MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE « ABBES LAGHROUR »DE KHENCHELA
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Mécanique

N° de série : ……

Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)

Spécialité : Génie Mécanique
Option : Construction Mécanique
Thème

Système de chauffage central par plinthe à diffusion thermique optimisée

Réalisé par** : **MEDDOUR Sabir

Dirigé par** : **Dr. HAMMOUYA Amel

Devant les membres de jury :

Président **: Pr. CHAHAT Abd El MADJID**	M.C.A	Université de Khenchela
Examinateur **: Dr. SID Nour Eddine**	M.C.A	Université de Khenchela
Encadrant **: Dr. HAMMOUYA Amel**	M.C.A	Université de Khenchela

Année universitaire :2025/2026

Remerciements

Je remercie tout d'abord Dieu le Tout-Puissant de m'avoir accordé la volonté, la patience et le courage nécessaires pour mener ce mémoire à son terme.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde reconnaissance à mon encadreur ***Mme HAMMOUYA Amel*** *pour avoir accepté d'encadrer ce mémoire, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et ses critiques constructives qui ont largement contribué à l'amélioration de ce travail.*

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury, ***Mr. CHAHAT Abd El Madjid*** *et* ***Mr. SID Nour Eddine****, pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette recherche en acceptant de l'examiner, ainsi que pour leurs remarques et suggestions enrichissantes.*

Je remercie également l'ensemble des enseignants du ***département de Génie Mécanique de l'Université Abbès Laghrour de Khenchela*** *pour la qualité de la formation dispensée et pour leurs efforts durant notre parcours universitaire.*

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les professeurs, cadres, ingénieurs et personnels qui ont contribué, de près ou de loin, à notre formation et à la réalisation de ce travail.

Enfin, je n'oublie pas mes amis et mes collègues de la promotion ***2025/2026*** *pour leur soutien, leur encouragement et les bons moments partagés durant cette période.*

À toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin dans l'accomplissement de ce mémoire, je leur adresse mes sincères remerciements

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mes chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices, leur soutien et leurs encouragements qui m'ont permis d'avancer et d'atteindre mes objectifs.

À mes frères et ma sœur, pour leur amour, leur soutien, leur présence et leurs encouragements tout au long de mon parcours.

À ma petite famille, et particulièrement à mon épouse Abir, pour son amour, sa patience, son soutien précieux et ses encouragements constants malgré les pressions et les difficultés rencontrées durant cette période. Sa présence et son soutien m'ont donné la force et la motivation nécessaires pour avancer et mener ce travail à son terme.

À mon prince Mouiz pour sa présence, sa joie et les moments de bonheur qui ont illuminé mon quotidien et m'ont apporté la force de continuer.

À mes chers collègues du groupe MASTER 2 CM, en particulier Badi, Akram, Mahdi, Youcef, Ouassim et les filles pour leur amitié, leur entraide, leur soutien et les précieux moments partagés tout au long de notre parcours universitaire.

À toutes les personnes qui m'ont accompagné, encouragé et soutenu durant la réalisation de ce travail.

Je vous dédie ce mémoire avec toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du confort thermique et l'analyse comparative des différents systèmes de chauffage à travers une approche SWOT interne (forces, faiblesses), L'objectif est d'identifier les limites des solutions classiques et de proposer un système de chauffage par plinthes optimisé.

Le travail inclut la description du modèle physique et des équations gouvernantes liées aux transferts thermiques et à l'hydronique, permettant de simuler le comportement du système. Une démarche de conception et de réalisation d'un prototype est ensuite présentée, réalisée selon deux méthodes : fabrication métallique et impression 3D.

Plusieurs logiciels de conception et de simulation ont été utilisés pour le développement et l'optimisation du système. Les résultats permettent d'évaluer les performances thermiques.

Mots clés : confort thermique, chauffage, SWOT, plinthes chauffantes, modélisation, simulation, prototype, impression 3D, fabrication métallique

الملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة الراحة الحرارية والتحليل المقارن لمختلف أنظمة التدفئة من خلال منهجية SWOT داخلية (نقاط القوة ونقاط الضعف). يهدف هذا العمل إلى تحديد حدود حلول التدفئة التقليدية واقتراح نظام تدفئة يعتمد على الحواف السفلية الحرارية (Plinthes chauffantes) بشكل مُحسّن.

يتضمن العمل وصف النموذج الفيزيائي والمعادلات الحاكمة المرتبطة بانتقالات الحرارة والظواهر الهيدروليكية، مما يسمح بمحاكاة سلوك النظام. كما تم عرض منهجية تصميم وإنجاز نموذج أولي وفق طريقتين: التصنيع المعدني والطباعة ثلاثية الأبعاد.

تم استخدام عدة برمجيات للتصميم والمحاكاة من أجل تطوير النظام وتحسين أدائه. وتسمح النتائج المتحصل عليها بتقييم الأداء الحراري وفعالية النظام المقترح.

الكلمات المفتاحية :الراحة الحرارية، التدفئة، SWOT، الحواف الحرارية للتدفئة، النمذجة، المحاكاة، النموذج الأولي، الطباعة ثلاثية الأبعاد، التصنيع المعدني.

Abstract

This thesis focuses on the study of thermal comfort and the comparative analysis of different heating systems through an internal SWOT approach (strengths and weaknesses). The objective is to identify the limitations of conventional solutions and to propose an optimized heating system based on heating skirting boards.

The work includes the description of the physical model and the governing equations related to heat transfer and hydronic phenomena, allowing the simulation of the system behavior. A design and prototype development approach is then presented using two manufacturing methods: metal fabrication and 3D printing.

Several design and simulation software tools were used for the development and optimization of

the system. The obtained results allow the evaluation of the thermal performance and effectiveness of the proposed solution.

Keywords: thermal comfort, heating, SWOT, heating skirting boards, modeling, simulation, prototype, 3D printing, metal fabrication

Tableau de figures

Figure N°	Titre	Page
Figure 1.1	Consommation d'énergie en France (2011), (A : par secteurs d'activité ; B : pour le secteur résidentiel)	7
Figure 1.2	Diagramme des paramètres influençant le confort thermique	8
Figure 1.3	Schéma représenté Les différentes température idéales en intérieur	9
Figure 1.4	Diagramme de l'air humide en positionnant différentes zones	10
Figure 1.5	L'importance de l'isolation pour le bien-être thermique	10
Figure 1.6	influence des courants d'air et la convection sur le bilan thermique de l'occupant	11
Figure 1.7	Diagramme illustrant la relation entre la température, l'humidité relative et point de rosée	13
Figure 1.8	Les trois modes de transfert de chaleur	14
Figure 1.9	Schéma du flux de chaleur par conduction à travers une paroi d'épaisseur (e)	15
Figure 1.10	Exemple typique de convection utilisée pour chauffer un espace	16
Figure 1.11	Poêle à gaz	19
Figure 1.12	Plancher chauffant hydraulique	20
Figure 1.13	Schéma illustratif d'un système de chauffage solaire	20
Figure 1.14	Pompe à chaleur en hiver (gauche), refroidisseur en été (droite)	21
Figure 1.15	Le chauffage électrique	22
Figure 1.16	Système de chauffage central à eau chaude avec radiateurs	23
Figure 2.1	Schéma d'un système de chauffage central par plinthes	26
Figure 2.2	Chaudière de chauffage central et son schéma de fonctionnement	26
Figure 2.3	Schéma de fonctionnement d'une plinthe chauffante	27
Figure 2.4	Types de pompes de circulation	27

Figure 2.5	Schéma de distribution bitube d'un système de chauffage par plinthes	28
Figure 2.6	Vase d'expansion	30
Figure 2.7	Vanne de régulation	30
Figure 2.8	Électrovanne	30
Figure 2.9	Régulateur de pression	31
Figure 2.10	Soupape de sécurité	31
Figure 2.11	Thermostat d'ambiance	32
Figure 2.12	Cerveau programmateur	32
Figure 2.13	Le concept de MEF	37
Figure 3.1	Imprimante Bambu Lab P1S	51
Figure 3.2	Aluminium brute	52
Figure 3.3	Fraiseuse conventionnelle	53
Figure 3.4	Les ailettes après ajustage	54
Figure 3.5	Le support mural et la couverture après ajustage	54
Figure 3.6	Les tubes en cuivre après la découpe et ajustage	54
Figure 3.7	Machine d'électroérosion la marque ONA, et l'opération de coupe par fil	55
Figure 3.8	Prototype de la plinthe chauffante	58
Figure 3.9	Icon de fichier STL	58
Figure 3.10	Interface du logiciel Bambu Studio de l'imprimante 3D	59
Figure 3.11	Configuration de l'imprimante Bambu Lab P1S	59
Figure 3.12	Processus d'impression pour les différentes pièces	60
Figure 3.13	Support mural 3D	61
Figure 3.14	Prototype 3D de la plinthe chauffante	61
Figure 3.15	Active Le complément SOLIDWORKS Flow Simulation	62
Figure 3.16	Wizard assistant	62
Figure 3.17	Matériaux appliqués aux corps dans une étude	63

Figure 3.18	Définir les conditions initiales et aux limites	63
Figure 3.19	Choisir Heat source	64
Figure 3.20	Maillages appliqués à la géométrie	64
Figure 3.21	Exécution d'une étude	64
Figure 3.22	Vue de coupe	65
Figure 3.23	Vue isométrique	66
Figure 3.24	Vue arrière/interne	66
Figure 3.25	Vue face - Habillage extérieur	67

Table de matières

Inroduction générale 1

Chapitre 1 : Confort thermique domestique 5

1.1. Introduction 6

1.2. Généralité sur le confort thermique 6

1.2.1. Notion de confort thermique : 6

1.2.2. Importance de confort thermique dans le bâtiment résidentiel 6

- La santé 6
- La Productivité 7
- Consommation énergétique 7
- Valeur du bâtiment 7
- L'environnement 7

1.2.3. Introduction aux normes de référence 7

1.3. Les paramètres influençant le confort thermique 8

1.3.1. Les Paramètres environnementaux 9

- Température de l'air ambiant : 9
- L'humidité relative de l'air : 9
- Température radiante moyenne 10
- Vitesse de l'air 11

1.3.2. Paramètres lies à l'individu 11

- Niveau d'activité métabolique 11
- Isolation vestimentaire 11

1.4. Notions fondamentales de température : 12

1.4.1. Définition 12

.1.4.2 Température sèche : 12

1.4.3. Température humide : 12

1.4.4. Température de rosée : 12

1.4.5. Rôle de ces températures dans l'évaluation de confort thermique 13

1.5. Transfert de chaleur 13

1.5.1. Définition : 13
1.5.2. Modes du transfert de chaleur 14
- Conduction thermique : 14
- Transfert de chaleur par Convection 16
- Transfert de chaleur par Rayonnement 17
1.6. Les systèmes de chauffage domestique 17
1.6.1. Généralités sur le chauffage 17
1.6.2. Historique de chauffage domestique 18
- Rôle du chauffage dans le confort thermique 18
- Critères de choix de chauffage 18
1.6.3. Classification des systèmes de chauffage 19
- Poêle à gaz 19
- Plancher chauffant 19
- Chauffage solaire 20
- Pompe à chaleur (air-air) 21
- Les chauffages électriques 22
- Chauffage central à eau chaude (avec radiateur) 22
1.7. Conclusion : 23
Chapitre 2 : Méthodologie de travail 25
2.1. Introduction : 26
2.2. Description du système proposé 26
2.2.1. Éléments constitutifs du système 27
2.2.2. Organes de régulation et de sécurité 29
2.3. Hypothèses simplificatrices 32
2.4. Les équations gouvernantes 33
2.4.1. Équation de continuité : conservation de la masse (forme général) : 33
2.4.2. Équations de Navier–Stokes : conservation de la quantité de mouvement : 34
2.4.3. Équation de l'énergie : transfert de chaleur conjugué fluide/solide : 34
2.5. Pertes de charges hydrauliques : 35
2.5.1. Pertes de charges singulières 35
2.5.2. Pertes de charges linéaires 36

2.6. Conditions aux limites 37
2.7. Méthode des éléments finis (MEF) 37
2.8. Modélisation géométrique 38
2.9. Simulation CFD 39
2.10. Conclusion 39
Chapitre 3 : Développement d'un prototype de plinthe chauffante 41
3.1. Introduction : 42
3.2. Méthode d'usinage : 42
3.2.1. La Conception : 42
3.3. Réalisation de prototype d'une plinthe chauffante 52
3.3.1. Les étapes de la réalisation de prototype en métal : 53
3.3.2. Les étapes de la réalisation du prototype en 3D : 59
3.4. Simulation et interprétation des résultats 63
3.4.1. Activer le complément SOLIDWORKS Flow Simulation 63
3.4.2. Mise en place de l'étude 63
3.4.3. Attribuer des propriétés aux matériaux 64
3.4.4. Définir les conditions aux limites et initiales 64
3.4.5. Appliquer une source de chaleur 64
3.4.6. Maillage du modèle 65
3.4.7. Exécuter la simulation 65
3.5. Les résultats 66
3.6. Interpretation et conclusions techniques 68
3.7. Conclusion 68
Conclusion générale 69
Références Bibliographique 72

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

À l'échelle mondiale, le secteur du bâtiment représente l'un des postes de consommation d'énergie les plus massifs et l'une des principales sources d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le sillage des réglementations thermiques successives et des impératifs liés à la transition écologique, la réduction de l'empreinte carbone des parcs immobiliers est devenue une priorité absolue. Dans cette quête d'efficacité, la performance d'un bâtiment ne se limite plus seulement à la qualité de son isolation passive (enveloppe thermique), mais dépend intrinsèquement de l'intelligence, de la réactivité et de la sobriété de ses systèmes actifs de chauffage.

Par ailleurs, cette performance énergétique s'inscrit désormais dans une dynamique économique moderne à travers le concept de **Valeur Verte** (*green value*). L'efficacité thermique et la qualité de l'environnement intérieur ne sont plus de simples variables de confort ; elles constituent de véritables leviers de valorisation patrimoniale et financière sur le marché immobilier, dictant l'attractivité d'un bâti à long terme.

L'objectif premier de tout habitat demeure d'offrir à ses occupants un cadre de vie sain, sûr et thermiquement confortable. Le confort thermique domestique est un phénomène complexe, régi par des interactions subtiles entre des paramètres environnementaux (températures de l'air et des parois, mouvements de l'air, humidité relative) et des facteurs physiologiques humains.

Pourtant, le marché du génie climatique reste aujourd'hui dominé par deux technologies standards qui imposent chacune un compromis rigide entre confort, réactivité et contraintes d'installation :

- **Le radiateur conventionnel :** Bien qu'il offre une réactivité thermique appréciable, il fonctionne principalement par convection localisée à haute température. Cela engendre des phénomènes d'inconfort local majeurs, notamment une forte stratification thermique (l'air chaud s'accumule au plafond tandis que le sol reste froid) et un effet perturbateur de "paroi froide" au droit des murs extérieurs non ou mal isolés. De plus, son encombrement bride l'aménagement de l'espace habitable.
- **Le plancher chauffant :** S'il assure un excellent profil vertical de température et un confort radiant de premier ordre, il souffre en revanche d'une inertie thermique très élevée, nécessitant plusieurs heures pour réagir à une consigne de régulation. À cela s'ajoute une complexité et un coût d'installation prohibitifs, en particulier dans le cadre de projets de rénovation.

Problématique

Face aux limites de ces solutions traditionnelles, la technologie de la **plinthe chauffante** émerge comme une alternative disruptive et novatrice. En ceinturant la périphérie des pièces au ras du sol, ce système promet de combiner la réactivité instantanée d'un radiateur et l'homogénéité thermique d'un plancher chauffant, tout en libérant l'espace mural.

Cependant, le caractère récent et encore peu répandu de cette technologie soulève une question scientifique et technique centrale : **Comment concevoir et prouver scientifiquement qu'un système de plinthe chauffante peut surpasser les performances des émetteurs classiques tout en restant extrêmement compact ?**

Pour lever ces verrous et valider la supériorité du système, notre démarche de recherche s'articule autour de trois axes d'optimisation :

1. **L'optimisation thermodynamique et aéraulique :** Contrairement au radiateur qui pulse l'air chaud vers le centre de la pièce, la plinthe injecte l'air à basse vitesse le long des parois extérieures. En exploitant la convection naturelle et l'effet de flux collé aux parois, l'air chaud grimpe le long du mur et le réchauffe. Ce mécanisme neutralise l'effet de paroi froide et transforme la structure maçonnée en un vaste panneau radiant à basse température.

2. **L'optimisation géométrique et matérielle :** Le défi technologique réside dans la miniaturisation de l'émetteur pour préserver l'esthétique et la discrétion (hauteur limitée à 15 cm et profondeur à 34 mm). L'étude se focalise sur l'ingénierie d'un échangeur thermique compact de type ailettes-tubes, associant le cuivre (pour une conductivité maximale du fluide hydronique) et l'aluminium (pour une dissipation géométriquement optimisée des ailettes).

3. **La validation numérique et physique :** L'évaluation rigoureuse de la réduction du gradient vertical de température (visant un écart inférieur à 1°C entre les pieds et la tête d'un occupant) nécessite des outils de calcul de pointe pour légitimer l'efficacité du dispositif avant son industrialisation.

4. **Objectifs du travail et structure du manuscrit**

   L'objectif de ce travail de mémoire est de développer, de modéliser et de concrétiser sous forme de prototype physique une plinthe chauffante hautement performante. Cette démarche vise à faire progresser le concept de la simulation numérique pure vers un objet technique tangible, s'inscrivant dans la stratégie de développement de la jeune marque "warm lines".

Pour répondre à ces objectifs, le présent manuscrit est structuré en trois chapitres principaux :

- **Le Chapitre 1 : Le confort thermique domestique** pose le cadre théorique et bibliographique. Il traite des généralités sur l'environnement bâti, de la physique de l'enveloppe, des six paramètres fondamentaux du confort selon les normes ISO 7730, ainsi que de la dynamique des transferts thermiques régissant les différents émetteurs de chauffage.

- **Le Chapitre 2 : Méthodologie de travail** détaille l'approche scientifique adoptée Il présente d'abord les principaux composants du système étudié, notamment l'échangeur cuivre-aluminium, les canaux d'écoulement ainsi que les éléments assurant le transfert

thermique et la circulation du fluide. Ensuite, il aborde la modélisation du système, incluant les équations de Navier-Stokes et de l'énergie liées à la convection naturelle, ainsi que les hypothèses simplificatrices et les conditions aux limites adoptées. Il expose également la mise en place du modèle numérique basé sur la méthode des volumes finis, ainsi que la description du logiciel **SOLIDWORKS**, utilisé pour la conception et la modélisation 3D des pièces et de l'assemblage du système, et de son module **SOLIDWORKS Flow Simulation**, dédié à la simulation des écoulements fluides et des transferts thermiques dans le prototype d'une plinthe chauffante.

