation énergétique des bâtiments. Ces approches, telles que la méthode du mur équivalent, les méthodes mixtes et la représentation de l'espace d'état, ont

montré des résultats prometteurs pour capturer le comportement dynamique des ponts thermiques et améliorer la précision des prédictions de performance énergétique.

La littérature examinée met en évidence l'importance de prendre en compte les ponts thermiques dans la conception des bâtiments et les évaluations de l'efficacité énergétique. Avec l'importance croissante de la conception durable et des réglementations visant à économiser l'énergie, la modélisation et l'évaluation précises des ponts thermiques deviennent cruciales pour atteindre une performance optimale des bâtiments. Les études soulignent que les ponts thermiques peuvent contribuer de manière significative aux pertes de chaleur dans les bâtiments et que négliger leurs effets peut conduire à une sous-estimation de la consommation d'énergie et à des conceptions inefficaces.

Différents types de ponts thermiques, tels que les ponts thermiques de dalle sur terre-plein, à forte inertie et de géométries complexes, ont été étudiés. La littérature fournit des informations sur leur comportement thermique, les méthodes d'évaluation et les solutions potentielles pour réduire les pertes de chaleur. Il est évident que les propriétés du sol, les stratégies d'isolation et les facteurs géométriques jouent un rôle important dans la performance des ponts thermiques. Comprendre ces facteurs et leurs interactions est essentiel pour des stratégies de conception et de rénovation efficaces visant à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Les études examinées soulignent également l'importance des techniques de mesure et d'évaluation pour l'évaluation in situ des ponts thermiques. La thermographie infrarouge et les méthodes numériques, telles que l'inférence bayésienne et la modélisation par éléments finis, ont été utilisées pour mesurer et analyser la performance des ponts thermiques dans des conditions réelles. Ces approches fournissent des informations précieuses sur le comportement thermique réel des composants du bâtiment et aident à identifier les domaines à améliorer.

Dans l'ensemble, la revue de littérature souligne la nécessité de modèles, d'évaluations et de techniques de mesure précises et complètes pour les ponts thermiques dans les enveloppes des bâtiments. En tenant compte de l'impact des ponts thermiques sur la consommation d'énergie et en les incorporant dans les processus de conception et de rénovation, il est possible de réaliser des bâtiments plus durables et plus économes en énergie. Les futures recherches dans ce domaine devraient se concentrer sur l'amélioration des approches de modélisation, la validation des résultats par des mesures sur le terrain et le développement de solutions innovantes pour atténuer les effets des ponts thermiques dans les bâtiments.

## Chapitre III. **Modélisation et Méthodologie**

---

Le troisième chapitre met en évidence l'importance de la modélisation 3D et présente les différentes étapes et méthodes associées. Il souligne également l'utilisation du logiciel Comsol 5.6 pour la modélisation multiphysique et l'analyse de systèmes complexes tels que les ponts thermiques.

---

### **III.1 La modélisation 3D**

La modélisation 3D est une technique de représentation graphique d'objets en trois dimensions à l'aide d'un ordinateur. Elle consiste à créer une représentation numérique d'un objet en utilisant des logiciels spécialisés, qui permettent de manipuler des objets virtuels en trois dimensions.

Cette technique est largement utilisée dans de nombreux domaines, tels que l'architecture, la conception de produits, l'animation, les jeux vidéo, la réalité virtuelle, etc. Elle permet aux utilisateurs de visualiser des objets en trois dimensions, de les modifier en temps réel et de les animer.

La modélisation 3D peut être réalisée à partir de dessins, de plans ou de photographies d'un objet réel, ou à partir de zéro en utilisant des outils de création d'objets virtuels. Elle est généralement utilisée en conjonction avec d'autres technologies telles que l'impression 3D et la réalité virtuelle. [44]

#### **III.1.1 Fonctionnement de la modélisation 3D**

Étant un concept aussi complexe que la modélisation 3D, il s'agit toujours d'une bonne idée de commencer simple et de développer vers la complexité. Lorsque tu apprends comment modéliser en 3D. Elle commence généralement par la création d'une forme primitive comme un plan, une sphère ou un cube.

Ensuite, la forme est manipulée en ajoutant des sommets individuels avec divers outils de modélisation pour obtenir les contours du futur objet. Le maillage obtenu est divisé en polygones qui sont subdivisés en formes plus petites pour créer plus de détails en conséquence.

#### **III.1.2 Les types de modélisation 3D**

Il existe plusieurs types de modélisation 3D, chacun ayant ses propres avantages et utilisations spécifiques. Les principaux types de modélisation 3D sont les suivants :

##### **III.1.2.1 La modélisation polygonale**

Elle opère sur des surfaces organisées en mailles plus ou moins détaillée visages polygonale. Ces surfaces ne peut qu'approcher l'objet final si nous sommes en présence d'un faible niveau de

polygones (Dans ce cas d'espèce, l'objet est dit faible Poly). Dans d'autres cas, un modèle polygonal - dans la modélisation achevée - peut également être formé par un très grand nombre de visages. [45]

### **III.1.2.2 Modélisation de surface**

La modélisation de surface consiste à créer des objets en utilisant des courbes et des surfaces pour former des formes en trois dimensions. Elle est souvent utilisée pour créer des modèles organiques, tels que des personnages ou des animaux.

### **III.1.2.3 Modélisation volumétrique**

La modélisation volumétrique consiste à créer des objets en utilisant des volumes et des formes en trois dimensions pour créer des formes en trois dimensions. Elle est souvent utilisée pour créer des modèles de terrain ou des structures architecturales.

### **III.1.2.4 Modélisation basée sur des images**

La modélisation basée sur des images utilise des images existantes pour créer des modèles en trois dimensions. Cette méthode est souvent utilisée pour la modélisation de bâtiments ou de paysages urbains.

### **III.1.2.5 Modélisation paramétrique**

La modélisation paramétrique utilise des paramètres prédéfinis pour créer des modèles en trois dimensions. Cette méthode est souvent utilisée pour la conception de produits industriels ou mécaniques.

### **III.1.2.6 Modélisation sculpturale**

La modélisation sculpturale est une méthode intuitive de création de modèles 3D. Elle permet de créer des modèles en trois dimensions en sculptant directement la forme à partir d'un bloc de matière virtuel.

### **III.1.2.7 La modélisation de solides**

Aussi appelée CSG, est un type de modélisation géométrique, qui est utilisé notamment dans le domaine technique et CAD, Historiquement, le discours est de la modélisation solide qu'à la fin

des années 60, alors que le premier modéleur solide commercial (appelé Romulus,) remonte à 1981, [46] suivi de granit de PTC avec la sortie de Pro / ENGINEER en 1987, qu'il a introduit le concept de la 3D paramétrique et Parasolid, Unigraphics, en 1988. [47]

Chacun de ces types de modélisation 3D a ses propres avantages et utilisations spécifiques, et certains peuvent être plus adaptés à certains projets que d'autres.

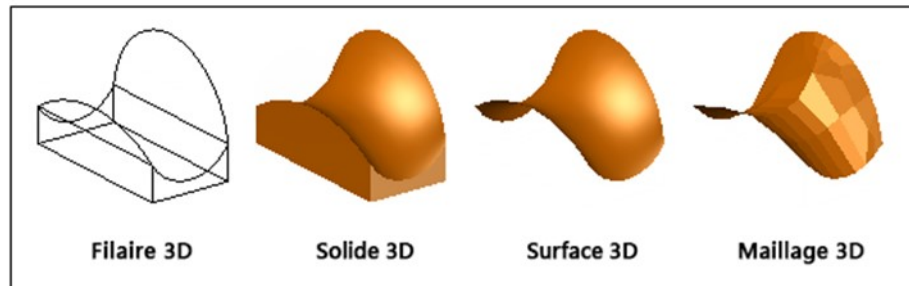


Figure III-1 Types de modèles 3D.

### III.1.3 Les étapes de modélisation 3D

La modélisation 3D est un processus complexe qui implique plusieurs étapes. Voici un aperçu général des étapes typiques de modélisation 3D :

- **Planification** : La planification est la première étape de tout projet de modélisation 3D. Dans cette étape, vous devez définir les objectifs du projet, les contraintes techniques, les détails de conception, les matériaux et les dimensions.
- **Création de la géométrie** : Une fois que vous avez planifié votre projet, vous pouvez commencer à créer la géométrie 3D. La géométrie est la base de tout modèle 3D, et il existe plusieurs outils pour la créer, notamment les outils de sculpture, les modificateurs de maillage et les primitives.
- **Texture et Matériaux** : Une fois que la géométrie est créée, vous pouvez ajouter des textures et des matériaux à votre modèle pour lui donner une apparence réaliste. Vous pouvez appliquer des textures à la surface de votre modèle pour lui donner une apparence plus naturelle.
- **Éclairage** : L'éclairage est crucial pour créer un modèle 3D réaliste. Vous pouvez ajouter des lumières à votre scène et les positionner pour éclairer votre modèle de la manière

souhaitée. Vous pouvez également régler les propriétés des lumières pour ajuster l'ambiance générale de votre scène.

- **Animation** : Si vous souhaitez animer votre modèle 3D, vous pouvez créer des séquences d'animation. Cela implique la création d'une série de poses clés et la définition de trajectoires pour les mouvements de votre modèle.
- **Rendu** : La dernière étape consiste à rendre votre modèle 3D final. Cela implique la configuration des paramètres de rendu et l'exportation de votre modèle dans un format compatible avec votre logiciel de visualisation 3D.

Ces étapes ne sont pas exhaustives et peuvent varier en fonction du logiciel de modélisation 3D que vous utilisez et du type de projet que vous réalisez.

## III.2 Methodologie

### III.2.1 Description de la méthode de modélisation 3D utilisée pour étudier le pont thermique

Comsol 5.6 est un logiciel de modélisation multiphysique largement utilisé dans le domaine de l'ingénierie et de la recherche. Il offre une plate-forme puissante pour la simulation et l'analyse de systèmes complexes impliquant des interactions multiphysiques, telles que la mécanique des structures, l'électromagnétisme, la thermique, la fluïdique, l'acoustique, etc.

L'une des principales forces de Comsol 5.6 réside dans sa capacité à traiter des problèmes couplés, où plusieurs phénomènes physiques interagissent simultanément. Par exemple, il permet de modéliser la chaleur générée par des dispositifs électriques, la propagation d'ondes électromagnétiques dans des matériaux, ou encore le transfert de chaleur et la fluïdique dans des systèmes de refroidissement.

Comsol 5.6 propose une interface conviviale qui permet aux utilisateurs de construire des modèles complexes à l'aide d'une approche basée sur des équations physiques. Les utilisateurs peuvent choisir parmi une vaste bibliothèque de matériaux prédéfinis, de conditions aux limites et de modèles physiques pour construire leur modèle. De plus, le logiciel offre également la possibilité d'importer des géométries 3D à partir de logiciels de CAO, ce qui facilite la création de modèles réalistes.

Une autre caractéristique intéressante de Comsol 5.6 est sa capacité à effectuer des analyses paramétriques et des études de sensibilité. Les utilisateurs peuvent explorer l'impact des variations



de paramètres sur les résultats de simulation, ce qui est particulièrement utile pour l'optimisation de la conception ou pour étudier le comportement d'un système dans différentes conditions.

Comsol 5.6 est également connu pour sa flexibilité et son extensibilité. Il permet aux utilisateurs de créer leurs propres modèles physiques personnalisés en utilisant l'environnement de développement intégré (IDE) de Comsol. Cela permet d'étendre les fonctionnalités du logiciel pour répondre à des besoins spécifiques ou pour simuler des phénomènes physiques uniques.

Cependant, il convient de noter que Comsol 5.6 est un logiciel complexe et nécessite une certaine courbe d'apprentissage. La création et la résolution de modèles peuvent demander du temps et des ressources informatiques, en particulier pour les systèmes complexes ou les simulations à haute résolution. De plus, l'interprétation des résultats peut également nécessiter des connaissances spécialisées pour une analyse correcte et approfondie.

En résumé, Comsol 5.6 est un logiciel puissant et polyvalent pour la modélisation multiphysique. Il offre une large gamme de fonctionnalités pour résoudre des problèmes complexes impliquant plusieurs phénomènes physiques. Cependant, son utilisation efficace nécessite une maîtrise des concepts physiques, ainsi qu'une familiarité avec l'interface et les fonctionnalités spécifiques du logiciel.

### **III.2.2 Présentation des données d'entrée nécessaires pour la modélisation**

Dans le cadre de la modélisation du pont thermique dans une structure d'un bâtiment avec le logiciel COMSOL 5.6, les données d'entrée nécessaires peuvent inclure :

Les dimensions de la structure : hauteur, largeur, longueur, épaisseur des parois, etc.

Les propriétés thermiques des matériaux de construction : conductivité thermique, densité, chaleur spécifique, coefficient de diffusion de la vapeur d'eau, etc.

Les conditions aux limites : température de l'air extérieur, température intérieure, humidité relative, vitesse du vent, etc.

Les propriétés géométriques du pont thermique : dimensions, forme, orientation, etc.

Les conditions de fonctionnement : heures d'utilisation, occupation du bâtiment, usage, etc.

### **III.2.3 Les étapes de la modélisation numérique du pont thermique**

L'étape de modélisation numérique du pont thermique dans une structure d'un bâtiment avec le logiciel COMSOL 5.6 peut être divisée en plusieurs étapes, telles que :

**Création d'un modèle 3D de la structure** : le modèle doit être créé en utilisant les dimensions et les propriétés thermiques des matériaux de construction. Les outils de modélisation 3D disponibles dans COMSOL peuvent être utilisés pour créer la géométrie du modèle.

**Définition des conditions aux limites** : les conditions aux limites doivent être définies en fonction des propriétés géométriques et des conditions de fonctionnement du pont thermique. Les températures, l'humidité, la vitesse du vent et d'autres paramètres peuvent être définis comme des conditions aux limites.

**Définition des propriétés thermiques des matériaux** : les propriétés thermiques des matériaux, telles que la conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique, doivent être définies pour tous les matériaux de construction utilisés dans la structure.

**Modélisation du pont thermique** : une fois que le modèle 3D est créé, le pont thermique peut être modélisé en utilisant les dimensions, la forme et les propriétés géométriques du pont thermique. Les propriétés thermiques du matériau du pont thermique doivent également être définies.

**Analyse de la modélisation** : une fois que toutes les étapes ci-dessus sont terminées, une analyse de la modélisation doit être effectuée pour simuler le transfert de chaleur à travers le pont thermique. Les résultats doivent être examinés pour évaluer la performance thermique de la structure.

**Optimisation** : si les résultats de la modélisation montrent une mauvaise performance thermique de la structure, des modifications peuvent être apportées à la géométrie, aux propriétés thermiques des matériaux ou aux conditions aux limites pour améliorer la performance thermique.

L'étape de modélisation numérique est essentielle pour évaluer la performance thermique de la structure et pour identifier les domaines où des améliorations peuvent être apportées pour réduire les pertes de chaleur dues aux ponts thermiques.