- **Le Chapitre 3 :** Développement d'un prototype de plinthe chauffante présente les différentes étapes de conception et de réalisation du système proposé. Il décrit le dimensionnement de l'échangeur cuivre-aluminium, les étapes de fabrication mécanique réalisées au sein de l'entreprise ECMK, ainsi que la réalisation du prototype par impression 3D. Ensuite, il présente la simulation numérique réalisée à l'aide de SolidWorks Flow Simulation, permettant d'analyser le comportement thermique et hydraulique du système.
- Enfin, une **conclusion générale** clôture ce travail en mettant en évidence les principaux résultats obtenus, les performances du système développé, les limites rencontrées et les perspectives envisageables pour l'amélioration et l'industrialisation future de la plinthe chauffante.

Chapitre 1 : Confort thermique domestique

1. Chapitre 1 : Confort thermique domestique

1.1. Introduction

Le confort thermique domestique constitue aujourd'hui un indicateur essentiel de la qualité de vie et de la performance énergétique des bâtiments. Dans un contexte marqué par une sédentarité accrue, la maîtrise des conditions thermiques intérieures devient primordiale afin d'assurer le bien-être et la santé des occupants, tout en limitant la consommation énergétique. Ce chapitre présente les notions fondamentales du confort thermique ainsi que son importance dans le secteur résidentiel.

1.2. Généralité sur le confort thermique

Le confort thermique est une exigence fondamentale dans les bâtiments, en raison de son influence directe sur la qualité de l'ambiance intérieure, la santé et la productivité des occupants. Les études montrent que les individus passent près de 87 % de leur temps dans des espaces clos [1].

Dans ce contexte, la recherche d'un environnement thermique stable conduit à une utilisation accrue des systèmes de chauffage et de climatisation, ce qui augmente la consommation d'énergie et les émissions polluantes. Par ailleurs, le changement climatique accentue ces besoins, notamment avec la surchauffe en été et le froid en hiver [2].

1.2.1. Notion de confort thermique :

Le confort thermique peut être défini comme un état de satisfaction de l'individu vis-à-vis de son environnement thermique. Il dépend de plusieurs paramètres physiques et physiologique [1], et repose sur l'équilibre entre la chaleur produite par le corps humain et celle échangée avec l'environnement.

Selon la norme ASHRAE, le confort thermique est « un état d'esprit exprimant la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique » [2], ce qui introduit également une dimension psychologique.

De manière générale, le confort thermique repose sur deux critères essentiels : l'équilibre thermique du corps humain et l'absence de sources locales d'inconfort [3].

1.2.2. Importance de confort thermique dans le bâtiment résidentiel

Le confort thermique joue un rôle majeur dans les bâtiments résidentiels, en contribuant au bien-être des occupants, à l'efficacité énergétique et à la valorisation du bâtiment.

- **La santé**

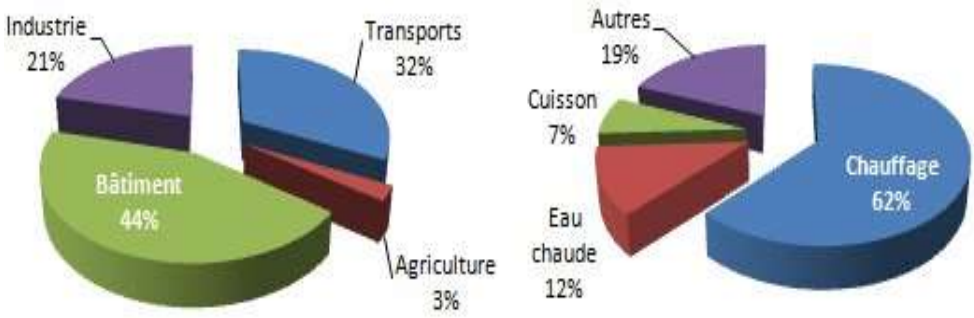
Le confort thermique influence directement la santé. Des températures extrêmes peuvent entraîner des effets néfastes, notamment chez les personnes vulnérables. Une chaleur excessive peut provoquer déshydratation et fatigue, tandis que le froid favorise les problèmes respiratoires et circulatoires [4].

- **La Productivité**

La température ambiante a un impact significatif sur les performances des occupants. Des études montrent qu'au-delà de 22 °C, une augmentation de 1 °C peut entraîner une baisse de productivité d'environ 2 % [5]. Un climat intérieur agréable n'est pas seulement un facteur de bien-être pour les collaborateurs, mais aussi un levier décisif pour augmenter la productivité.

- **Consommation énergétique**

Dans les bâtiments résidentiels, la maîtrise de la consommation énergétique constitue un enjeu majeur face à la hausse des coûts de l'énergie. En conséquence, l'absence de confort thermique oblige les occupants à consommer davantage d'énergie pour compenser la différence de température : pour le chauffage en hiver et pour la climatisation en été. Mais en assurant un confort thermique grâce à un chauffage, une climatisation, une bonne ventilation et un éclairage adapté, la consommation énergétique reste modérée, et par conséquent, les coûts deviennent raisonnables[6].



A : par secteurs d'activité B : pour le secteur résidentiel

Figure 1.1 : Consommation d'énergie en France (2011),
(A : par secteurs d'activité ; B : pour le secteur résidentiel). [7]

- **Valeur du bâtiment**

Un bon niveau de confort thermique améliore la performance énergétique globale du bâtiment et augmente sa valeur immobilière. Une isolation efficace et des systèmes de régulation performants contribuent à la valorisation du bien [8].

- **L'environnement**

Une mauvaise performance thermique des bâtiments entraîne une surconsommation d'énergie, augmentant ainsi les émissions de gaz à effet de serre. L'amélioration du confort thermique constitue donc un levier important pour réduire l'impact environnemental et lutter contre le changement climatique [9].

1.2.3. Introduction aux normes de référence

Les normes de référence en matière de confort thermique constituent un cadre scientifique et réglementaire permettant d'évaluer et de garantir des conditions ambiantes acceptables pour les occupants des bâtiments.

À l'échelle internationale, la norme ISO 7730 traite de l'ergonomie des ambiances thermiques et l'évaluation du confort thermique. Elle repose sur six paramètres : la température de l'air, la température radiale, la vitesse de l'air, l'humidité, le métabolisme et l'habillement, utilisant les indices PMV et PPD[1].

Dans le même cadre, la norme ASHRAE 55 définit les conditions thermiques acceptables pour les occupants en tenant compte des mêmes paramètres. Elle vise à établir des combinaisons de facteurs environnementaux et personnels permettant d'assurer un confort thermique pour la majorité des utilisateurs d'un espace [10].

Au niveau européen, la norme EN 16798-1 traite de la performance énergétique des bâtiments en intégrant la qualité de l'air intérieur, le confort thermique, l'éclairage et l'acoustique [11].

En Algerie et en 1999, le Ministère du Logement et de l'Urbanisme a créé le premier code énergétique pour les bâtiments algériens, Ce document qui se présente sous forme de deux fascicules : un pour l'hiver DTR C3.2 et un deuxième pour l'été DTR C3.4, visant à réduire la consommation d'énergie de chauffage 20% à 30%. Après plus de 16 ans, une version révisée a été faite, rassemblant les fascicules, renforçant les exigences et définissant un nouveau zonage. La réglementation actuelle est le DTR C3.2/4, et la conformité d'un bâtiment doit être vérifiée séparément pour l'été et l'hiver[12].

Ainsi ces normes reposent globalement sur le contrôle des six paramètres pour garantir le confort thermique, en utilisant divers modèles et indices de calcul.

1.3. Les paramètres influençant le confort thermique

Le confort thermique dépend de six paramètres principaux, répartis en deux catégories : des paramètres environnementaux et des paramètres individuels.

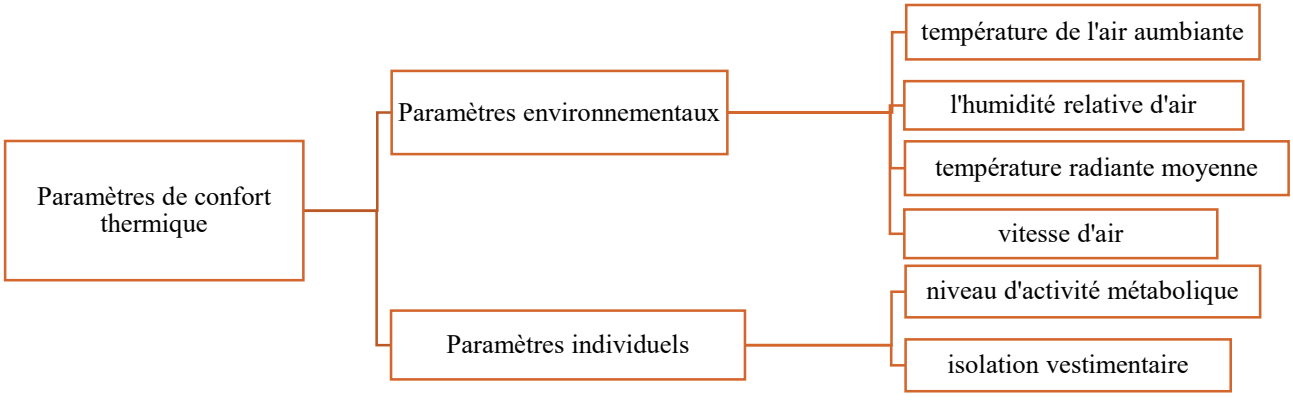


Figure1.2 : Diagramme des paramètres influençant le confort thermique[13].

1.3.1. Les Paramètres environnementaux

- **Température de l'air ambiant :**

La température de l'air, également appelée température ambiante (Ta), constitue un paramètre crucial du confort thermique. Elle influence directement les échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement, notamment par convection et respiration.

Dans une pièce, l'air n'est pas toujours à une température uniforme ; on observe également des variations de chaleur de l'air près des surfaces froides et des éléments chauffants. C'est pour cela qu'il convient de prendre en considération la température ressentie (T ressentie) qui se calcul à l'aide de la formule :

$$T_{ressentie} = T_{paroi} + T_{air} \tag{1.1}$$

En pratique, la plage de confort thermique se situe généralement entre 18 °C et 24 °C [14], bien que cette perception reste subjective selon les individus.

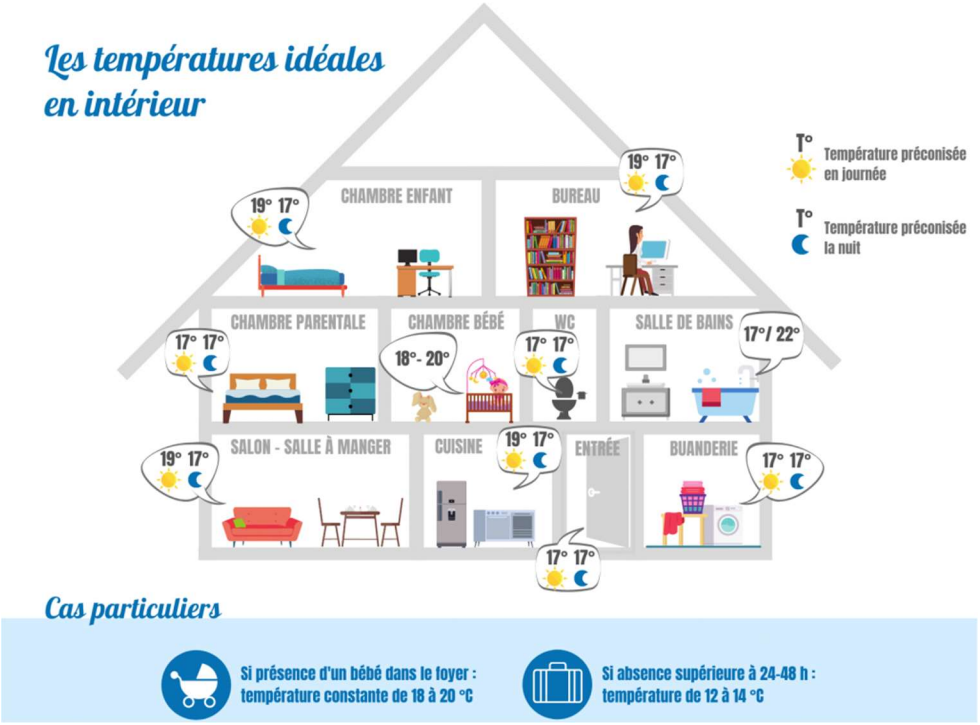


Figure 1.3 :schéma représenté Les différentes température idéales en intérieur[15]

- **L'humidité relative de l'air :**

L'humidité relative à une influence modérée sur le confort thermique dans les conditions normales. Toutefois, des niveaux extrêmes peuvent générer un inconfort :

- En dessous de 30 %, l'air devient sec et favorise l'électricité statique ;
- au-dessus de 70 %, il y a un risque de condensation et de développement microbien[16].

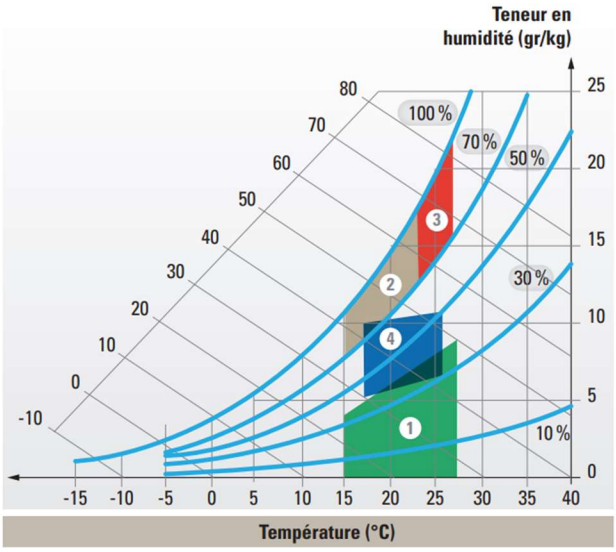


Figure 1.4 : Diagramme de l'air humide en positionnant différentes zones[17]

Il est possible de définir une plage de confort thermique sur le diagramme de l'air humide en positionnant différentes zones :

- **Zone 1** : à éviter vis-à-vis des problèmes de sécheresse ;
- **Zones 2 et 3** : Zones à éviter vis-à-vis des développements de bactéries et de microchampignons ;
- **Zone 4 :** Polygone de confort hygrothermique ;

➢ Température radiante moyenne

La température radiante moyenne correspond à la température uniforme des parois d'un espace clos qui entraînerait le même transfert radiatif que l'environnement réel examiné. Elle permet de simplifier l'analyse des échanges radiatifs dans un espace donné [18].

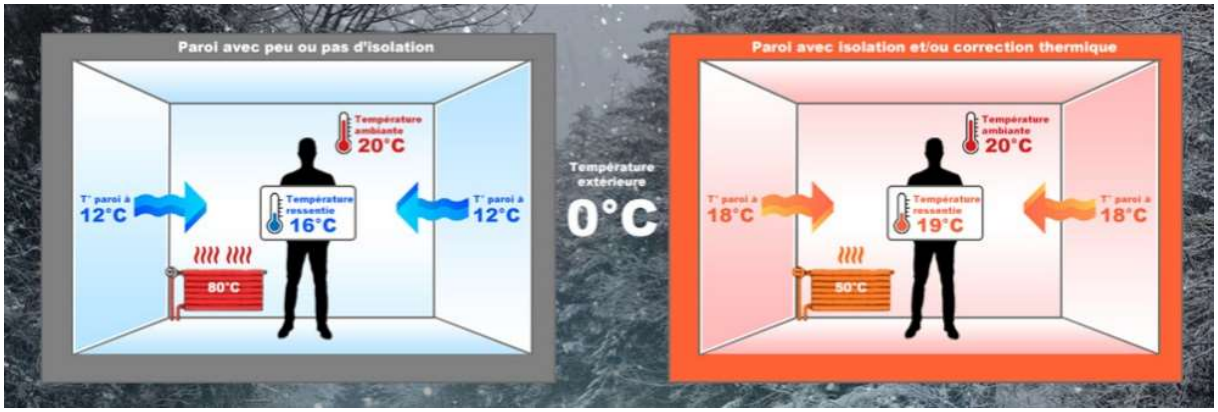


Figure 1.5 :L'importance de l'isolation pour le bien-être thermique[19]

- **Vitesse de l'air**

La vitesse de l'air aide à réguler la température du corps par convection. La peau est souvent plus chaude que l'air ambiant, ce qui entraîne une perte de chaleur plus importante lorsque l'air circule rapidement. En hiver, cela peut être inconfortable, tandis qu'en été, cela peut apporter du confort, surtout dans des environnements chauds et humides[20].

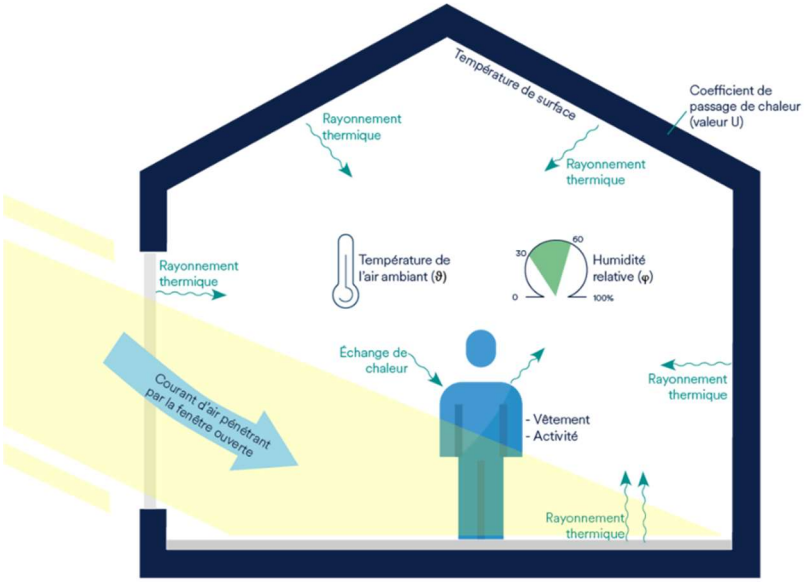


Figure 1.6 : influence des courants d'air et la convection sur le bilan thermique de l'occupant[21]

1.3.2. Paramètres lies à l'individu

- **Niveau d'activité métabolique**

Le métabolisme correspond à la production de chaleur par le corps humain. Il dépend du niveau d'activité physique : plus l'activité est intense, plus la chaleur produite est importante, ce qui influence directement la sensation thermique [22].

- **Isolation vestimentaire**

Les vêtements n'altèrent pas les principes physiques des échanges de chaleur, mais les influencent en modifiant les coefficients de convection, de rayonnement et d'évaporation. Ils créent un microclimat dépendant de la ventilation naturelle sous le vêtement[23].