## Chapitre IV. Étude de cas

---

Le quatrième chapitre présente une étude de cas sur la modélisation thermique d'une structure à deux étages avec des murs intérieurs et extérieurs, des dalles en béton et un pont thermique entre les étages. L'objectif est d'évaluer les pertes de chaleur et de trouver des moyens de les réduire pour améliorer l'efficacité énergétique.

---

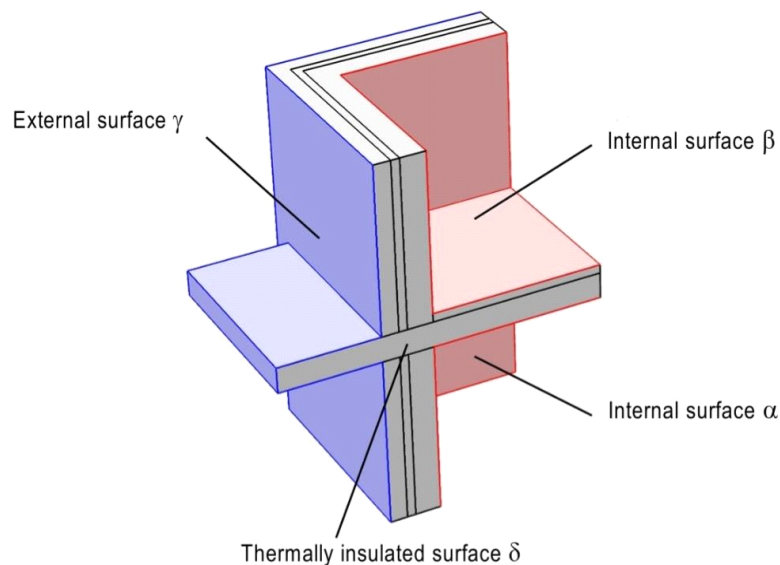
## IV.1 Description de la structure du bâtiment étudié

Dans notre projet PFE, on s'est intéressé à étudier la modélisation thermique d'une structure, composée de deux étages : étage 1 **alpha** et étage 2 **béta**. La structure se compose d'un mur intérieur et extérieur avec une isolation thermique entre eux, avec une dalle pleine en béton pour les planchers. Le bâtiment est situé dans une zone à climat tempéré, avec des températures hivernales pouvant atteindre 0°C et des températures estivales atteignant 40°C.

Le pont thermique étudié se situe entre les deux étages du bâtiment, au niveau de la dalle de plancher. Il s'agit d'une zone où la continuité thermique de la structure est rompue, créant ainsi une zone de déperdition de chaleur. La modélisation de cette zone de pont thermique permettra d'évaluer la perte de chaleur due à cette discontinuité thermique et d'identifier les moyens pour réduire cette perte de chaleur, afin d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment.

## IV.2 Géométrie et conditions aux limites

Nous avons étudié la conduction thermique dans une structure de bâtiment séparant deux étages de l'environnement extérieur dans notre projet de fin d'études (PFE). La géométrie de notre modèle du pont thermique en 3D est présentée dans la Figure 4.1.



**Figure IV-1 La géométrie du model étudié**

Comme montré dans la figure précédente, les surfaces de la structure sont divisées en quatre parties :

- surface de 1er étage  $\alpha$  ;
- surface de 2eme étage  $\beta$  ;
- l'extérieur  $\gamma$  ;
- et les surfaces thermiquement isolées restantes,  $\delta$  ;

Dans notre étude, les épaisseurs des murs et de l'isolation de la géométrie de notre modèle 3D sont les suivantes : l'épaisseur du mur extérieur est de 10 cm, l'épaisseur de l'isolation thermique est de 5 cm, et l'épaisseur du mur intérieur est de 15 cm. Ces dimensions sont importantes pour évaluer le transfert de chaleur à travers la structure du bâtiment et analyser l'efficacité énergétique globale.

Les conditions aux limites thermiques dans l'étude des cas considèrent les surfaces non spécifiées comme adiabatiques, ce qui permet de faciliter les calculs et d'évaluer de manière plus réaliste les performances thermiques de la structure.

### IV.3 Simulation du transfert de chaleur à travers le pont thermique

Dans notre projet de fin d'études (PFE), nous avons introduit trois températures dans la structure. La température du mur intérieur du 1er étage, notée  $\alpha$ , est de 25 °C. La température du mur intérieur du 2ème étage, notée  $\beta$ , est de 20 °C. Quant à la température extérieure, notée  $\gamma$ , nous avons considéré deux cas : 0 °C et 40 °C. Ces températures sont essentielles pour évaluer le transfert de chaleur à travers la structure et analyser les performances thermiques du bâtiment.

Les propriétés thermiques et physiques des matériaux utilisés dans la structure étudiée, tels que le mur intérieur, le mur extérieur et l'isolant thermique, sont présentées dans le Tableau IV.1:

Position	Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)	La masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique (J/kg.K)
Isolant thermique	Laine de roche	0.04	200	800
Mur intérieur	Brique	0.7	2000	850
Mur extérieur	Béton	1	2000	1000

Tableau IV.1 Propriétés thermiques et physiques des matériaux utilisés

Ces propriétés sont essentielles pour modéliser le transfert de chaleur à travers la structure et évaluer les performances thermiques du bâtiment.

### IV.3.1 Maillage

Pour le maillage de notre structure, on s'est intéressé à utiliser le maillage triangulaire : c'est une technique utilisée en informatique et en mathématiques pour représenter des objets ou des surfaces sous forme de triangles interconnectés. Il est largement utilisé dans des domaines tels que la modélisation 3D, la simulation numérique, la visualisation graphique et la réalité virtuelle.

Dans un maillage triangulaire, un objet ou une surface est divisé en un ensemble de triangles qui se recouvrent. Chaque triangle est défini par trois points distincts appelés sommets, et les côtés des triangles sont formés par les segments de droite reliant ces sommets.

Le maillage triangulaire présente plusieurs avantages. Il est relativement simple à implémenter et à manipuler mathématiquement, ce qui en fait une option courante pour de nombreux algorithmes et applications. De plus, les triangles peuvent être utilisés pour représenter des surfaces courbes de manière approximative, en subdivisant l'espace entre les sommets pour obtenir une représentation plus précise. La figure 4.2 présente le maillage de notre structure étudiée :

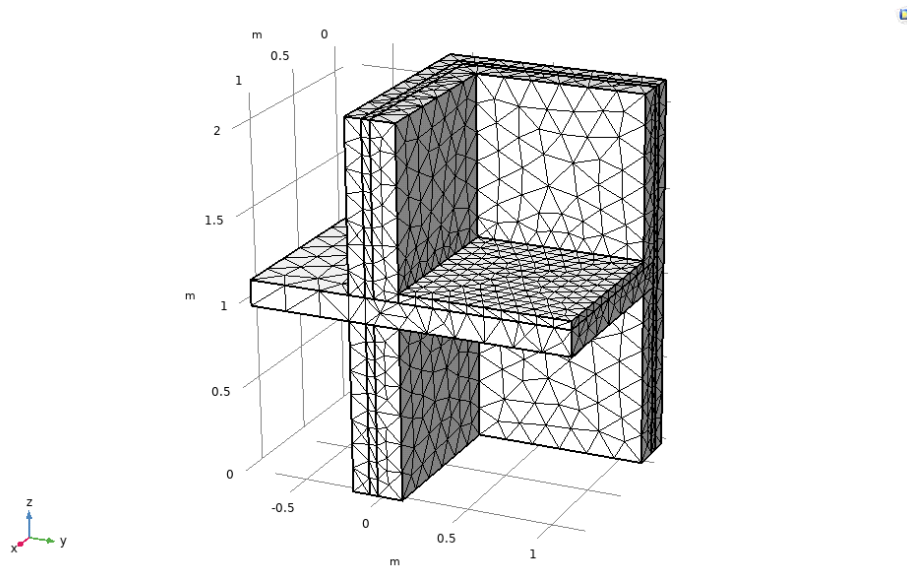


Figure IV-2 Maillage (physics-controlled meshing)

## IV.4 Resultats et discussions

### IV.4.1 Premier cas

Dans le cas 1 de notre étude, nous avons établi les conditions suivantes : une température extérieure de  $0^{\circ}\text{C}$ , une température intérieure  $\alpha$  de  $25^{\circ}\text{C}$  et une température intérieure  $\beta$  de  $20^{\circ}\text{C}$ . En analysant ces paramètres, nous avons pu évaluer les performances thermiques du bâtiment et étudier les transferts de chaleur à travers ses différentes composantes. Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer les températures minimales en  $\alpha$  et en  $\beta$ , qui se sont avérées être respectivement de  $14.34^{\circ}\text{C}$  et  $14.45^{\circ}\text{C}$ . De plus, nous avons quantifié les flux de chaleur dans les zones  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ , obtenant ainsi les valeurs de  $55.12\text{ W}$  pour  $\alpha$ ,  $22.09\text{ W}$  pour  $\beta$  et  $-77.18\text{ W}$  pour  $\gamma$ . Ces informations sont essentielles pour comprendre les pertes ou gains de chaleur dans le bâtiment et pour proposer des solutions visant à améliorer son efficacité énergétique.

Ce tableau est un récapitulatif de la température minimale et le flux de chaleur dans les trois différents environnements :

	Température minimale ( $^{\circ}\text{C}$ )	Flux de chaleur (W)
$\alpha$	14.34	55.12
$\beta$	14.45	22.09
$\gamma$	-	-77.18

**Tableau IV.2 récapitulatif des températures minimales et les flux de chaleur pour le cas 1**

La Figure 4.3 présente la variation des températures maximales et minimales à travers la structure. Les résultats montrent que la température minimale enregistrée dans la structure est de  $0.0034^{\circ}\text{C}$  à l'extérieur du bâtiment, indiquant un niveau de refroidissement significatif. D'autre part, la température maximale atteint  $22.86^{\circ}\text{C}$  dans le premier étage, soulignant une augmentation de la chaleur à cet endroit précis. Ces observations mettent en évidence les variations thermiques importantes auxquelles la structure est soumise, avec des écarts considérables entre les températures extérieures et intérieures. Cela souligne l'importance d'une isolation efficace et d'une gestion adéquate de la température pour garantir le confort des occupants et l'efficacité énergétique du bâtiment.

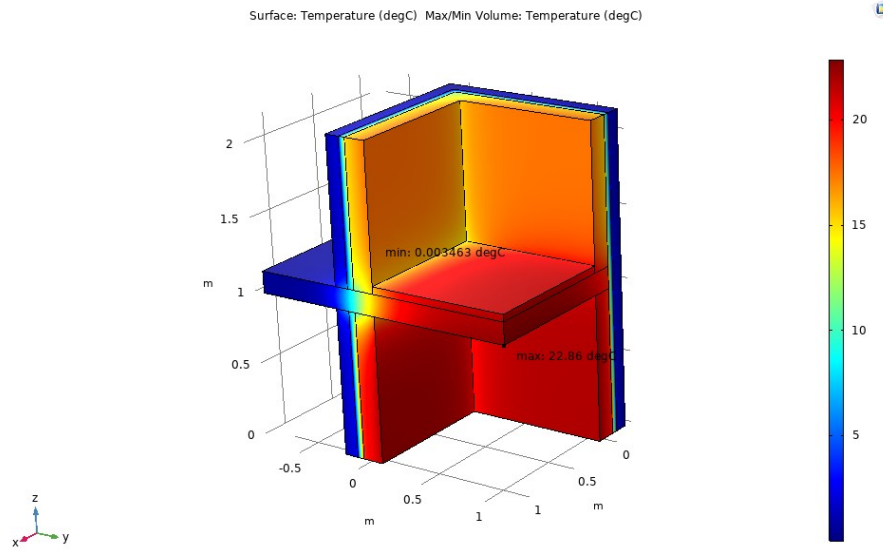


Figure IV-3 Variation des températures maximales et minimales à travers la structure

La Figure 4.4 présente la variation des températures maximales et minimales à travers la structure. Les résultats indiquent que la température maximale enregistrée dans la structure est de 22.86°C, située dans le premier étage loin du mur extérieur. Cela suggère une accumulation de chaleur à cet endroit spécifique. D'autre part, la température minimale observée est de 14.43°C dans le premier étage, près du plafond et à proximité du mur extérieur. Cette baisse de température peut être attribuée à la perte de chaleur à travers le mur extérieur.

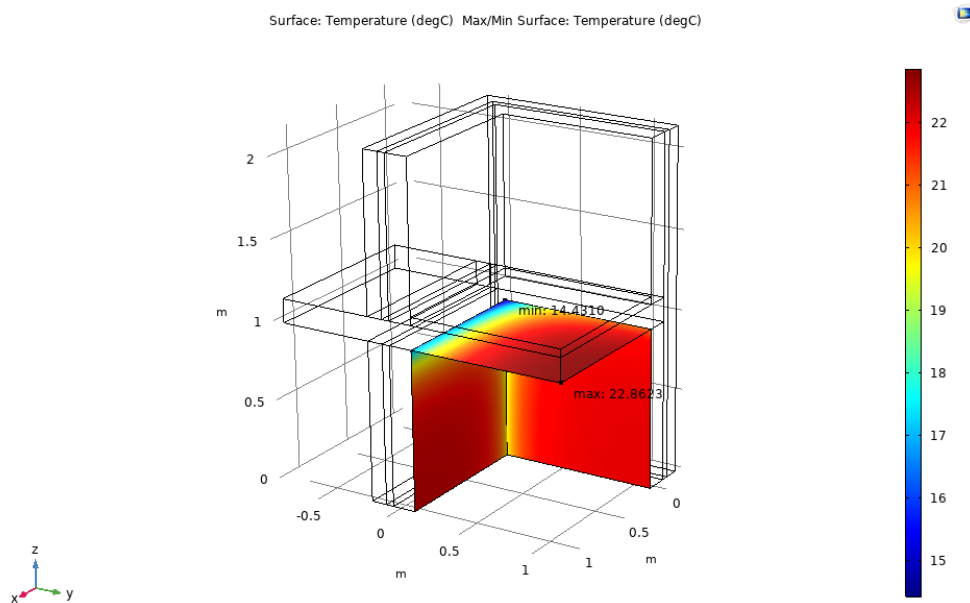
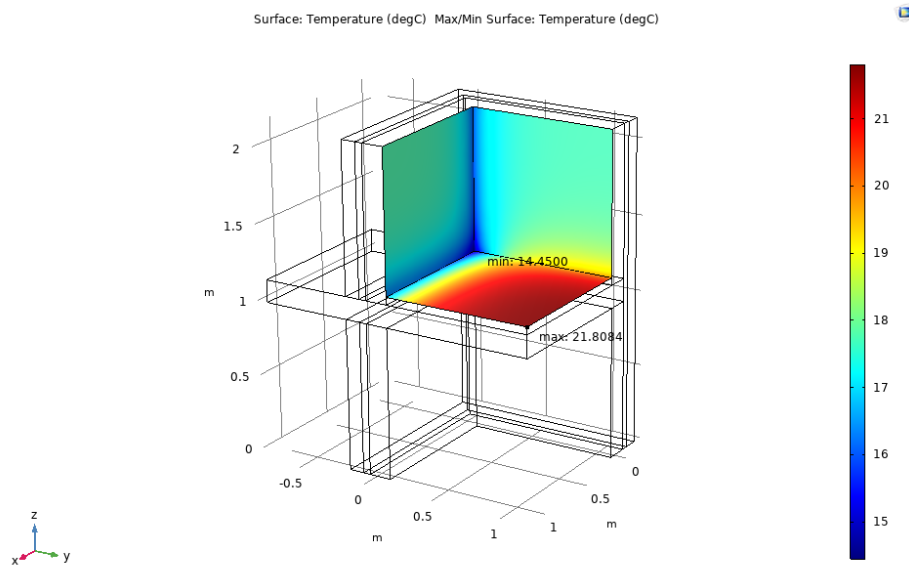