L'isolation vestimentaire est exprimée en clo, dérivé l'anglais "cloth" :

$$1\ clo = 0.155\ m^2.K/W \tag{1.2}$$

1.4. Notions fondamentales de température :

1.4.1. Définition

La température est une grandeur physique qui caractérise l'état thermique d'un système. Elle traduit le niveau d'agitation des particules et s'exprime généralement en degrés Celsius (°C), en kelvin (K) ou en degrés Fahrenheit (°F).

Lorsqu'on met deux corps en contact, ils échangent de l'énergie thermique jusqu'à atteindre une température d'équilibre[24].

1.4.2. Température sèche :

La température sèche, mesurée par un thermomètre ordinaire, à l'abri de toute influence d'humidité. Elle constitue un indicateur de base des conditions thermiques ambiantes. Sur le diagramme psychrométrique, la lecture se fera sur l'échelle horizontale du bas du diagramme. Toute droite verticale est une isotherme.

Elle joue un rôle important dans l'évaluation du confort thermique, notamment dans un contexte de réchauffement climatique où des températures élevées peuvent affecter la capacité du corps à maintenir son équilibre thermique [25].

1.4.3. Température humide :

La température humide est mesurée à l'aide d'un thermomètre dont le réservoir est entouré d'un tissu humide. La chaleur dégagée par le refroidissement de l'air peut évaporer autant d'eau qu'il en manque à l'air pour être saturé à cette même température. Quand la température de l'air excède 35 °C, le corps a besoin d'évaporer de l'eau principalement à travers la transpiration pour maintenir la température centrale à un niveau sûr. Le corps peut mettre en œuvre ce processus jusqu'au thermomètre mouillé ou bien (la température humide). Elle est habituellement moins élevée que la température habituelle, mesurée par un thermomètre à l'abri de l'humidité[25].

1.4.4. Température de rosée :

Le point de rosée correspond à la température à laquelle l'air devient saturé en vapeur d'eau et à partir de laquelle la condensation apparaît. Il convient de mentionner que lorsque la température est négative, le point de rosée est appelé "point de gel".

En analysant la relation entre l'humidité relative et le point de rosée, on peut établir les points suivants :

- Si le point de rosée est proche de la température ambiante, cela indique une humidité relative élevée.
- En revanche, si le point de rosée est bien inférieur à la température ambiante, cela signifie que l'humidité relative est faible[26].

- La température de rosée d'une ambiance correspond à l'intersection entre l'horizontale du point d'ambiance et la courbe de saturation.

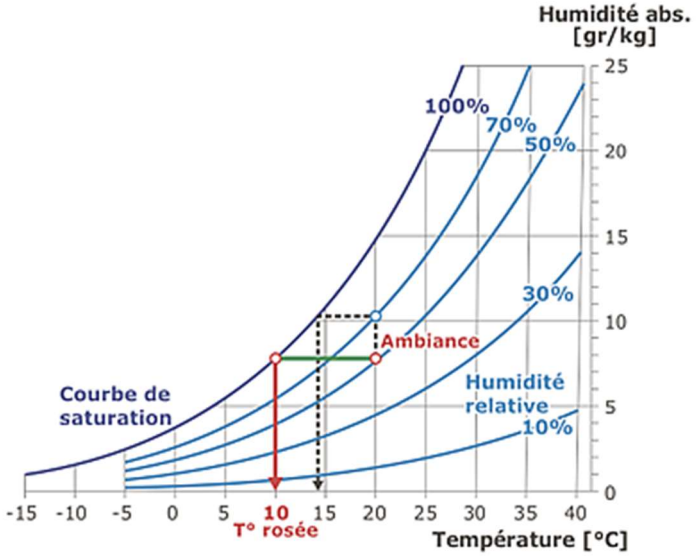


Figure 1.7 : diagramme illustrant la relation entre la température, l'humidité relative et point de rosée[27].

1.4.5. Rôle de ces températures dans l'évaluation de confort thermique

Les différentes températures (sèche, humide et de rosée) jouent un rôle fondamental dans l'analyse du confort thermique :

- Elles permettent d'évaluer les conditions thermiques et hygrométriques d'un ;
- Elles influencent directement la sensation de confort ;
- Elles aident à comprendre la capacité d'évaporation de la sueur ;
- Elles indiquent le niveau d'humidité et la quantité de vapeur d'eau (humidité absolue, pression de vapeur) ;
- Elles permettent d'identifier les risques de condensation et dégradation (point de rosée, bilans hygrothermiques, perméabilité vapeur).
- Elles contribuent à l'optimisation des systèmes CVC (chauffage, ventilation, climatisation) [28] [29].

1.5. Transfert de chaleur

1.5.1. Définition :

Le « transfert de chaleur » est défini comme le déplacement d'énergie thermique d'une zone à une autre sous l'effet d'une différence de température. Il peut s'effectuer entre deux corps en contact

(solide-solide, solide-fluide, fluide-fluide) ou entre deux sections d'un même corps. L'énergie interne du système change au cours du transfert de chaleur, produisant :

- Le flux thermique qui est transmis.

- La distribution de la température à l'intérieur du milieu étudié[30].

1.5.2. Modes du transfert de chaleur

Il existe trois modes principaux du transfert de chaleur (par conduction, par convection et par le rayonnement)

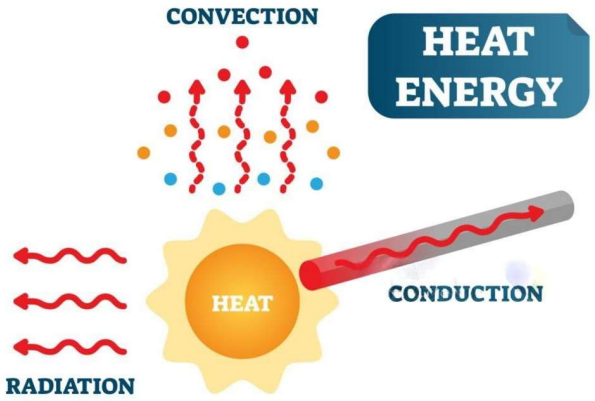


Figure 1.8 :les trois modes de transfert de chaleur[31]

- **Conduction thermique :**

La conduction est un mode de transfert de chaleur sans déplacement macroscopique de matière. L'énergie est transmise des particules les plus énergétiques vers les moins énergétiques par interaction directe.

Dans les solides, il résulte à la fois des vibrations du réseau cristallin et du déplacement des électrons libres. Dans les fluides, ce transfert est dû aux collisions et à la diffusion des molécules en mouvement aléatoire [32].

- Loi de Fourier

La conduction thermique est régie par la loi de Fourier :

$$\dot{Q} = -\lambda\, A\, \frac{dT}{dx}\ [W] \qquad (1.3)$$

Avec :

- Le signe (-) intervient puisque la chaleur s'écoule vers le décroissement de la température.
- $\dot{Q}$: Débit de chaleur [W] ;

- **λ** : La conductivité thermique du milieu considéré [W/m·K] ;
- **A** : La surface d'échange de chaleur [m²] ;
- **dT (T1 – T2)** : T1 : température de la paroi à x = 0 ; T2 : température à x = e ;
- **dT/dx** : Le gradient de température dans la direction de *x* [K/ m].

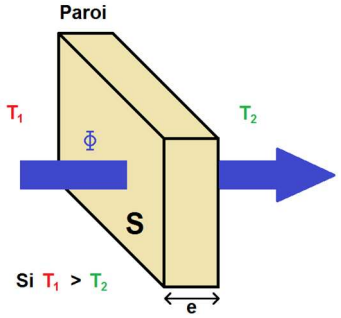


Figure 1.9 : Schéma du flux de chaleur par conduction à travers une paroi d'épaisseur (e)[33]

❖ Conductivité thermique λ :

La conductivité thermique caractérise la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur. Plus λ est élevée, plus le matériau est conducteur. Elle dépend principalement de la nature du matériau et de la température[34].

Tableau 1.1 : Conductivité thermique de quelques matériaux (à 20°C)[35]

Métaux et alliages		**Verre et céramique**	
Matériau	**λ (W/ m. K)**	**Matériau**	**λ (W/m. K)**
Argent	415	Diamand	2000
Cuivre	385	Graphite ≡	1950
Aluminium	230	Graphite ⊥	5.7
Tungstène	155	SiC	50 - 270
Zinc	110	AlN	↑270
Nickel	90	Si_3N_4	↑250
Plomb	35	Al_2O_3	16 - 40
Cémentite	50	Porcelaine	0.8 - 2
Fer α	55	MgO	40
Acier au chrome	25	BeO	15 – 20
Acier inox	14	Verres	0.9 - 2

❖ Résistance thermique

La résistance thermique traduit la capacité d'un matériau à s'opposer au flux thermique :

$$R = \frac{e}{\lambda A}\ [K/W] \qquad (1.4)$$

- **R :** La résistance thermique [K/W] ;
- **e :** L'épaisseur du matériau [m] ;
- **λ :** Conductivité thermique [W/m·K] ;
- A : Surface [m²]

❖ **Flux thermique**

Le flux thermique représente la quantité de chaleur transférée par unité de temps :

$$\phi = \frac{Q}{t}\ [J/s] \tag{1.5}$$

➢ **Transfert de chaleur par Convection**

La convection est définie comme le transport d'énergie thermique d'un fluide d'un point à un autre par le mouvement de ses molécules. Ce mouvement est dû aux variations de densité liées aux différences de température. Elle intervient lorsque le fluide est en contact avec une surface à température différente [36].

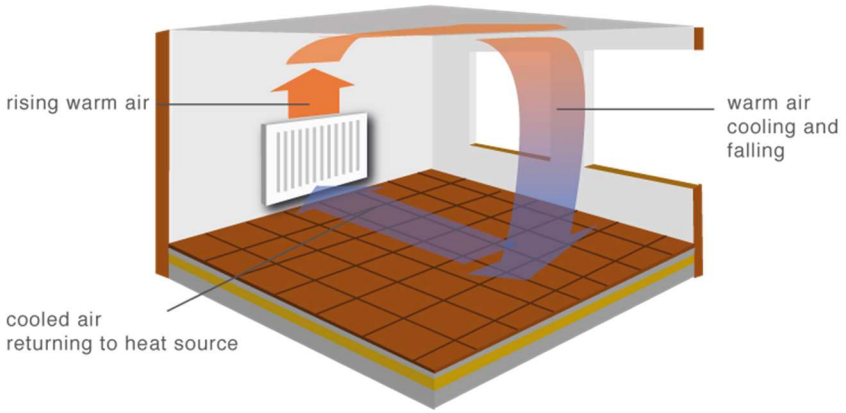


Figure 1.10 : Exemple typique de convection utilisée pour chauffer un espace[37].

❖ ***Loi de Newton***

La loi de Newton donne le flux échangé entre une surface de valeur *S* et de température *T e*t un fluide de température *Tf*. Le flux convectif est donné par :

$$\dot{Q} = \mathrm{h}\,.\,\mathrm{S}\left(T_s - T_f\right) \tag{1.6}$$

Avec :

h : Coefficient d'échange convectif [W/m². K] ;

S : Surface d'échange de chaleur [m²] ;

T_s : Température de surface ;

T_f *:* Température de fluide[38].

❖ ***Types de convection***

Selon le mécanisme à l'origine du mouvement du fluide, on distingue :

a) Convection naturelle

Convection naturelle (ou libre) se définit comme l'échange de chaleur par convection, qui est provoqué uniquement par les variations de densité dues aux différences de température, sous l'effet de forces extérieures comme la gravité[39].

Exemples : Un radiateur classique, la fumée qui s'élève, les courants marins.

b) Convection forcée

La convection forcée correspond à un mode de transfert thermique dans lequel le déplacement du fluide est assuré par une action mécanique externe, telle qu'un ventilateur, une pompe ou une turbine. Dans ce cas, l'écoulement est imposé et ne dépend pas des effets de flottabilité associés aux variations de température [39].

Exemples : Sèche-cheveux, ventilateur PC, four à convection, circulation sanguine.

➢ **Transfert de chaleur par Rayonnement**

Le rayonnement est un mode de transfert de chaleur sans support matériel, par émission d'ondes électromagnétiques. Cette émission d'énergie se réalise au détriment de l'énergie interne du corps qui émet. On trouve par exemple la Terre est chauffée par le rayonnement thermique provenant du Soleil[40].

❖ **Loi de Boltzmann**

Le flux de chaleur est donné par la formule de Boltzmann

$$\boldsymbol{\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S(T_s^4 - T_a^4)} \quad (1.7)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stefan (=5,67.10^{-8} W /m². K^4)

ε : Facteur d'émission de la surface

1.6. Les systèmes de chauffage domestique

1.6.1. Généralités sur le chauffage

Le chauffage constitue un élément fondamental pour assurer le confort thermique dans les bâtiments. Il consiste à fournir de l'énergie thermique afin de maintenir une température intérieure adaptée aux besoins des occupants.

Le choix d'un système de chauffage dépend de plusieurs facteurs, notamment les sources d'énergie disponibles (gaz, électricité, etc.), les caractéristiques du bâtiment (isolation, volume, exposition)

et le mode d'occupation. On distingue généralement le chauffage domestique, destiné au confort des occupants, du chauffage industriel.

1.6.2. Historique de chauffage domestique

Le chauffage commence avec la maîtrise du feu, il y a environ 790 000 ans, utilisé pour se protéger, cuire les aliments et se réchauffer. Les premières méthodes de production de feu reposaient sur la percussion et la friction. Dans l'Antiquité, l'hypocauste, conçu par les Grecs et perfectionné par les Romains, représente l'ancêtre du chauffage central, diffusant de l'air chaud sous les sols. À l'époque gallo-romaine, il est remplacé par la cheminée et les poêles en céramique. À la Renaissance et à l'époque moderne, ces systèmes restent encore dominants, jusqu'à l'apparition des machines à vapeur au XVIIIe siècle et du radiateur en fonte en 1855. À l'époque contemporaine, les chaudières à vapeur sont remplacées par le chauffage central à eau chaude[41].

- **Rôle du chauffage dans le confort thermique**

Le système de chauffage joue un rôle important en maintenant une température intérieure stable, ce qui rend l'environnement plus confortable. Un bon système compense la perte de chaleur et évite les grands changements de température.
Le réglage de la température avec des thermostats permet d'adapter le chauffage selon la présence des occupants, ce qui améliore le bien-être et réduit la consommation d'énergie. De plus, une bonne circulation de la chaleur aide à éviter les zones froides et réduit l'humidité, limitant ainsi les problèmes de condensation et de moisissures [42].

- **Critères de choix de chauffage**

Le choix du système de chauffage est une décision majeure qui impacte le confort et l'efficacité énergétique de tout espace. Il existe plusieurs critères [43] :

- **Caractéristiques du bâtiment :** type de construction, niveau d'isolation, inertie thermique et usage des locaux.
- **Confort et sécurité :** maintien d'une température adéquate, qualité de l'air intérieur et respect des normes de sécurité.
- **Performance énergétique :** rendement du système et réduction de la consommation d'énergie.
- **Impact environnemental :** limitation des émissions polluantes (CO_2, NOx, particules).
- **Coût global :** investissement initial, consommation énergétique et coûts d'entretien.
- **Énergie disponible** : accessibilité aux différentes sources d'énergie (gaz, électricité, etc.).
- **Maintenance et exploitation :** facilité d'utilisation et exigences d'entretien.

1.6.3. Classification des systèmes de chauffage

- **Poêle à gaz**

Le poêle à gaz est un type de chauffage qui crée de la chaleur par la combustion de gaz. Qu'il soit alimenté en gaz naturel ou en GPL (butane ou propane), il génère une flamme ou de la chaleur via son brûleur.

La chaleur générée est ensuite diffusée dans la pièce par rayonnement et, pour certains modèles, à l'aide d'une soufflerie[44].



Figure 1.11 : poêle à gaz [45]

Forces

- Une installation et un approvisionnement simple ;
- Monte très vite en température et diffuse la chaleur presque immédiatement ;
- Coût d'achat abordable.

Faiblesses

- -Le prix du gaz peut connaître des variations et se révéler coûteux ;
- -Il existe un risque de fuite de gaz ou d'intoxication au monoxyde de carbone si la ventilation est inadéquate ;
- -Les chauffages sans évacuation créent de la vapeur d'eau ce qui peut augmenter l'humidité ambiante ;
- -Le gaz, en tant qu'énergie fossile, génère des émissions de CO_2 moins écologiques
- -Odeur susceptible, Certaines personnes peuvent éprouver une sensibilité à l'odeur du gaz

- **Plancher chauffant**

Plancher chauffant ou le système de chauffage au sol hydraulique est constitué d'un réseau de tuyaux de chauffage en polyéthylène organisés en carrés concentriques ou en cercles encastrés dans le sol. Il est relié à une chaudière basse consommation ou à une pompe à chaleur air/eau qui l'alimente en eau chaude à très basse température. Les tubes diffusent alors la chaleur de façon homogène, permettant ainsi d'augmenter la température ambiante de la pièce[46].



Figure 1.12 : Plancher chauffant hydraulique[47].

Forces

- Diffusion homogène d'une chaleur douce et constante, garantissant ainsi un niveau de confort uniforme dans toutes les pièces
- Consommation énergétique réduite
- Un gain de place et esthétique.

Faiblesses

- C'est un système de chauffage exigeant en termes d'entretien, Par ailleurs, en cas de fuite, il faudra casser et changer tout le revêtement pour procéder à la réparation
- Le plancher chauffant hydraulique représente une solution d'installation relativement chère
- Le système nécessite de spécialistes pour son installation

➢ Chauffage solaire

Le chauffage solaire représente un système de chauffage qui produit de la chaleur grâce aux rayonnements solaires. Bien qu'il soit assez coûteux à l'achat, il peut s'avérer particulièrement rentable à l'usage. En règle générale, il couvre entre 20 et 50 % des besoins en chauffage et en eau chaude d'un ménage[48].

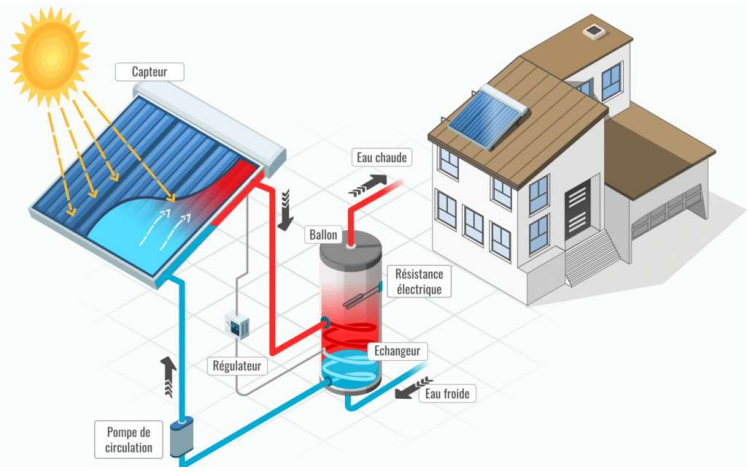


Figure 1.13 : Schéma illustratif d'un système de chauffage solaire [49].