Figure IV-4 Variation des températures minimales et maximales au sein du premier étage ( $\alpha$ )



La Figure 4.5 illustre la variation des températures maximales et minimales à travers la structure. Les résultats révèlent que la température maximale enregistrée dans la structure est de 21.80°C, située dans le deuxième étage éloigné du mur extérieur. Cela indique une accumulation de chaleur à cet endroit spécifique. D'autre part, la température minimale observée est de 14.45°C dans le deuxième étage, près de la plateforme et à proximité du mur extérieur. Cette diminution de température peut être attribuée à la perte de chaleur à travers le mur extérieur.



**Figure IV-5 Variation des températures minimales et maximales au sein du deuxième étage (β)**

Ces variations de température soulignent l'influence de la géométrie de la structure et de l'isolation thermique sur la répartition thermique à l'intérieur du bâtiment. Il est essentiel de prendre en compte ces variations lors de la conception du système de chauffage et de l'isolation pour assurer un environnement intérieur confortable et optimiser l'efficacité énergétique.

La modélisation du cas 1, où la température extérieure est de 0°C, la température intérieure du premier étage ( $\alpha$ ) est de 25°C et la température intérieure du deuxième étage ( $\beta$ ) est de 20°C, a donné les résultats suivants :

- La température minimale observée sur la surface  $\alpha$  (premier étage) est de 14.34°C, ce qui suggère une perte de chaleur significative à travers ce mur. Une différence de température de

10.66°C est donc observée entre la température intérieure et la température minimale sur la surface  $\alpha$ .

- De même, la température minimale sur la surface  $\beta$  (deuxième étage) est de 14.45°C, indiquant une perte de chaleur à travers ce mur. Une différence de température de 5.55°C est observée entre la température intérieure et la température minimale sur la surface  $\beta$ .
- Le flux de chaleur à travers la surface  $\alpha$  est de 55.12 W, ce qui signifie que 55.12 Watts de chaleur sont perdus à travers le mur du premier étage.
- Le flux de chaleur à travers la surface  $\beta$  est de 22.09 W, indiquant que 22.09 Watts de chaleur sont perdus à travers le mur du deuxième étage.
- Le flux de chaleur à travers la surface  $\gamma$  (surface extérieure) est de -77.18 W, ce qui implique que la structure reçoit un flux de chaleur de -77.18 Watts de l'extérieur, indiquant une perte de chaleur nette.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'isolation thermique pour réduire les pertes de chaleur à travers les murs du premier et du deuxième étage. Ils soulignent également l'importance de concevoir des solutions efficaces pour minimiser les pertes de chaleur à travers les surfaces extérieures du bâtiment.

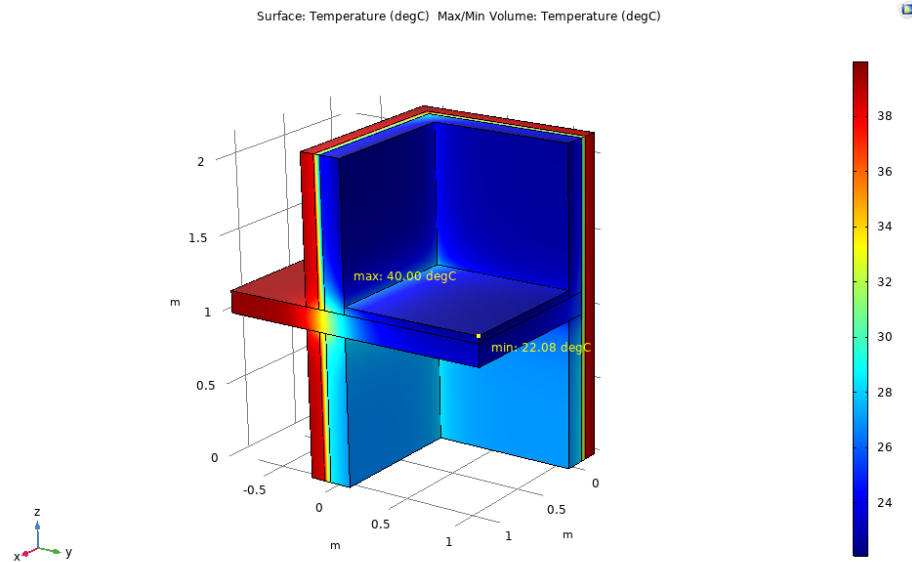
#### IV.4.2 Deuxième cas

Dans ce cas, avec une température extérieure de 40°C, une température intérieure de 25°C pour  $\alpha$  et de 20°C pour  $\beta$ , nous avons relevé les températures minimales enregistrées. La température minimale sur  $\alpha$  est de 23.17°C, tandis que sur  $\beta$  elle est de 22.07°C. Les flux de chaleur correspondants sont de -16.30 W pour  $\alpha$  et de -43.02 W pour  $\beta$ , ce qui indique une perte de chaleur dans ces zones. Le flux de chaleur en  $\gamma$  est de 59.32 W, représentant un gain net de chaleur dans le système étudié.

	Température minimale (°C)	Flux de chaleur (W)
$\alpha$	23.17	-16.3
$\beta$	22.07	-43.02
$\gamma$		59.32

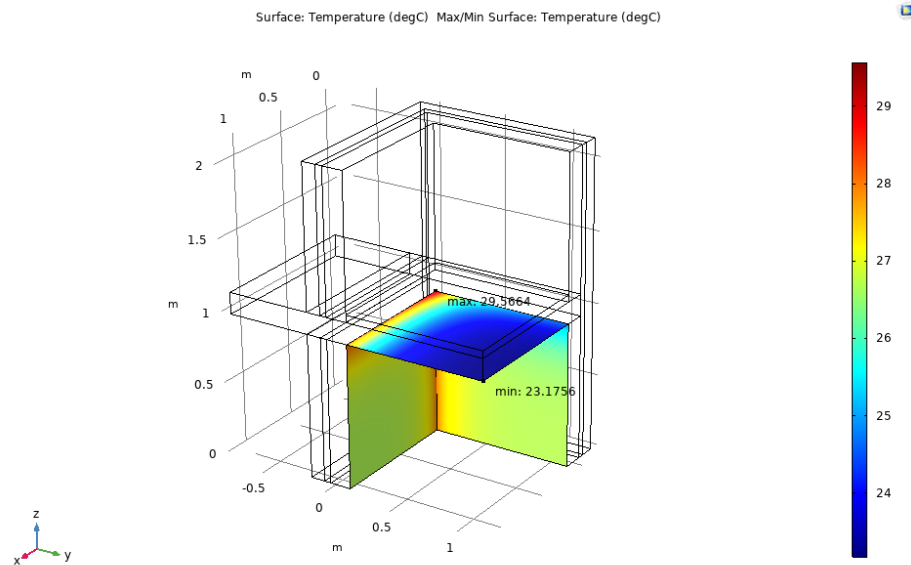
Tableau IV.3 récapitulatif des températures minimales et les flux de chaleur pour le cas 2

La Figure 4.6 illustre la variation des températures maximales et minimales à travers la structure. Les résultats montrent que la température maximale enregistrée dans la structure est de 40°C à l'extérieur du bâtiment, indiquant une influence directe de la température extérieure. D'autre part, la température minimale observée est de 22.08°C dans le deuxième étage, mettant en évidence une différence de température significative par rapport à la température maximale.



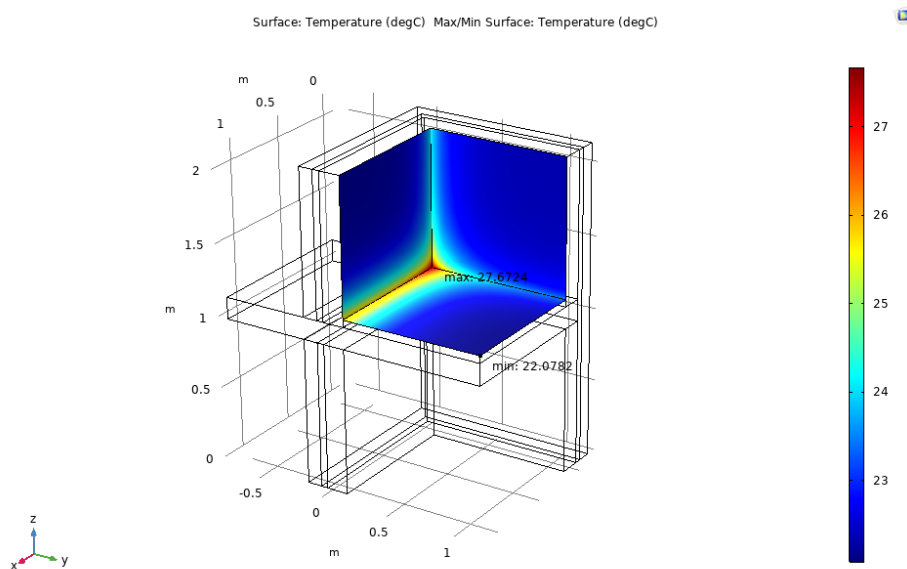
**Figure IV-6 Variation des températures maximales et minimales à travers la structure**

La Figure 4.7 présente la variation des températures maximales et minimales à travers la structure. Les résultats indiquent que la température maximale enregistrée dans la structure est de 29.56°C, située dans le premier étage près du mur extérieur. Cela peut être dû à une accumulation de chaleur à cet endroit spécifique en raison de l'interaction avec l'environnement extérieur. D'autre part, la température minimale observée est de 23.17°C dans le premier étage, loin du mur extérieur et près du plafond.



**Figure IV-7 Variation des températures minimales et maximales au sein du premier étage ( $\alpha$ )**

La Figure 4.8 illustre la variation des températures maximales et minimales à travers la structure. Les résultats montrent que la température maximale enregistrée dans la structure est de  $27.67^{\circ}\text{C}$  dans le deuxième étage, près du mur extérieur. Cela peut être attribué à l'influence de l'exposition directe à la chaleur externe. D'autre part, la température minimale observée est de  $22.07^{\circ}\text{C}$  dans le deuxième étage, près de la plateforme et également à proximité du mur extérieur.



**Figure IV-8 Variation des températures minimales et maximales au sein du deuxième étage ( $\beta$ )**

L'interprétation des résultats pour le cas 2 de modélisation, où la température extérieure est de 40°C, la température intérieure au premier étage ( $\alpha$ ) est de 25°C et la température intérieure au deuxième étage ( $\beta$ ) est de 20°C, est la suivante :

- La température minimale observée sur la surface  $\alpha$  (premier étage) est de 23.17°C, ce qui indique une légère perte de chaleur à travers ce mur. La différence de température entre la température intérieure et la température minimale sur la surface  $\alpha$  est de 1.83°C.
- De même, la température minimale observée sur la surface  $\beta$  (deuxième étage) est de 22.07°C, ce qui suggère également une légère perte de chaleur à travers ce mur. La différence de température entre la température intérieure et la température minimale sur la surface  $\beta$  est de 2.93°C.
- Le flux de chaleur à travers la surface  $\alpha$  est de -16.30 W, ce qui indique qu'une quantité de chaleur de 16.30 Watts est transférée du premier étage vers l'extérieur.
- Le flux de chaleur à travers la surface  $\beta$  est de -43.02 W, ce qui signifie que 43.02 Watts de chaleur sont transférés du deuxième étage vers l'extérieur.
- Le flux de chaleur à travers la surface  $\gamma$  (surface extérieure) est de 59.32 W, indiquant que la structure reçoit un flux de chaleur de 59.32 Watts de l'extérieur.

Ces résultats suggèrent que, dans le cas d'une température extérieure élevée, il y a une légère perte de chaleur à travers les murs du premier et du deuxième étage. Cependant, la structure reçoit un flux de chaleur net positif de l'extérieur, ce qui peut entraîner une augmentation de la température à l'intérieur du bâtiment. Il est important de prendre en compte ces flux de chaleur lors de la conception des systèmes de climatisation et d'isolation thermique pour maintenir une température intérieure confortable et réduire la surconsommation d'énergie.

#### **IV.4.3 Comparaison entre les deux cas**

La comparaison entre le cas 1 et le cas 2 permet de mettre en évidence les différences de comportement thermique de la structure dans des conditions environnementales distinctes. Voici une interprétation des résultats entre ces deux cas :

#### IV.4.3.1 Températures minimales

Dans le cas 1 (température extérieure de  $0^{\circ}\text{C}$ ), les températures minimales observées sur les surfaces  $\alpha$  (premier étage) et  $\beta$  (deuxième étage) sont relativement basses ( $14.34^{\circ}\text{C}$  et  $14.45^{\circ}\text{C}$  respectivement). Cela suggère une perte de chaleur significative à travers les murs de la structure, conduisant à des températures intérieures plus fraîches.

En revanche, dans le cas 2 (température extérieure de  $40^{\circ}\text{C}$ ), les températures minimales sur les surfaces  $\alpha$  et  $\beta$  sont plus élevées ( $23.17^{\circ}\text{C}$  et  $22.07^{\circ}\text{C}$  respectivement). Cela indique une réduction de la perte de chaleur à travers les murs, entraînant des températures intérieures relativement plus chaudes.

#### IV.4.3.2 Flux de chaleur

Dans le cas 1, les flux de chaleur à travers les surfaces  $\alpha$  et  $\beta$  sont positifs ( $55.12\text{ W}$  et  $22.09\text{ W}$  respectivement), ce qui signifie que la chaleur est transférée de l'intérieur vers l'extérieur. En revanche, le flux de chaleur à travers la surface  $\gamma$  (extérieure) est négatif ( $-77.18\text{ W}$ ), indiquant une perte nette de chaleur de la structure vers l'extérieur.

Dans le cas 2, les flux de chaleur sur les surfaces  $\alpha$  et  $\beta$  sont négatifs ( $-16.30\text{ W}$  et  $-43.02\text{ W}$  respectivement), ce qui suggère un transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur. De plus, le flux de chaleur à travers la surface  $\gamma$  est positif ( $59.32\text{ W}$ ), indiquant un gain net de chaleur provenant de l'extérieur vers la structure.