Forces

- Le solaire est une énergie renouvelable peu polluante et gratuite ;
- Ce mode de chauffage offre un très bon rendement ;
- Un système de chauffage solaire nécessite peu d'entretien ;
- Permet à la fois de couvrir les besoins en chauffage mais aussi en eau chaude sanitaire

Faiblesses

- Un autre système de chauffage d'appoint est indispensable ;
- Rendement hétérogène selon les régions et la saison (rendement plus important dans les régions ensoleillées et l'été) ;
- Un système très coûteux à installer

➢ **Pompe à chaleur (air-air)**

Une pompe à chaleur (PAC) air-air est un système de chauffage et de climatisation réversible aérothermique qui puise les calories gratuites dans l'air extérieur pour chauffer (ou rafraîchir en été) l'air intérieur. Elle se compose d'une unité extérieure et d'unités intérieures soufflantes (splits), offrant une solution économique et écologique, idéale pour la rénovation.



Figure 1.14 : Pompe à chaleur en hiver (gauche), refroidisseur en été (droite)[50].

Forces

- Absence d'émissions directes de CO_2, ce qui en fait une solution respectueuse de l'environnement ;
- Éligibilité aux aides à la rénovation énergétique ;
- Réduction significative de la consommation énergétique ;
- Coût d'installation relativement compétitif par rapport à d'autres systèmes utilisant les énergies renouvelables ;
- Faible encombrement et intégration facile dans les bâtiments.

Faiblesses

- Performances variables selon les conditions climatiques, notamment en période de grand froid ;

- Niveau sonore pouvant être élevé pour certains modèles ;
- Nécessité d'un système d'appoint, souvent électrique, pour assurer le chauffage en conditions extrêmes ;
- Besoin d'un entretien régulier, en particulier pour le circuit frigorifique.

➢ **Les chauffages électriques**

Les radiateurs électriques opèrent grâce à un courant qui, en passant à travers une résistance, produit de la chaleur : c'est l'effet Joule. La chaleur est ensuite distribuée dans la pièce à l'aide de plusieurs techniques : la convection, le rayonnement, l'inertie[51].



Figure 1.15: Le chauffage électrique[51].

Forces

- Une montée en température rapide (sauf pour les modèles à inertie, un peu plus lents)
- Un coût à l'achat et à la pose abordable
- La possibilité de gérer la température pièce par pièce facilement.
- De nombreux dispositifs de répartition de la chaleur
- Un entretien peu contraignant

Faiblesses

- Les convecteurs ont tendance à assécher l'atmosphère
- Un rendement énergétique moyen
- Un tarif de l'électricité relativement élevé comparé à d'autres énergies et régulièrement en hausse
- Une chaleur pas toujours homogène selon le type d'équipement
- Un mode de chauffage qui s'adapte mal aux grandes pièces et pas du tout aux logements peu isolés

➢ **Chauffage central à eau chaude (avec radiateur)**

Le chauffage central, c'est le nom des systèmes de chauffage avec des chaudières au fioul ou au gaz qui distribuent un réseau bitube ou hydro-câblé pour alimenter des radiateurs ou encore des

planchers chauffants, le thermostat permet de contrôler la température de la maison en régulant la chaudière et les émetteurs de chaleur, tels que les radiateurs ou les planchers chauffants, répartissent la chaleur dans chaque pièce. Ce système de chauffage est très efficace et peut être facilement adapté à différents types de bâtiments[52].

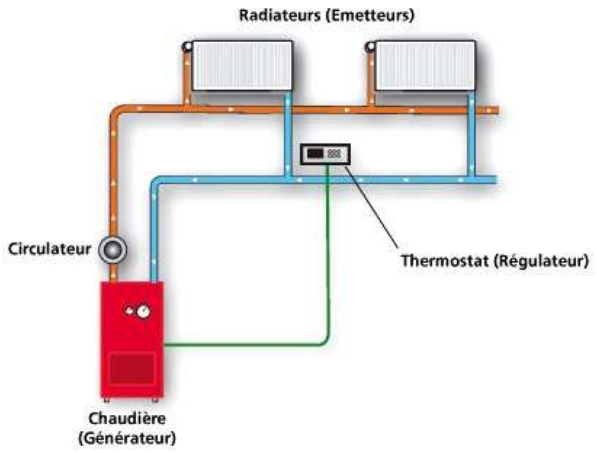


Figure 1.16 : système de chauffage central à eau chaude avec radiateurs[53].

Forces

- -La disponibilité dans le marché (plusieurs modèles, pièce de rechange…)
- -Le cout d'installation raisonnable
- -Système plus connu, qui ne nécessite pas de spécialistes pour son installation mais seulement des techniciens ordinaires
- -Large choix de radiateurs (acier, fonte, aluminium)

Faiblesses

- La mauvaise répartition de la chaleur (des zones froides/chaudes)
- La consommation énergétique importante, les pertes de charges singulières plus élevé (les coudes, les vannes, les raccords …)
- L'encombrement des radiateurs restreint l'aménagement intérieur et constitue une contrainte esthétique
- Installation compliquée
- Risque de corrosion pour les élément métallique (ex : radiateurs en acier ou en fonte)
- Problème de l'entartrage (calcaire) dans le circuit
- L'intégration d'un chauffage par le sol à ce système présente un risque de fuites sous le plancher, entrainent des couts de réparation et d'entretien élevés

1.7. Conclusion :

Le confort thermique dans les bâtiments résidentiels constitue un élément essentiel du bien-être des occupants, ce qui nécessite la mise en place d'un système capable de stabiliser la température

intérieure malgré les variations des conditions climatiques extérieures et des charges internes. Cependant, les systèmes de chauffage conventionnels présentent certaines limites, notamment des hétérogénéités de température et une consommation énergétique élevée. Dans ce contexte, il devient pertinent d'explorer des solutions alternatives plus performantes, telles que les systèmes de chauffage à plinthes chauffantes, qui feront l'objet de l'étude dans la suite de ce travail.

Chapitre 2 : Méthodologie de travail

Chapitre 2 : Méthodologie de travail

2.1. Introduction :

Les systèmes de chauffage conventionnels présentent plusieurs limites, notamment une répartition non homogène de la température, une consommation énergétique élevée ainsi qu'un inconfort thermique localisé au sein des espaces résidentiels. Ces contraintes rendent nécessaire le développement de solutions de chauffage plus performantes, capables d'améliorer le confort thermique tout en réduisant les besoins énergétiques.

Dans ce contexte, ce chapitre est consacré à la présentation du système de chauffage proposé à base de plinthes chauffantes. Il décrit les différents composants du système ainsi que son principe de fonctionnement, ainsi que les hypothèses de modélisation, les équations gouvernantes et les outils de simulation utilisés dans cette étude.

2.2. Description du système proposé

Le système étudié est un système de chauffage central à eau chaude utilisant des plinthes chauffantes comme émetteurs thermiques. Le principe de fonctionnement repose sur la circulation d'un fluide caloporteur chauffé par une chaudière à travers un réseau de tuyauteries alimentant les plinthes installées au niveau des parois du local.

La chaleur est ensuite transférée vers l'ambiance intérieure principalement par convection naturelle et rayonnement. Après avoir cédé une partie de son énergie thermique, l'eau retourne vers la chaudière afin d'être réchauffée puis recirculée dans le réseau [52].

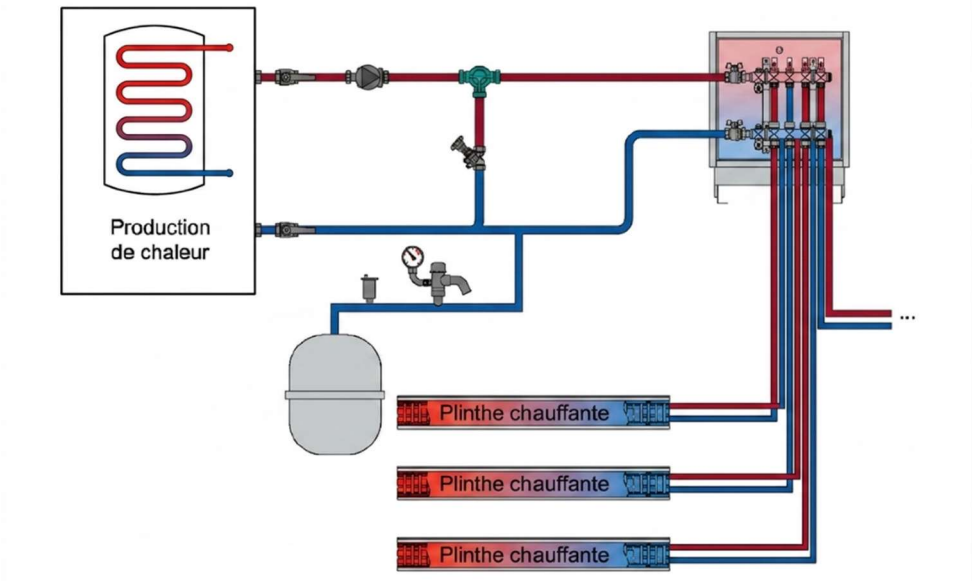


Figure 2.1: schéma d'un système de chauffage central par plinthes[54]

2.2.1. Éléments constitutifs du système

- **La Chaudière**

La chaudière est le composant le plus important des installations de chauffage et de production d'eau chaude. Une chaudière est alimentée par un combustible qui est brûlé de manière optimale. Le mazout, le gaz ou le bois peuvent être utilisés comme combustibles.

Son fonctionnement repose sur un principe simple : le gaz est brûlé dans un foyer afin de chauffer l'eau, qui circule ensuite dans les radiateurs et alimente l'eau chaude sanitaire. La combustion s'effectue à très haute température, entre 800 et 1000 °C, permettant un chauffage efficace et homogène de l'habitat. Les technologies modernes, notamment la condensation, optimisent ce processus afin d'offrir un meilleur confort et de réaliser des économies d'énergie [55].

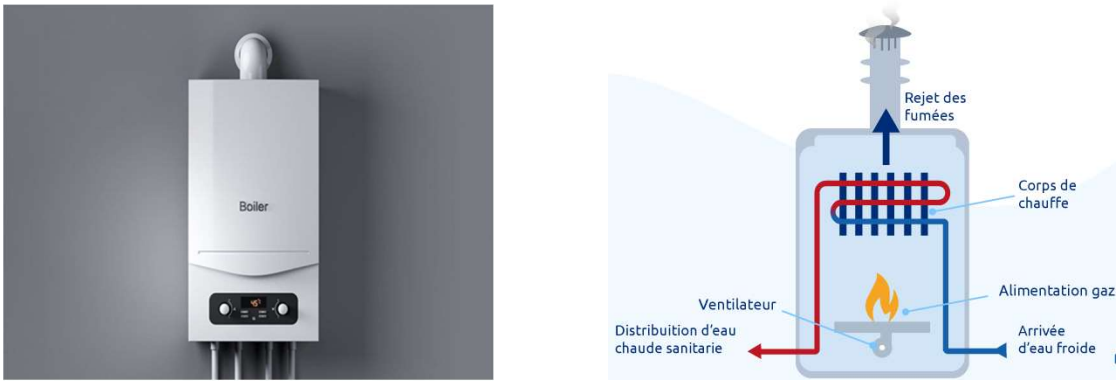


Figure 2.2 : Chaudière de chauffage central et son schéma de fonctionnement [56] [57]

- **Les plinthes chauffantes**

Les plinthes chauffantes sont des émetteurs de chaleur utilisés pour chauffer une pièce, soit à travers un circuit d'eau chaude (chaudière, pompe à chaleur), soit par alimentation électrique. Les modèles à inertie (fluide ou sèche) sont parmi les plus performants et économiques.

Les plinthes diffusent la chaleur par rayonnement et par convection, la répartition entre ces deux modes dépendant du type de plinthe utilisé. Les matériaux les plus utilisés sont la fonte, l'acier et l'aluminium [58] .

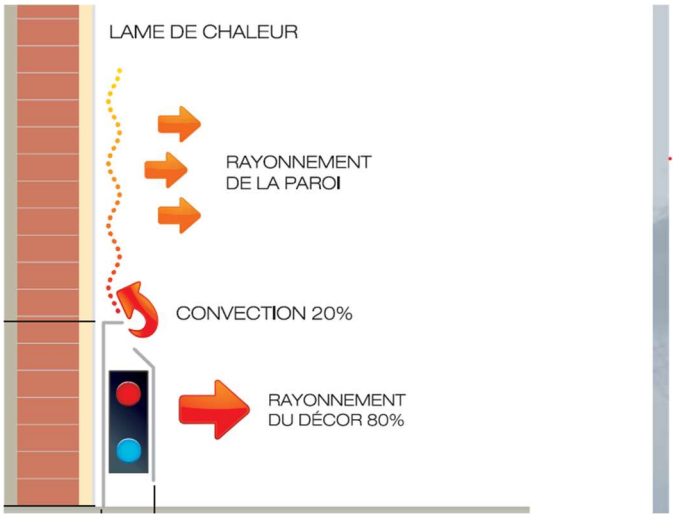


Figure 2.3: schéma de fonctionnement d'une plinthe chauffante[54]

❖ Les Circulateurs

Le circulateur (pompe de circulation) est un élément essentiel d'un système de chauffage à eau chaude. Il assure la circulation de l'eau chaude vers les émetteurs thermiques et le retour de l'eau refroidie vers la chaudière.

Il existe principalement deux types de circulateurs :

- **À rotor noyé** : silencieux, économiques et ne nécessitant pas d'entretien, mais avec un rendement relativement faible ;
- **Pompes in-line** : équipées d'un moteur séparé et ventilé, plus performantes et utilisées dans les grandes installations [59].



a) pompe axiale b) pompe radiale

Figure 2.4: Types de pompes de circulation [60]

❖ **Réseaux de distribution**

La chaleur produite par la chaudière est transportée à travers un réseau de tuyauteries afin d'alimenter les plinthes chauffantes installées dans les différentes pièces du bâtiment.

Les systèmes de chauffage central se distinguent par leur mode de distribution. Dans le système bitube, les conduites d'aller et de retour sont séparées pour chaque plinthe, ce qui permet une distribution plus homogène de la chaleur et un meilleur contrôle thermique.

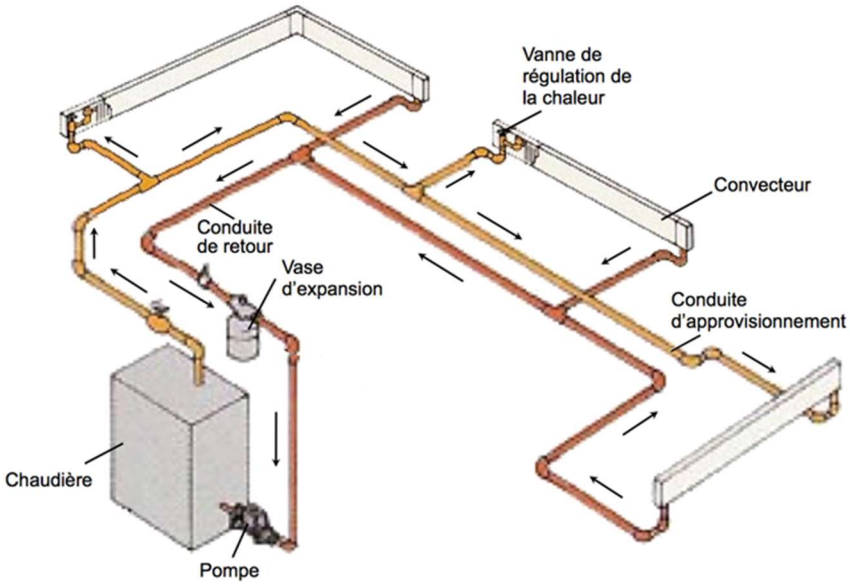


Figure 2.5 : Schéma de distribution bitube d'un système de chauffage par plinthes [61]

2.2.2. Organes de régulation et de sécurité

❖ **Vase d'expansion**

Le vase d'expansion est un réservoir métallique divisé en deux parties par une membrane souple : d'un côté l'eau du circuit de chauffage, et de l'autre un gaz (air ou azote). Il absorbe la dilatation de l'eau lors du chauffage afin de maintenir une pression stable dans le circuit et d'éviter les surpressions [62].

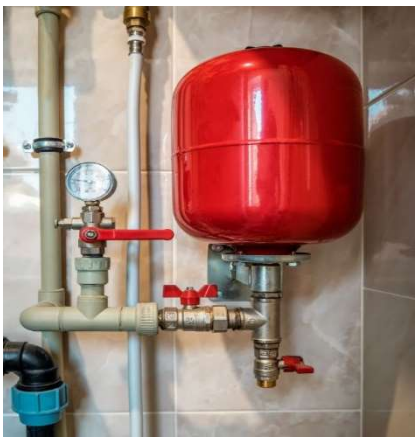


Figure 2.6 : Vase d'expansion[62]

❖ **Vannes de régulation**

Les vannes de régulation permettent de contrôler le débit de l'eau chaude circulant dans le système de chauffage. Elles sont utilisées pour équilibrer la distribution de la chaleur entre les différentes zones chauffées[63].



Figure 2.7 : Vanne de régulation[63]

❖ **L'électrovanne :**

L'électrovanne contrôle la circulation de l'eau chaude dans le système de chauffage. Commandée par le régulateur, elle s'ouvre pour permettre le passage de l'eau chaude lorsque le chauffage est demandé, puis se ferme une fois la température souhaitée atteinte[64].



Figure 2.8 : électrovanne[64]

❖ **Régulateur de pression :**

Le régulateur de pression permet de contrôler et de stabiliser la pression de l'eau dans le circuit de chauffage, afin d'assurer un fonctionnement sûr et efficace de la chaudière et des différents composants du système[65].



Figure 2.9 : régulateur de pression[65]

❖ **La soupape de sécurité**

La soupape de sécurité est un dispositif indispensable dans les installations de chauffage à eau chaude. Elle protège le circuit contre les surpressions pouvant apparaître lors de l'augmentation de la température de l'eau.

Lorsque la pression dépasse la valeur limite admissible, généralement fixée à 3 bars, la soupape s'ouvre automatiquement afin d'évacuer l'excès d'eau et de sécuriser l'installation[66].



Figure 2.10: soupape de sécurité [66]

❖ **Thermostat :**

Le thermostat est un dispositif permettant de maintenir une température stable dans le système de chauffage. Il commande le fonctionnement du chauffage en fonction de la température souhaitée.