Il faut noter que la comparaison entre le cas 1 et le cas 2 met en évidence l'impact significatif de la température extérieure sur les flux de chaleur et les températures intérieures de la structure. Les résultats montrent que des températures extérieures plus élevées réduisent la perte de chaleur à travers les murs et peuvent conduire à des températures intérieures plus élevées. Cette information est importante pour concevoir des systèmes de chauffage et d'isolation appropriés afin de maintenir un environnement intérieur confortable et d'optimiser l'efficacité énergétique du bâtiment.

#### IV.5 Conclusion du chapitre IV

En comparant le cas 1 (température extérieure de  $0^{\circ}\text{C}$ ) et le cas 2 (température extérieure de  $40^{\circ}\text{C}$ ), nous pouvons observer des différences significatives dans les résultats de la modélisation du pont thermique dans la structure du bâtiment.

Dans le cas 1, où la température extérieure est basse, nous constatons que la température minimale dans la structure est de 14.43°C dans le premier étage près du mur extérieur. Cela indique une certaine perte de chaleur à travers le pont thermique, conduisant à une légère diminution de la température intérieure.

En revanche, dans le cas 2, où la température extérieure est élevée, la température minimale dans la structure est de 22.08°C dans le deuxième étage. Cela suggère une moindre perte de chaleur à travers le pont thermique, ce qui permet de maintenir une température intérieure plus élevée.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les conditions climatiques extérieures dans la modélisation et la gestion des ponts thermiques. Les températures extrêmes peuvent avoir un impact significatif sur les transferts de chaleur à travers la structure du bâtiment, ce qui affecte directement le confort thermique à l'intérieur.

Il est donc crucial de concevoir des solutions d'isolation et de gestion thermique adaptées, en tenant compte des variations saisonnières et des conditions climatiques spécifiques à la région. Cela permettra d'optimiser l'efficacité énergétique du bâtiment, de réduire les pertes de chaleur indésirables et d'améliorer le confort des occupants.

## Conclusion générale

Dans notre projet PFE, on a présenté une étude de cas sur la modélisation thermique d'une structure à deux étages avec des murs intérieurs et extérieurs, des dalles en béton et un pont thermique entre les étages. L'objectif est d'évaluer les pertes de chaleur et de trouver des moyens de les réduire pour améliorer l'efficacité énergétique.

La géométrie de la structure est décrite, avec des murs intérieurs, des isolants thermiques et des dimensions spécifiques. Un maillage triangulaire est utilisé pour représenter la structure et évaluer le transfert de chaleur.

Des simulations de transfert de chaleur sont effectuées en introduisant différentes températures, montrant des variations importantes de température à travers la structure et soulignant l'importance de l'isolation thermique et de la gestion de la température.

Deux cas sont étudiés avec des températures extérieures de 0°C et 40°C, montrant des différences significatives de température entre les surfaces intérieures et extérieures, ainsi que des pertes de chaleur à travers les murs. Les flux de chaleur sont évalués pour quantifier les pertes de chaleur.

En conclusion générale, l'étude des cas présentée dans notre étude met en évidence l'importance cruciale de l'isolation thermique et de la gestion de la température pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Les résultats obtenus à travers les simulations de transfert de chaleur démontrent les variations significatives de température à travers la structure et les pertes de chaleur à travers les murs. Ces pertes de chaleur peuvent avoir un impact négatif sur le confort des occupants et entraîner une consommation énergétique plus élevée.

Afin de réduire les pertes de chaleur et d'améliorer l'efficacité énergétique, il est essentiel de mettre en œuvre une isolation thermique adéquate et de concevoir un système de chauffage efficace. L'identification et la gestion des ponts thermiques, comme celui étudié entre les deux étages de la structure, sont également essentielles pour minimiser les pertes de chaleur.

Les résultats de cette étude de cas peuvent être utilisés pour guider les décisions de conception et de gestion thermique dans les bâtiments, permettant ainsi de créer des environnements intérieurs confortables tout en réduisant la consommation d'énergie. Il est également important de souligner



l'importance de l'optimisation continue de l'isolation thermique et du système de chauffage, car les conditions environnementales et les exigences énergétiques peuvent varier au fil du temps.

En somme, cette étude souligne l'importance de prendre en compte les aspects thermiques dès les phases de conception des bâtiments afin de garantir une performance énergétique optimale. Cela contribuera à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à la préservation des ressources naturelles et à la création de bâtiments durables et confortables pour les occupants.

## Perspectives

Voici quelques perspectives pour votre projet fin d'études

**Élargir l'échantillon** : Pour obtenir des résultats plus représentatifs, nous pourrions envisager d'élargir l'échantillon en incluant davantage de bâtiments ou en effectuant des études sur différents types de bâtiments tels que des maisons individuelles, des immeubles de bureaux ou des structures industrielles. Cela nous permettrait d'obtenir une vision plus globale des ponts thermiques et de leurs impacts sur le confort thermique.

**Approfondir la recherche sur les matériaux** : Nous pourrions également mener des recherches approfondies sur les matériaux d'isolation thermique. En explorant de nouveaux matériaux innovants ou des technologies émergentes, nous pourrions découvrir des solutions offrant de meilleures performances en termes d'efficacité énergétique. Cela pourrait ouvrir la voie à de nouvelles méthodes pour réduire les ponts thermiques.

**Intégrer les aspects durables** : Il serait bénéfique d'intégrer des aspects durables dans notre étude, tels que l'utilisation de sources d'énergie renouvelable, la conception bioclimatique ou l'application de normes de construction respectueuses de l'environnement. En créant des bâtiments à faible empreinte carbone, nous favoriserions la durabilité et la responsabilité environnementale.

**Collaborer avec l'industrie** : Établir des partenariats avec des acteurs de l'industrie du bâtiment, tels que des architectes, des ingénieurs en génie civil ou des entreprises de construction, nous permettrait d'appliquer nos résultats de recherche dans des projets concrets. Cela favoriserait également la diffusion des connaissances et des bonnes pratiques en matière d'amélioration du confort thermique.

## Références bibliographiques

- [1] <https://fr.khanacademy.org/science/physics/thermodynamics/specific-heat-and-heat-transfer/a/what-is-thermal-conductivity>
- [2] B. Debich, « Modélisation, simulation et fiabilité des matériaux à changement de phase pour l'automobile et l'aéronautique », Doctorat, Normandie Université, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03572379/document>
- [3] A. ALLAOUI, « Modélisation thermique des matériaux magnétiques dans les micro-convertisseurs », Doctorat, USTO-MB, 2016. [En ligne]. Disponible sur: [http://www.univ-usto.dz/theses\\_en\\_ligne/doc\\_num.php?explnum\\_id=1704](http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=1704)
- [4] « Internal Combustion Engine Heat Transfer Outline », [www.engr.colostate.edu](http://www.engr.colostate.edu). [https://www.engr.colostate.edu/~allan/heat\\_trans/page4/page4f.html](https://www.engr.colostate.edu/~allan/heat_trans/page4/page4f.html)
- [5] <http://www.prog-onsen.com/echanges-thermique-et-principales.html>
- [6] <http://formationdelavie.free.fr/atmosphere.htm>
- [7] <http://www.prog-onsen.com/echanges-thermique-et-principales.html>
- [8] « Thermal resistance of a heatsink », [fischerelektronik.de](http://www.fischerelektronik.de). <https://www.fischerelektronik.de/en/service-en/technical-information/thermal-resistance-of-a-heatsink/>
- [9] [http://www.thermique-du-batiment.wikibis.com/conduction\\_thermique.php](http://www.thermique-du-batiment.wikibis.com/conduction_thermique.php)
- [10] Thermoconcept, « Conductivité thermique ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.thermoconcept-sarl.com/documents/conductivite-thermique/>
- [11] « Caractérisation des flux d'énergie », [disciplines.ac-toulouse.fr](http://disciplines.ac-toulouse.fr). <https://disciplines.ac-toulouse.fr/sii/sites/sii.disciplines.ac-toulouse.fr>
- [12] N. Connor, « Qu'est-ce qu'un coefficient de transfert de chaleur par convection – Définition », [thermal Engineering](http://www.thermal-engineering.org). <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-quun-coefficient-de-transfert-de-chaleur-par-convection-definition/>
- [13] « Propagation de la chaleur ». <https://www.lyc-diderot.ac-aix-marseille.fr/eleves/cours/bts-tp-bat/cours.html>
- [14] « Nombres adimensionnels ». <https://hmf.enseiht.fr/travaux/projnum/book/export/html/2803>