Pour assurer une mesure correcte, il est généralement installé à une hauteur d'environ 1,50 m du sol et à distance des sources de chaleur susceptibles d'influencer son fonctionnement [67].



Figure2.11 : Thermostat d'ambiance[67]

❖ **Cerveau programmateur**

Le cerveau programmateur, également appelé système de régulation ou de contrôle, assure la gestion automatique du système de chauffage. Il permet notamment de commander l'ouverture et la fermeture des électrovannes selon des horaires prédéfinis ou des conditions de fonctionnement spécifiques[68].



Figure 2.12 : cerveau programmateur [68]

2.3. Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier la modélisation du système de chauffage central par plinthes, les hypothèses suivantes sont adoptées :

- **Régime d'écoulement :** le fluide caloporteur (généralement de l'eau) circulant dans les plinthes est supposé en régime laminaire et incompressible ;
- **Transfert thermique dans la plinthe :** les transferts de chaleur à l'intérieur de la plinthe sont considérés principalement unidimensionnels, suivant la direction de l'écoulement du fluide ;
- **Échange thermique avec l'air ambiant :** le transfert de chaleur entre la plinthe et l'air de la pièce se fait par convection naturelle et rayonnement, avec des coefficients d'échange supposés constants ;
- **Conditions temporelles :** le système est étudié en régime stationnaire, c'est-à-dire que les températures ne varient pas dans le temps après l'établissement du régime permanent ;
- **Température des parois :** les parois de la plinthe sont supposées à température uniforme ou avec une variation négligeable le long de leur surface ;
- **Pertes thermiques :** les pertes de chaleur vers le mur ou vers l'extérieur sont négligées ou modélisées par une condition d'isolation thermique simplifiée ;
- **Distribution de la température dans la pièce :** la température de l'air ambiant est supposée homogène dans le volume de la pièce ;
- **Conditions aux limites :** des conditions de symétrie ou d'isolation peuvent être appliquées selon la configuration géométrique étudiée.

2.4. Les équations gouvernantes

2.4.1. Équation de continuité : conservation de la masse (forme général) :

L'équation de continuité traduit le principe de conservation de la masse. Elle exprime que le débit massique entrant dans un système est égal au débit sortant, en l'absence d'accumulation [69].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{V}\right) = 0 \tag{2.1}$$

Avec :
ρ : la masse volumique [kg/m³] ;
$\vec{V}$: vitesse d'écoulement [m/s] ;
t : temps [s] ;
∇ : divergence.

Pour un fluide incompressible (sa masse volumique est une constante)

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \tag{2.2}$$

Forme simplifiée (écoulement permanent dans une conduite) :

$$S_1.V_1 = S_2.V_2 \tag{2.3}$$

Avec :
S_1 : surface intérieure de conduite à l'entrée [m] ;
V_1 : vitesse de fluide à la sortie[m/s] ;
S_2 : surface intérieure de conduite à la sortie[m] ;
V_2 : vitesse de fluide à la sortie[m/s] [70].

2.4.2. Équations de Navier–Stokes : conservation de la quantité de mouvement :

Les équations de Navier–Stokes décrivent le mouvement des fluides en appliquant les lois fondamentales de la mécanique des milieux continus. Elles traduisent la conservation de la masse et de la quantité de mouvement, et peuvent être couplées à l'équation d'énergie[71].

$$\rho\frac{\partial\vec{V}}{\partial t} + \left(\vec{V}.\nabla\right)\vec{V} = -\nabla \mathrm{p} + \mu\nabla^2\vec{V} + \rho g \tag{2.4}$$

avec :
ρ: masse volumique [kg/m³]
$\vec{V}$: vecteur de vitesse [m/s]
$\boldsymbol{\mu}$: viscosité dynamique [Pa·s]
P : pression [Pa]
g*:* accélération de la pesanteur [m/s²]
t : temps [s]

2.4.3. Équation de l'énergie : transfert de chaleur conjugué fluide/solide :

Dans un problème de transfert de chaleur conjugué (CHT), l'équation de l'énergie est écrite pour le fluide et le solide, avec un couplage à l'interface[72].

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V}\cdot\nabla T\right) = k\nabla^2 T + \Phi \tag{2.5}$$

avec :
$\boldsymbol{\rho}$: masse volumique [kg/m³] ;
c_p : capacité thermique massique [J/kg.K] ;
T : Température [K] ;
$\vec{V}$: vitesse moyenne de fluide [m/s] ;
k : conductivité thermique [W/m.K] ;
Φ : dissipation visqueuse [W/m³] ;
t : temps [s].

2.5. Pertes de charges hydrauliques :

Lorsqu'un fluide s'écoule dans une conduite plus ou moins lisse, pouvant présenter des variations de section ou de direction, une partie de son énergie est dissipée sous l'effet des frottements et des turbulences. Cette dissipation est appelée perte de charge [73].

2.5.1. Pertes de charges singulières

Les pertes de charge singulières sont des pertes localisées observées au niveau :

- Des organes de restriction (réduction brusque de la section de passage) ;
- Des organes de liaison (coudes, tés, raccords, rétrécissements ou élargissements progressifs, etc.) [73].

La perte de charge singulière est exprimée par :

$$\Delta P(Pa) = \xi \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \tag{2.6}$$

Avec :

ΔP : pertes de charges singulières [Pa] ;

ξ : coefficient de perte de charge ;

ρ : la masse volumique [kg/m³] ;

V : vitesse moyenne de fluide [m/s].

Le coefficient ξ\xiξ dépend uniquement de la géométrie de la singularité. Il est généralement déterminé expérimentalement et reste indépendant de la nature du fluide ainsi que de son débit.

Quelques valeurs usuelles des coefficients de pertes de charge singulières dans le tableau suivant :

Tableau 2.1: valeurs usuelles des ξ

Organe de liaison	ξ
Raccord droit	0.5
Coude	1
Raccord orientable	2 à 3
Raccord orientable optimisé	1.5
Soupapes, robinets, …	3 à 6

2.5.2. Pertes de charges linéaires

Les pertes de charges linéaires ou (régulières) sont dues au frottement du fluide contre les parois internes d'une conduite, Elles sont calculé avec l'équation de **Darcy-Weis Bash** [73]**:**

$$\Delta P = \lambda . \frac{L}{D} . \rho . \frac{V^2}{2} \tag{2.9}$$

ΔP : pertes de charges [Pa] ;

λ : Coefficient de perte de charge ;

L : longueur de la conduite [m] ;

D : diamètre interne de la conduite [m] ;

$\boldsymbol{\rho}$:la masse volumique de fluide [kg/m³] ;

V : vitesse moyenne de fluide [m/s] ;

Le coefficient de perte de charge λ dépend du nombre de Reynolds, donc du régime d'écoulement[73] :

$$Re = \frac{V}{\nu} . D \tag{2.10}$$

Avec :

Re : nombre de Reynolds ;

V : vitesse moyenne de fluide [m/s] ;

$\boldsymbol{\nu}$: viscosité cinématique de fluide [m²/s] ;

D : diamètre interne de conduite [m].

On distingue 3 types d'écoulement en fonction de nombre de Reynolds :

Tableau 2.2: régime d'écoulement

Nombre de Reynolds	Régime	Expression	
(Re < 2300)	Laminaire	$\lambda = \frac{64}{Re}$	Formule de poiseuille
(2300 < Re < 10^5)	Turbulant lisse	$\lambda = 0.316 . Re^{-0.25}$	Formule de Blasius
(Re > 10^5)	Turbulant rugueux	$\lambda = 0.79\sqrt{(\frac{\varepsilon}{d})}$	Formule De Blench

2.6. Conditions aux limites

Les conditions aux limites traduisent les échanges thermiques entre le système et son environnement et permettent de définir le comportement du modèle aux frontières du domaine étudié.

❖ **Au niveau des plinthes chauffantes**

L'échange thermique est défini par les conditions du fluide :

- Température d'entrée de l'eau $T_{eau\text{-}in}$ comprise entre 60 et 75 °C ;
- Température de sortie de l'eau $T_{eau\text{-}out}$ comprise entre 50 et 65 °C.

❖ **Dans le local chauffé**

Le milieu intérieur est caractérisé par :

- Température de confort de l'air T_{air} comprise entre 20 et 22 °C ;
- Interactions thermiques entre l'air et les surfaces chauffantes assurant les transferts par convection et rayonnement.

❖ **Aux parois du bâtiment**

Les échanges thermiques avec l'extérieur sont définis par :

- Température extérieure T_{out} généralement comprise entre 0 et 10 °C en période hivernale ;
- Transferts thermiques à travers les parois du bâtiment, dépendant des propriétés des matériaux et des conditions climatiques.

❖ **Hypothèses complémentaires**

- L'air est considéré comme un fluide incompressible.
- L'écoulement est supposé laminaire.
- Les propriétés thermophysiques des matériaux sont constantes.
- Les transferts radiatifs sont pris en compte de manière simplifiée.
- Le régime étudié est stationnaire.

2.7. Méthode des éléments finis (MEF)

La résolution numérique est réalisée par la méthode des éléments finis (MEF). Cette méthode consiste à subdiviser le domaine de calcul en un ensemble d'éléments de petite taille (maillage) et à approximer les variables du problème par des fonctions d'interpolation[74].

Après discrétisation des équations gouvernantes, le problème est transformé en un système algébrique de la forme :

$$[M]\{\dot{T}\} + [C]\{T\} + [K]\{T\} = \{F\} \tag{2.11}$$

Avec :

[M] représente la matrice de stockage thermique ;
[C] la matrice de convection ;
[K] la matrice de conduction ;
{F} le vecteur des sources thermiques ;
{T} le vecteur des températures nodales.

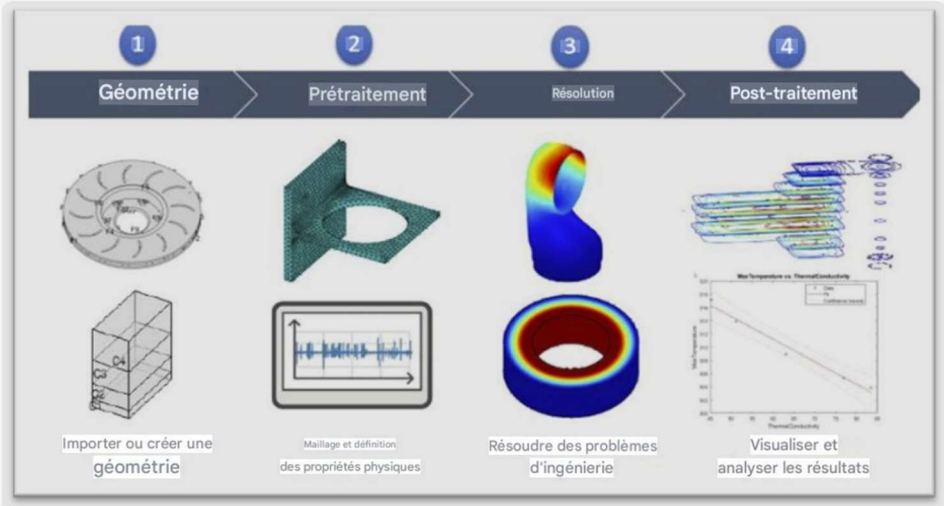


Figure 2.13 : le concept de MEF [75]

2.8. Modélisation géométrique

Les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) ou de CAO 3D sont utilisés pour créer, analyser et modifier des modèles bidimensionnels ou tridimensionnels dans un environnement numérique. Les architectes, ingénieurs, designers industriels et artistes utilisent ces outils pour concevoir des prototypes sous forme de maquettes numériques 3D paramétriques.

Ce processus comprend la création des pièces individuelles, leur assemblage virtuel à l'aide de liaisons mécaniques, ainsi que la génération automatique de mises en plan 2D destinées à la fabrication [76].

Dans ce travail, le logiciel utilisé est SolidWorks, un logiciel de conception assistée par ordinateur développé par Dassault Systèmes. Il repose sur le principe de la conception paramétrique et permet de générer trois types de fichiers interconnectés : la pièce, l'assemblage et la mise en plan [77].

2.9. Simulation CFD

La dynamique des fluides numérique (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) est une méthode de simulation permettant d'analyser les écoulements de fluides ainsi que les phénomènes de transfert thermique à l'aide de techniques numériques.

Dans cette étude, la CFD est utilisée pour analyser :

- La circulation de l'eau dans les plinthes chauffantes ;
- La distribution de la température dans le local ;
- Les phénomènes de convection naturelle de l'air ;
- Les performances thermo-hydrauliques globales du système.

La CFD repose sur la résolution des équations de Navier–Stokes couplées à l'équation de l'énergie, à travers une discrétisation du domaine en un maillage numérique adapté.

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel **SOLIDWORKS Flow Simulation**, qui est une plateforme de calcul numérique basée sur la méthode des volumes finis. Il permet de modéliser et de résoudre simultanément des phénomènes physiques couplés, notamment :
• les transferts thermiques ;
• la mécanique des fluides ;
• la convection et la conduction thermique.

Dans le cadre de ce travail, **SOLIDWORKS Flow Simulation** est utilisé pour effectuer les simulations thermo-hydrauliques du système de chauffage par plinthes. Le logiciel permet de définir la géométrie du modèle, les propriétés des matériaux, les conditions aux limites, le maillage ainsi que les paramètres de résolution nécessaires à l'analyse numérique[78].

2.10. Conclusion

Ce chapitre a posé les bases méthodologiques nécessaires à l'étude du système de chauffage par plinthes. Il a permis de définir le cadre théorique, les équations gouvernantes ainsi que les outils de modélisation et de simulation utilisés pour décrire le comportement thermo-hydraulique du système.

L'ensemble de ces éléments constitue le socle indispensable sur lequel repose la suite du travail, notamment l'exploitation numérique et l'analyse des performances présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : Développement d'un prototype de plinthe chauffante

Chapitre 3 : Développement d'un prototype de plinthe chauffante

3.1. Introduction :

Ce chapitre présente le développement d'un prototype de plinthe chauffante, en abordant les étapes de conception, de fabrication et de validation. Deux méthodes de réalisation sont utilisées : une fabrication conventionnelle par usinage de pièces métalliques et une fabrication additive par impression 3D. Une simulation numérique est également effectuée avec SOLIDWORKS Flow Simulation afin d'analyser le comportement thermo-hydraulique du système. Les logiciels utilisés incluent SolidWorks pour la conception et Bambu Studio pour la préparation des impressions 3D, permettant ainsi de valider le prototype développé.

3.2. Méthode d'usinage :

Le passage de l'idée à la réalisation effective d'une pièce mécanique fait intervenir trois fonctions principales :

- La conception/construction.

- L'étude et la préparation de la fabrication.

- La fabrication

3.2.1. La Conception :

Dans le cadre de ce projet, la conception de la plinthe chauffante a été réalisée à l'aide du logiciel SOLIDWORKS 2013. L'ensemble du système a été modélisé et subdivisé en sept (7) pièces distinctes afin de faciliter l'étude de la géométrie, l'assemblage et l'analyse fonctionnelle des différents composants.

- **Les étapes de conception par logiciel SOLIDWORKS :**

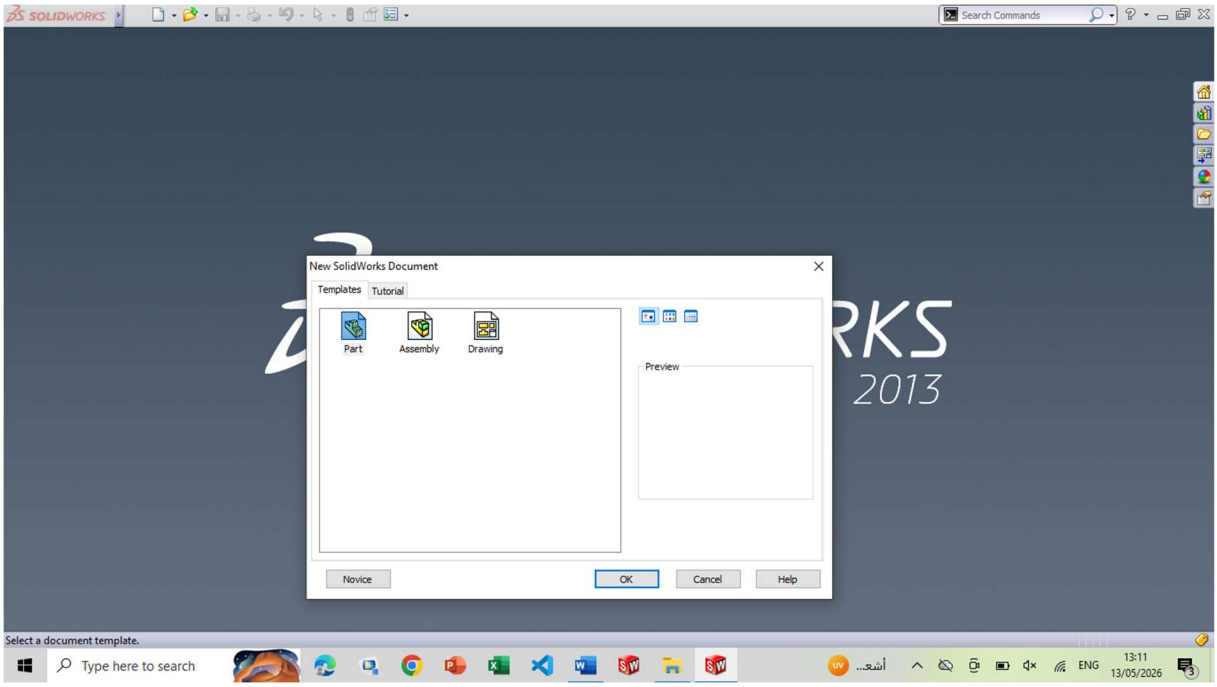
Tube :

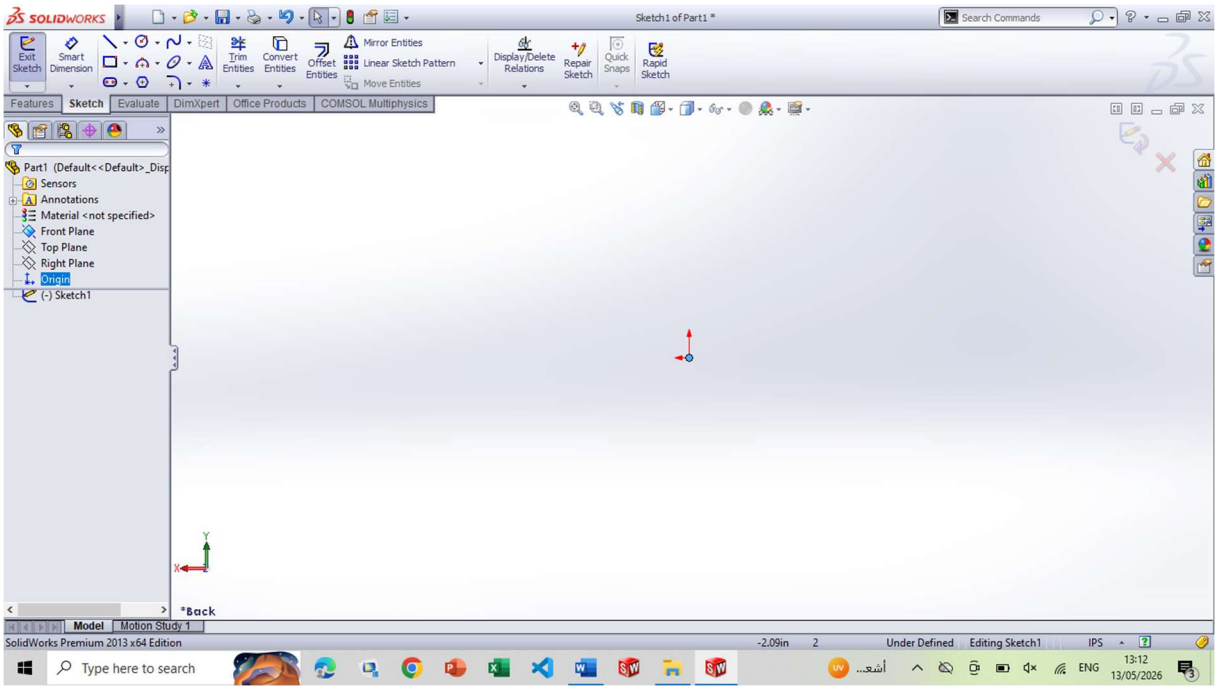
1ère étape : ouvrir Solide Works



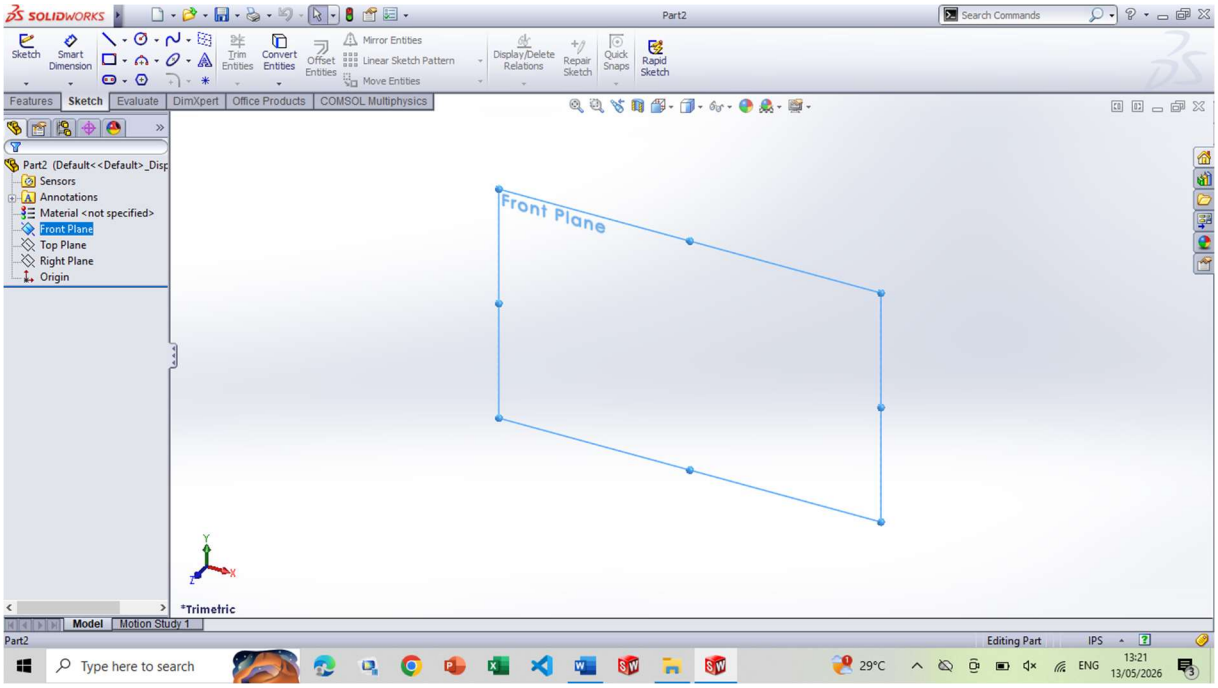
2eme étape : sélectionné, fichier, nouveau et choisir pièce :



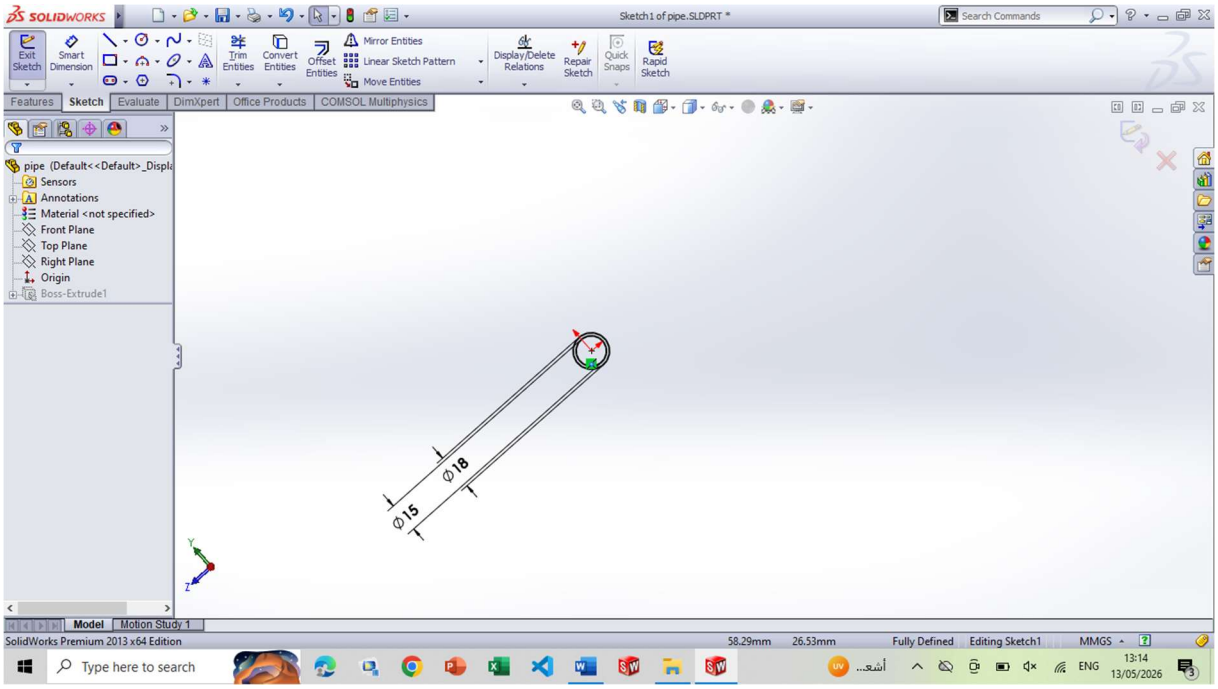

SOLIDWORKS
Search Commands
New SolidWorks Document
Templates
Tutorial
Part
Assembly
Drawing
Preview
Novice
OK
Cancel
Help
Select a document template.
Type here to search
ENG
13:11
13/05/2026


SOLIDWORKS
Sketch1 of Part1 *
Search Commands
Exit Sketch
Smart Dimension
Trim Entities
Convert Entities
Offset Entities
Mirror Entities
Linear Sketch Pattern
Move Entities
Display/Delete Relations
Repair Sketch
Quick Snaps
Rapid Sketch
Features
Sketch
Evaluate
DimXpert
Office Products
COMSOL Multiphysics
Part1 (Default<<Default>_Disp
Sensors
Annotations
Material <not specified>
Front Plane
Top Plane
Right Plane
Origin
(-) Sketch1
*Back
Model
Motion Study 1
SolidWorks Premium 2013 x64 Edition
-2.09in
2
Under Defined
Editing Sketch1
IPS
Type here to search
ENG
13:12
13/05/2026

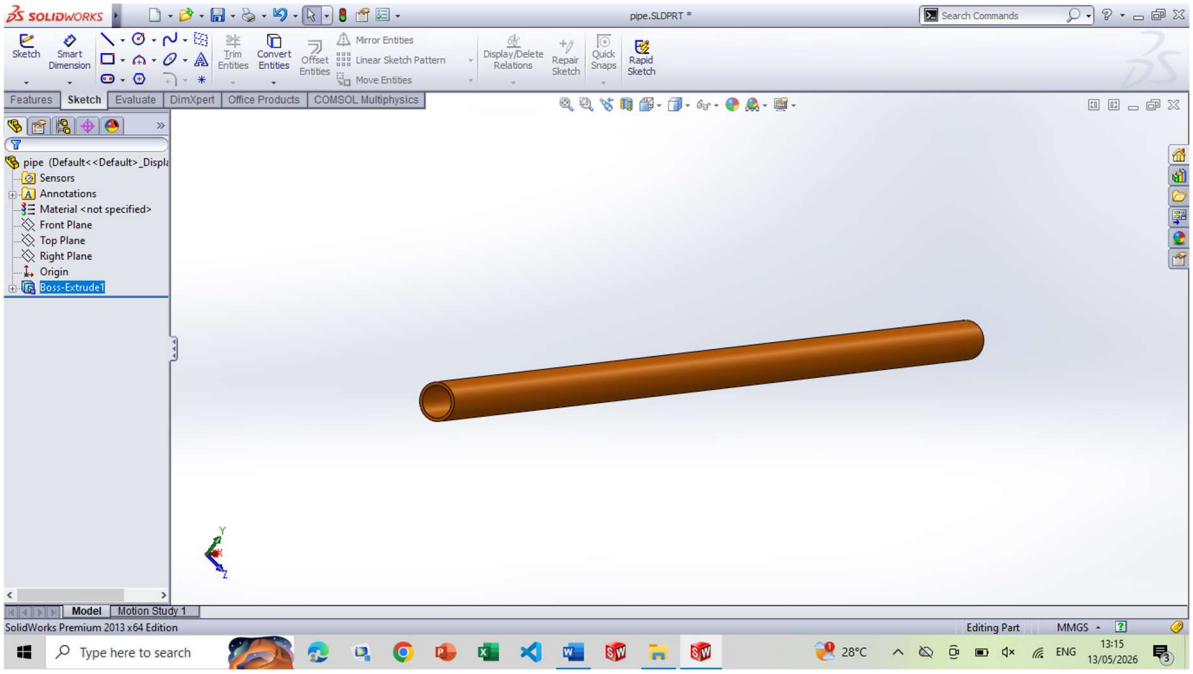
3eme étape : choisir le plan d'esquisse (dessin) :



4eme étape : esquissé (dessiné) la forme : cercle



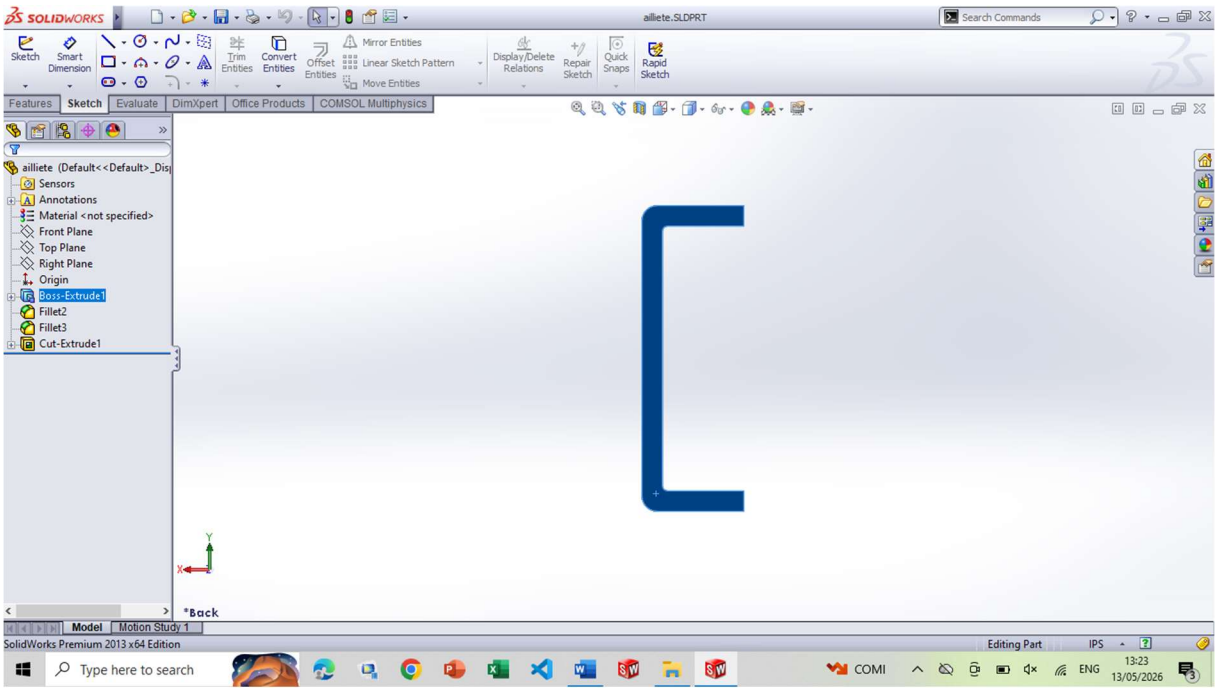
5eme étape : choisir la matière (cuivre)



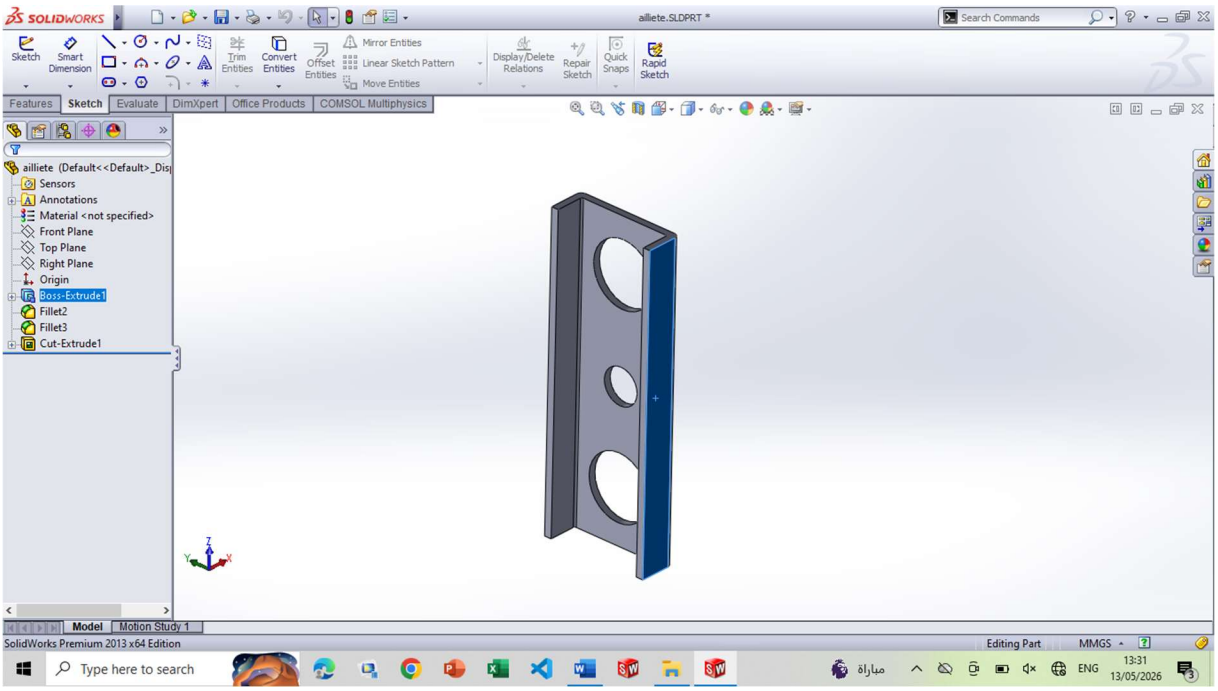
Les ailettes :

Les même 3 premier étapes précèdent

4eme étape : esquissé (dessiné) la forme



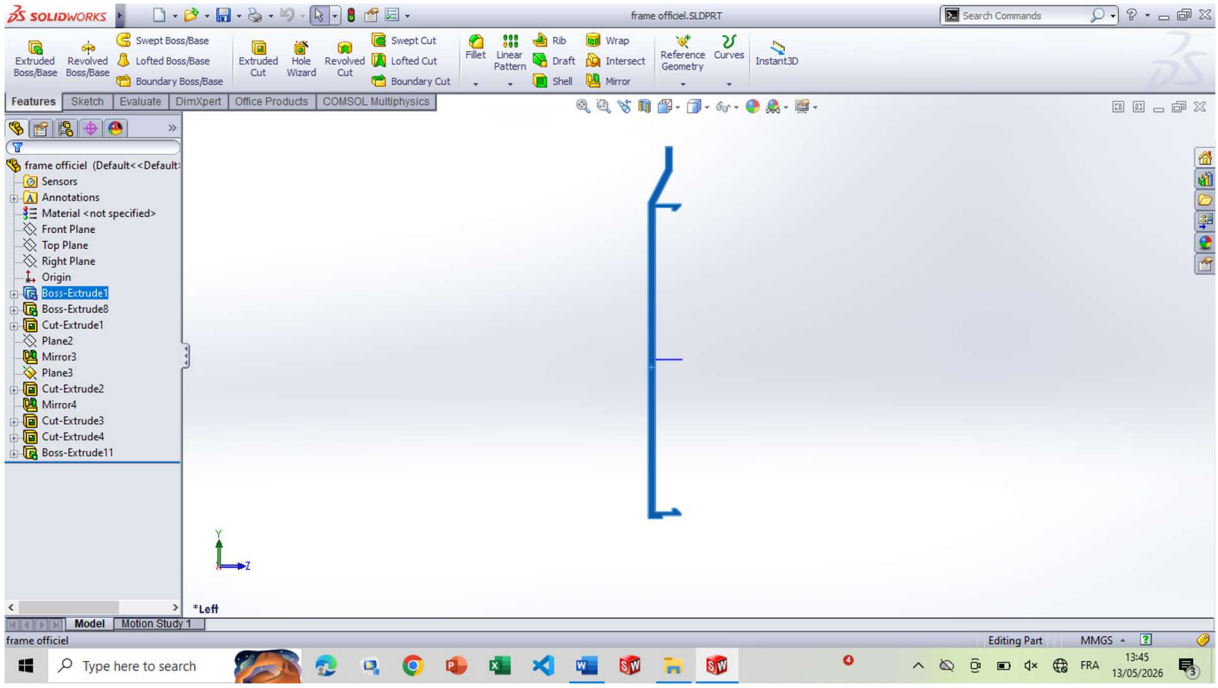
5eme étape : choisir de matière (aluminium)