- [15] P. Marty, « Transferts thermiques convectifs », 2012. <http://www.legi.grenoble-inp.fr/people/Philippe.Marty/cours-convection-M2.pdf>
- [16] R. Smith, H. Inomata, et C. Peters, « Supercritical Fluid Science and Technology », Sciencedirect, 2013. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/grashof-number>
- [17] M. Gariffo, « Semi-conducteurs : Pour la Maison blanche, 2022 sera synonyme de pénurie », [zdnet.fr](http://zdnet.fr), 26 janvier 2022. <https://www.zdnet.fr/actualites/semi-conducteurs-pour-la-maison-blanche-2022-sera-synonyme-de-penurie-39936307.htm>
- [18] ASHRAE Handbook – Fundamentals, chapitre 23 : « Heat, Air, and Moisture Control in Building Assemblies—Fundamentals » (2017)
- [19] ISO 14683 :2007 « Calcul des ponts thermiques linéaires – Simplification des méthodes et présentation des données »
- [20] Infomind Sàrl, Catalogue des ponts thermiques, Office fédéral de l'énergie OFEN, Zurich, 126 p, 2003.
- [21] Les essentiels de l'habitat, introduction à la thermique du bâtiment, disponible sur : <http://www.constuireavecsaint-gobian.fr>, (Consulter le 25/12/2021).
- [22] Règles TH-U. Fascicule 5/5 : Ponts thermiques, CSTB. 2008.
- [23] H. Bateau. « Améliorez le confort de votre maison, l'isolation thermique. Habitat Individuel. », Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie ADEME, Mars 2008.
- [24] [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/87192/Pusila\\_Jenni.pdf;jsessionid=2B3853E7C581DFEBA6CABFE4ECC67D25?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/87192/Pusila_Jenni.pdf;jsessionid=2B3853E7C581DFEBA6CABFE4ECC67D25?sequence=1)
- [25] Mansouri Zine-Edine (2018), « Etude Numérique des performances des matériaux isolants dans le bâtiment (régime permanent) sous conditions de températures réelles de Constantine », Mémoire de fin d'étude de Master, Université de Oum -El -Bouaghi, 2 juillet 2018.
- [26] <http://dspace.univ-jijel.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5864/M-ARC.ARC-2020-21.pdf?sequence=1>
- [27] <https://conseils-thermiques.org/contenu/isolation-plancher.php>
- [28] [http://thesis.essatlemcen.dz/bitstream/handle/STDB\\_UNAM/356/M%C3%A9moire%20Master\\_Chabane\\_Sari.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://thesis.essatlemcen.dz/bitstream/handle/STDB_UNAM/356/M%C3%A9moire%20Master_Chabane_Sari.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [29] Aguilar, F., Solano, J. P., & Vicente, P. G. (2014). Transient modeling of high-inertial thermal bridges in buildings using the equivalent thermal wall method. Applied Thermal

- Engineering, 67(1), 370–377  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.058>
- [30] Kang, E., Kim, D., Lee, H., & Yoon, J. (2022). In-Situ Thermal Bridge Evaluation of a Building Using Bayesian Inference With Measured Infrared Thermography. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(7).
- [31] Sfarra, S., Cicone, A., Yousefi, B., Ibarra-Castanedo, C., Perilli, S., & Maldague, X. (2019). Improving the detection of thermal bridges in buildings via on-site infrared thermography: The potentialities of innovative mathematical tools. *Energy and Buildings*, 182, 159–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.017>
- [32] Garrido, I., Lagüela, S., Arias, P., & Balado, J. (2018). Thermal-based analysis for the automatic detection and characterization of thermal bridges in buildings. *Energy and Buildings*, 158, 1358–1367. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.031>
- [33] Saied, A. El, Maalouf, C., Bejat, T., & Wurtz, E. (2022). Slab-on-grade thermal bridges: A thermal behavior and solution review. *Energy and Buildings*, 257, 111770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111770>
- [34] Theodosiou, T. G., & Papadopoulos, A. M. (2008). The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings*, 40(11), 2083–2089. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>
- [35] Capozzoli, A., Gorrino, A., & Corrado, V. (2013). A building thermal bridges sensitivity analysis. *Applied Energy*, 107, 229–243. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.045>
- [36] Alhawari, A., & Mukhopadhyaya, P. (2018). Thermal bridges in building envelopes - An overview of impacts and solutions. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 9(1), 31–40. <https://doi.org/10.1556/1848.2018.9.1.5>
- [37] Quinten, J., & Feldheim, V. (2016). Dynamic modelling of multidimensional thermal bridges in building envelopes: Review of existing methods, application and new mixed method. *Energy and Buildings*, 110, 284–293. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.003>
- [38] Martin, K., Erkoreka, A., Flores, I., Odriozola, M., & Sala, J. M. (2011). Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy and Buildings*, 43(2), 529–535. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.018>

- [39] Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., de' Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2013). Simplified state space representation for evaluating thermal bridges in building: Modelling, application and validation of a methodology. *Applied Thermal Engineering*, 61(2), 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.052>
- [40] Fuchs, M. (2022). Conductive Heat Transfer in Thermal Bridges. In *Encyclopedia* (Vol. 2, Issue 2, pp. 1019–1035). <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2020067>
- [41] Omle, I., Askar, A. H., Kovács, E., & Bolló, B. (2023). Comparison of the Performance of New and Traditional Numerical Methods for Long-Term Simulations of Heat Transfer in Walls with Thermal Bridges. In *Energies* (Vol. 16, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/en16124604>
- [42] Larbi, A. Ben. (2005). Statistical modelling of heat transfer for thermal bridges of buildings. *Energy and Buildings*, 37(9), 945–951. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.013>
- [43] Asdrubali, F., Baldinelli, G., & Bianchi, F. (2012). A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. *Applied Energy*, 97, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.054>
- [44] « 3D modeling » sur Techopedia : <https://www.techopedia.com/definition/30664/3d-modeling>
- [45] Modèles de formats polygonaux par des centaines de milliers, parfois des millions, des visages peuvent poser des problèmes de gestion graves sur le matériel pas assez puissant pour surmonter ce ont été mis au point des systèmes de stockage de données géométriques du maillage dans les cartes spéciales appelle la carte standard.
- [46] Rogers, David; Earnshaw, Rae (31/10/2001). *Techniques graphiques informatique: théorie et pratique*. Springer, 399. ISBN 0-387-97237-4
- [47] CAO 3D Tutor. Autocad cours interactif 3D. Di Claudio Gasparini, 2005, Gasparini Editeur, ISBN 88-89740-00-0 page. 58