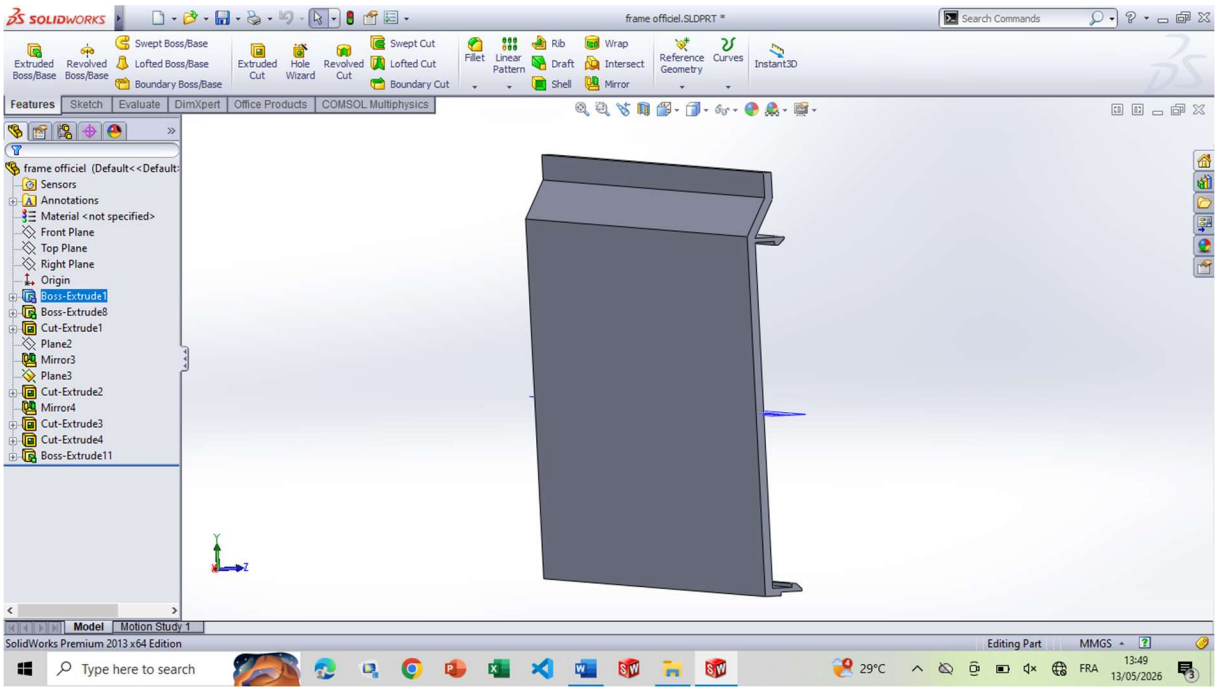
La couverture

Toujours on répéter les 3 premier étapes

4eme étape : esquisse (dessiné) la forme



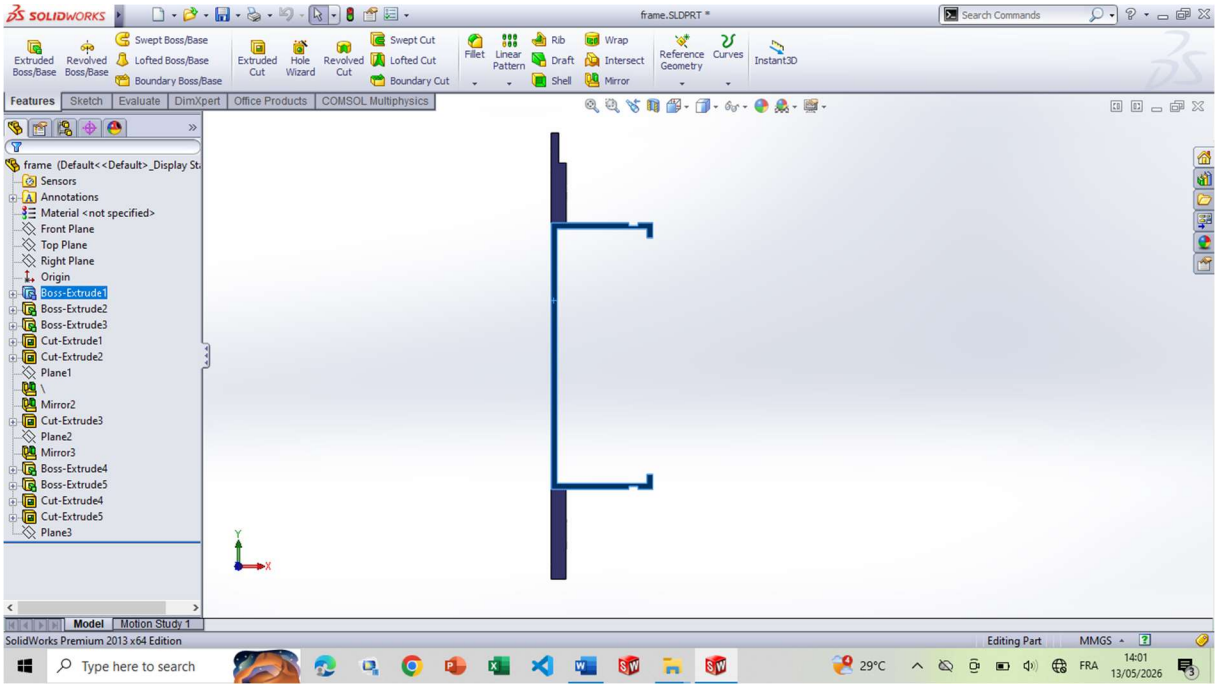
5eme étape : choisir de matière (Aluminium)



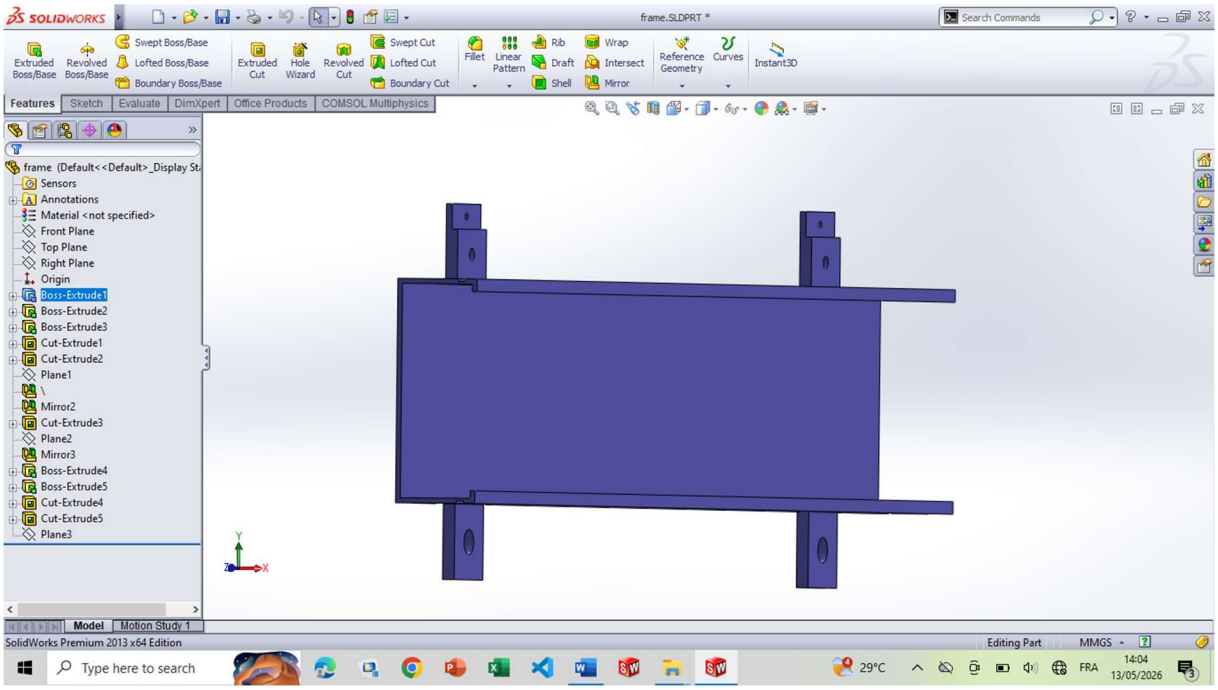
Support mural

Toujours on répéter les 3 premier étapes

4eme étape : esquissé (dessiné) la forme



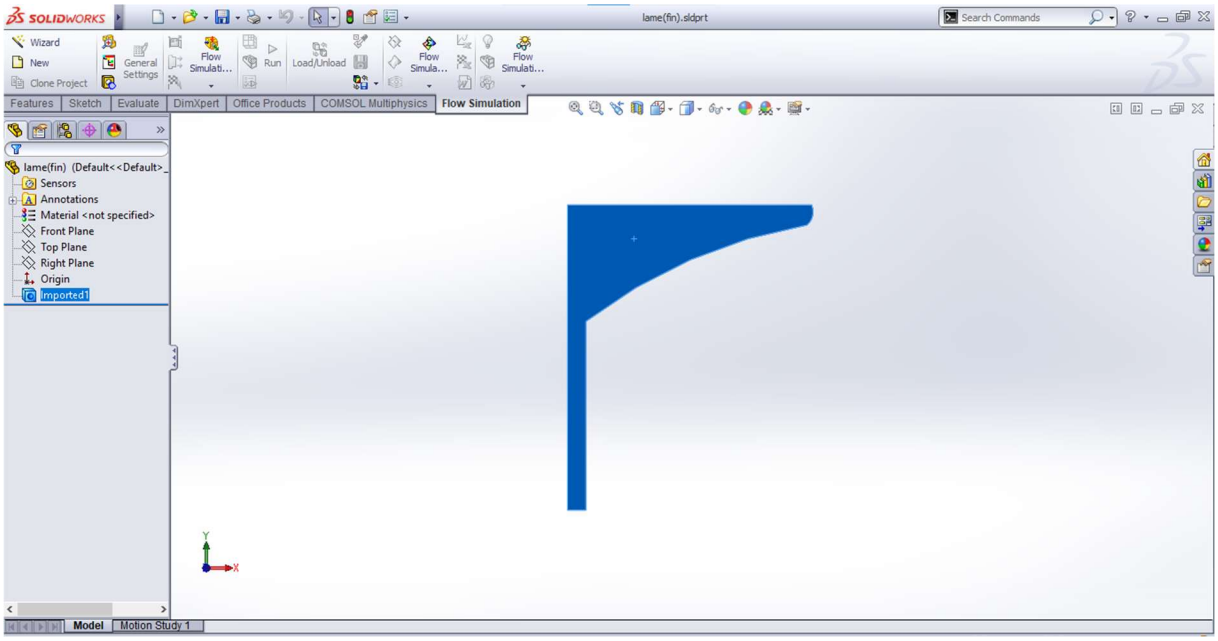
5eme étape : choisir la matière(aluminium)



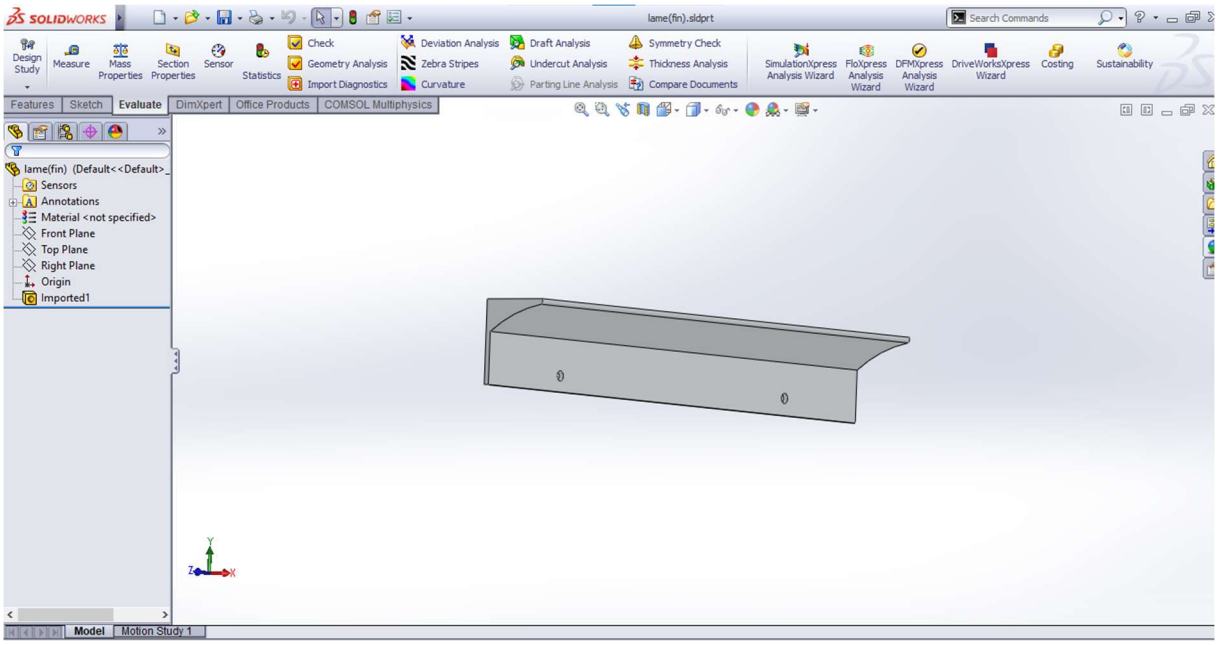
La lame

Toujours on répéter les 3 premier étapes

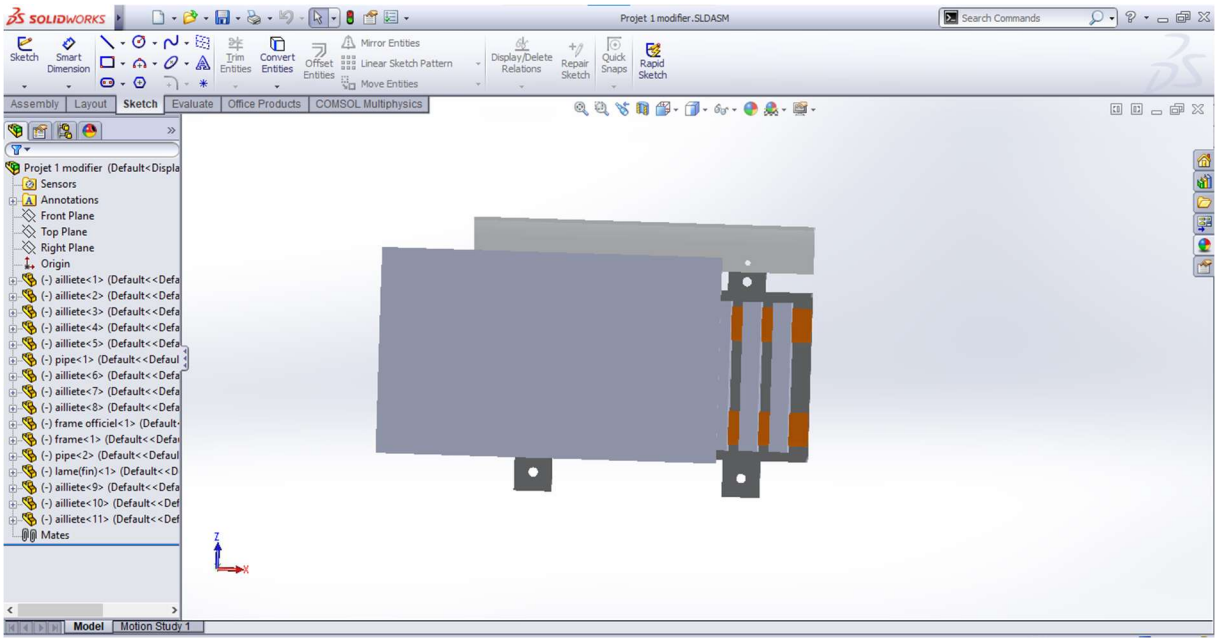
4eme étape : esquissé (dessiné) la forme

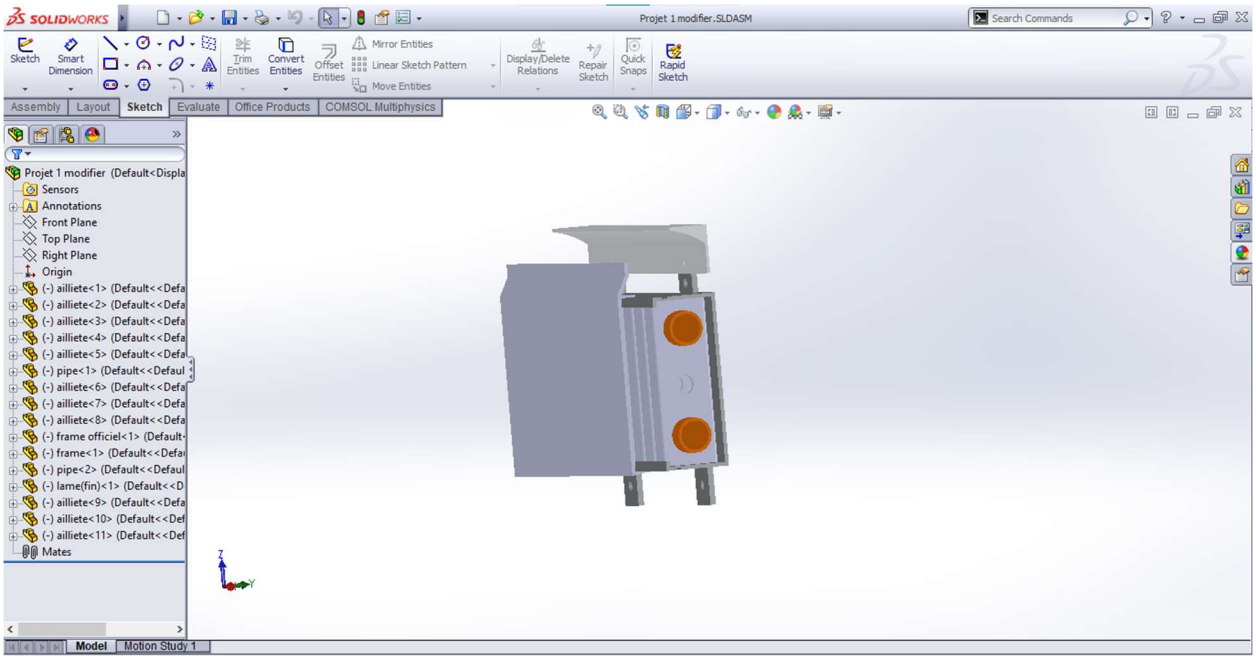


5eme étape : choisir matière (aluminium)



L'assemblage




SOLIDWORKS
Projet 1 modifier.SLDASM
Search Commands
Sketch
Smart Dimension
Trim Entities
Convert Entities
Offset Entities
Mirror Entities
Linear Sketch Pattern
Move Entities
Display/Delete Relations
Repair Sketch
Quick Snaps
Rapid Sketch
Assembly
Layout
Sketch
Evaluate
Office Products
COMSOL Multiphysics
Projet 1 modifier (Default<Displa
Sensors
Annotations
Front Plane
Top Plane
Right Plane
Origin
Mates
Model
Motion Study 1

3.3. Réalisation de prototype d’une plinthe chauffante

Dans le stage effectué au sein de l'Etablissement de Constructions Mécaniques de Khenchela (**ECMK**) nous a permis de découvrir les différents systèmes de chauffages à grand échelle ainsi que les procès de fabrication des différents produits, et aussi de participer à un projet portant sur la réalisation d’un prototype de plinthe chauffante. Le travail réalisé durant ce stage porte principalement sur l’étude, la conception et la réalisation d’un prototype de plinthe chauffante. La première étape a consisté à effectuer une étude générale sur les systèmes de chauffage central à grande échelle afin de comprendre leur fonctionnement, leurs caractéristiques techniques ainsi que leurs domaines d’utilisation. Ensuite, une phase de conception a été réalisée à l’aide du logiciel SolidWorks afin de modéliser les différentes pièces, préparer les dessins techniques et définir les dimensions adaptées au prototype. Enfin, les pièces conçues ont été fabriquées puis assemblées pour obtenir une plinthe chauffante fonctionnelle répondant aux exigences techniques et thermiques demandées.

Le deuxième prototype a été conçu et réalisé au sein de l’Incubateur de Khenchela grâce à la technologie d’impression 3D, en utilisant l’imprimante Bambu Lab P1S



Figure 3.1 : imprimante Bambu Lab P1S

3.3.1. Les étapes de la réalisation de prototype en métal :

Phase 1 : La découpe des blocs d'aluminium bruts

La première étape de fabrication consiste en la découpe des blocs d'aluminium bruts selon les dimensions requises :

	Longueur	Largeur	Hauteur	Diamètre
Couverture	220	130	40	-
Support mural	220	140	40	-
Ailette	90	40	15	-
lame	185	-	-	ϕ 40



Figure 3.2: aluminium brute

Phase 2 : fraisage et ajustage (fraiseuse conventionnel)

Le fraisage et l'ajustage constituent des opérations essentielles de fabrication mécanique. Réalisés sur une fraiseuse conventionnelle, ils permettent d'usiner chaque pièce selon les dessins techniques correspondants, tout en respectant les dimensions et les tolérances requises pour l'assemblage final.



Figure 3.3 : fraiseuse conventionnelle



Figure 3.4 : les ailettes après ajustage

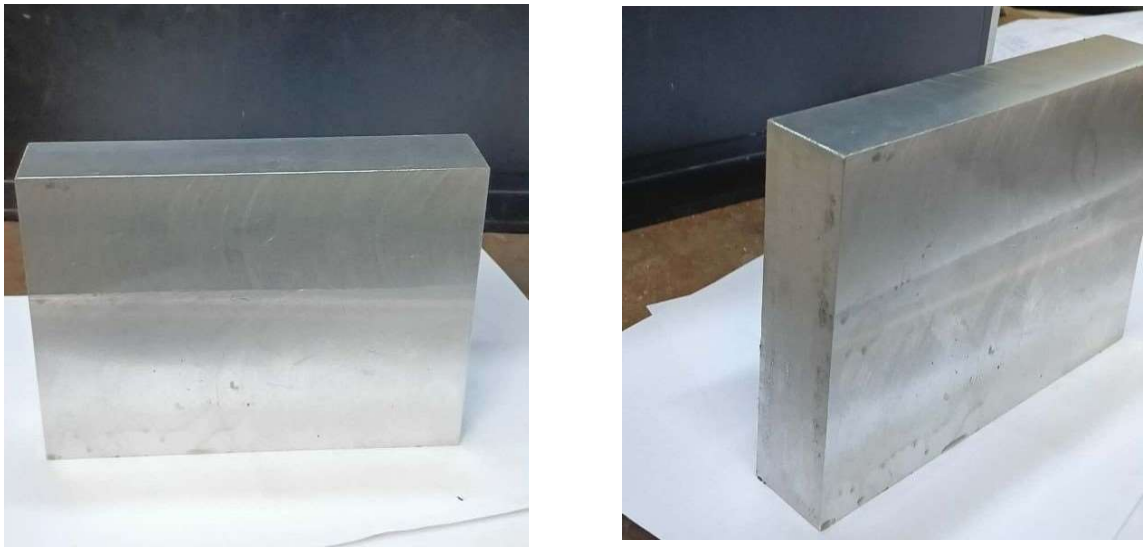


Figure 3.5: le support mural et la couverture après ajustage



Figure 3.6 : Les tubes en cuivre après la découpe et ajustage

Phase 3 : électroérosion par fil coupant

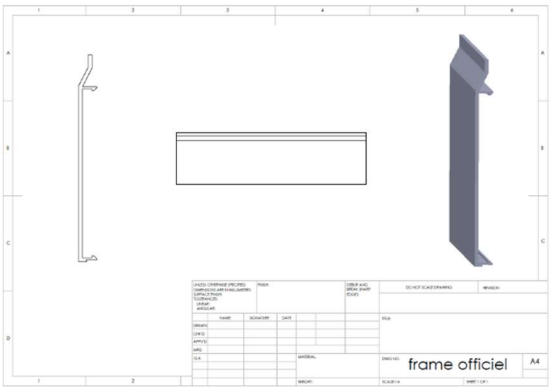
L'électroérosion, appelée également micro-usinage ou encore EDM (*Electrical Discharge Machining*), est un procédé de micro-usinage de haute précision. On parle également d'usinage par étincelage. Cette technique permet d'enlever de la matière sur une pièce, en utilisant des décharges électriques. Pour y parvenir, le dispositif consiste à recréer le phénomène de la foudre qui frappe le sol. Seules les pièces élaborées à partir de matériaux conducteurs de l'électricité (métaux, alliages, carbures, graphites, etc.), peuvent être usinées de cette façon.

Il existe 3 types d'électroérosion : - par enfonçage, par perçage rapide et par fil(molybdène), Le dernier est celui que nous avons utilisé lors de la phase.



Figure 3.7 : machine d'électroérosion la marque ONA, et l'opération de coupe par fil

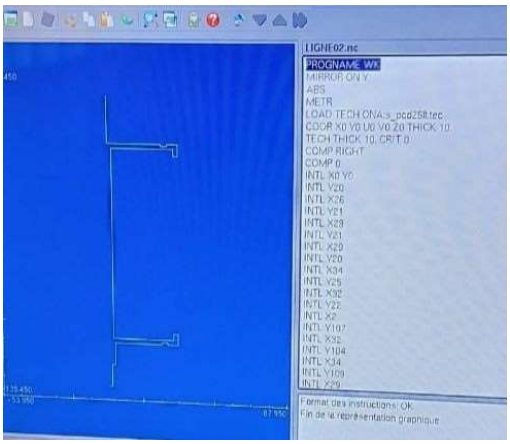
Après l'analyse du dessin technique de la pièce, les paramètres d'usinage sont programmés dans la machine d'électroérosion, notamment la trajectoire d'usinage, la profondeur de coupe et les conditions de décharge électrique. La pièce est ensuite correctement positionnée dans la machine, puis l'opération est lancée. L'enlèvement de matière s'effectue par une succession de décharges électriques contrôlées, permettant d'obtenir une géométrie précise et un excellent état de surface, Les différentes étapes du processus sont présentées dans le diagramme ci-dessous



1



2



3



4

Diagramme définir la phase 3 pour la couverture

Résultats pour les autres pièces :



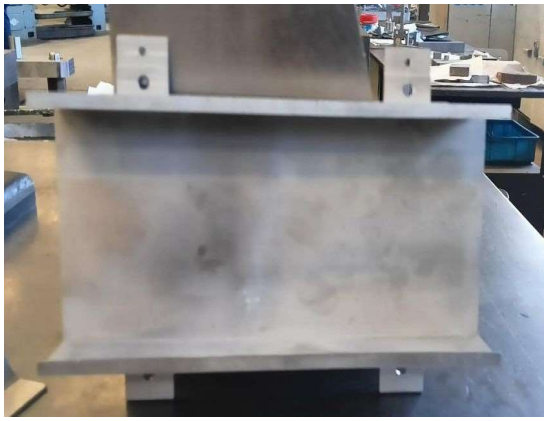
1



2



3



4

1 : lame

2 : tubes en cuivre

3 : les ailettes

4 : support mural

Phase 4 : l'assemblage

L'assemblage débute par le soudage des ailettes sur le support avec un espacement de 10 mm entre chaque ailette. Les tubes en cuivre d'alimentation et de retour sont ensuite introduits à travers les ailettes. Une lame de guidage est ensuite installée afin d'orienter l'air chaud vers l'intérieur de la pièce. Enfin, le capot extérieur est monté dans son logement prévu à cet effet, permettant ainsi d'obtenir le prototype final de la plinthe chauffante.



Figure 3.8 : prototype de la plinthe chauffante

3.3.2. Les étapes de la réalisation du prototype en 3D :

Comme les pièces du prototype avaient déjà été modélisées sous SolidWorks en commencé par

Exportation du modèle :

Conversion du modèle 3D au format STL afin de le rendre compatible avec le logiciel d'impression.



Figure 3.9 : Icon de fichier STL

Préparation de l'impression (slicing) :

Importation du fichier STL dans le logiciel Bambu Studio et définition des paramètres d'impression (orientation, remplissage, hauteur de couche, supports, etc.).

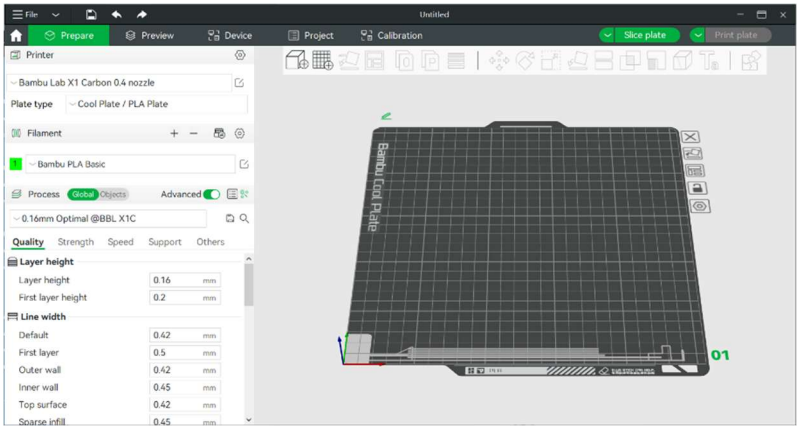


Figure 3.10 : Interface du logiciel Bambu Studio de l'imprimante 3D

Configuration de l'imprimante :

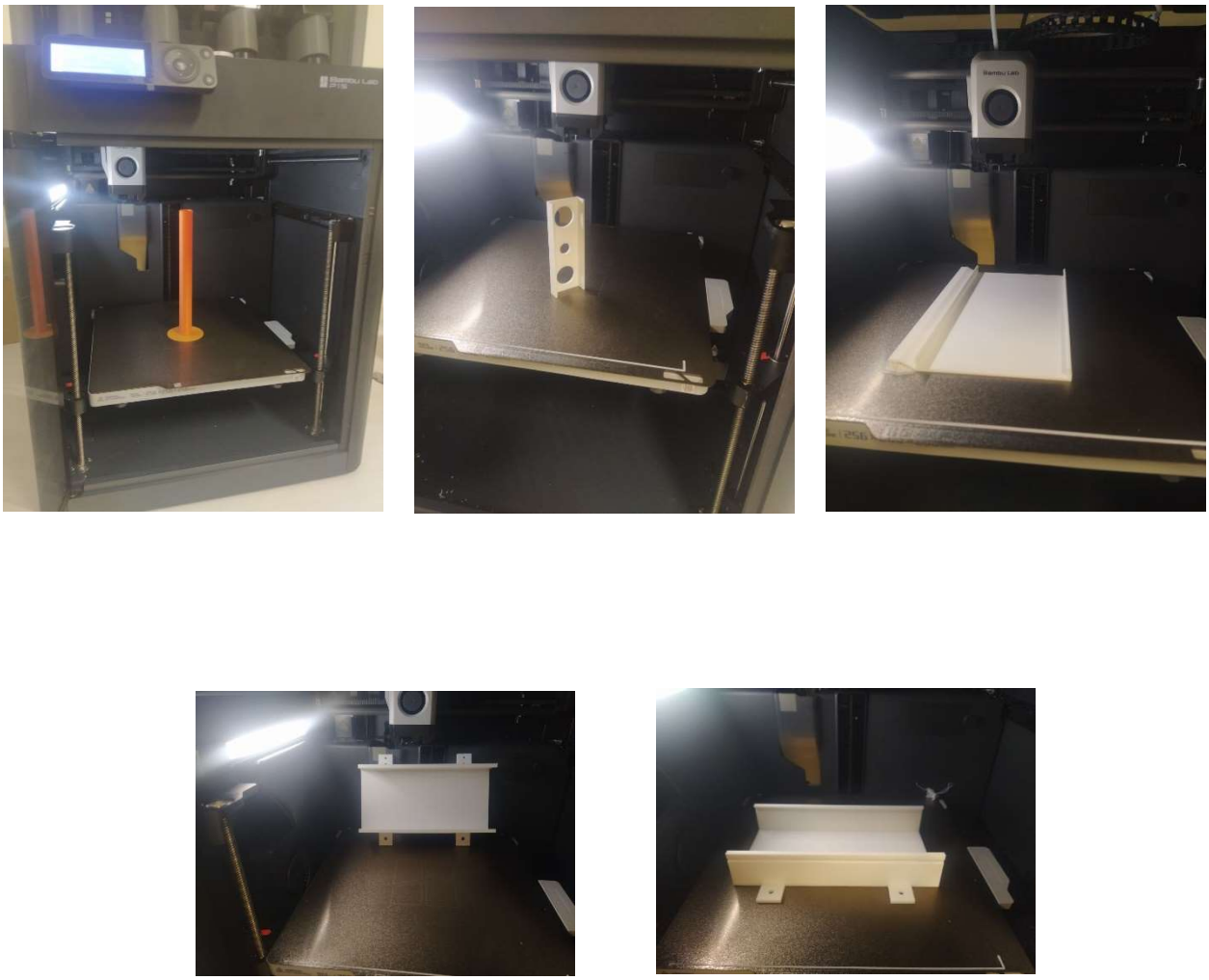
Chargement du filament et vérification des paramètres de l'imprimante Bambu Lab P1S.



Figure 3.11 : Configuration de l'imprimante Bambu Lab P1S

Lancement de l'impression 3D :

Démarrage du processus d'impression et suivi de son déroulement.



Figures 3.12 : processus d'impression pour les différentes pièces

Retrait et post-traitement des pièces :

Retrait des supports éventuels, nettoyage et finition des pièces imprimées.

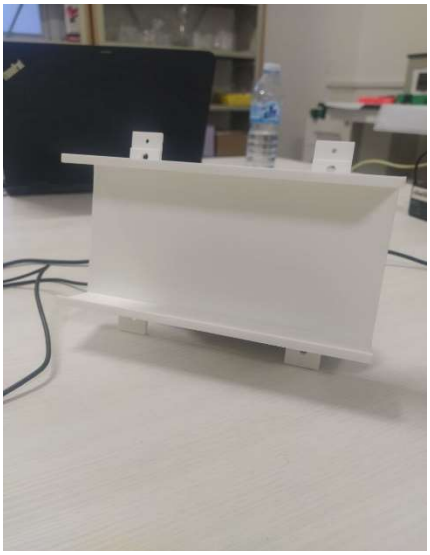


Figure 3.13 : support mural 3D

Assemblage du prototype :

Montage des différentes pièces afin d'obtenir le prototype final de la plinthe chauffante.

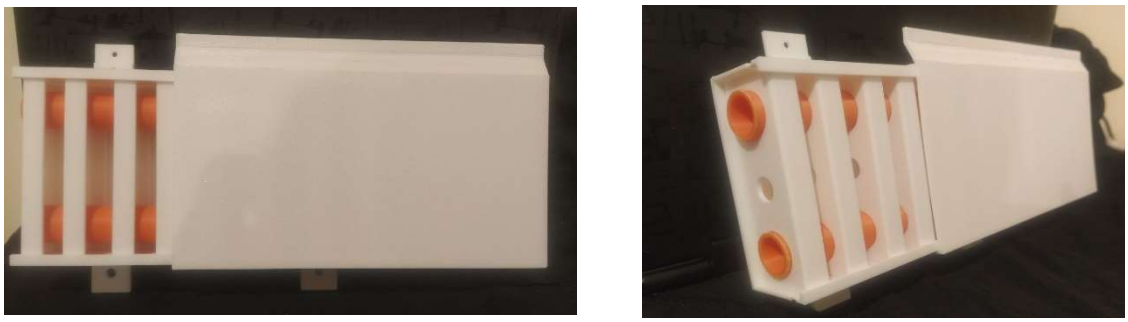


Figure 3.14 : prototype 3D de la plinthe chauffante

3.4. Simulation et interprétation des résultats

SolidWorks Flow Simulation permet de tester une conception et d'exécuter plusieurs itérations d'analyse sans jamais quitter SolidWorks

3.4.1. Activer le complément SOLIDWORKS Flow Simulation

Avant de lancer la simulation, nous activons le complément SOLIDWORKS Flow Simulation depuis Outils > Compléments afin d'accéder aux outils de simulation

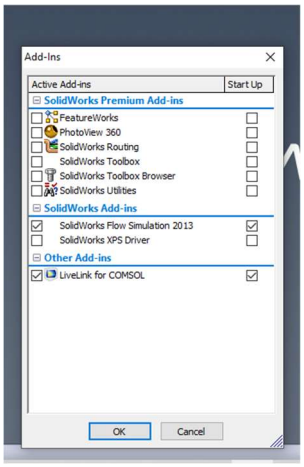


Figure 3.15 : active Le complément SOLIDWORKS Flow Simulation

3.4.2. Mise en place de l'étude

Nous cliquons sur **Wizard (Assistant)** dans l'onglet Flow Simulation pour définir les paramètres généraux : le type d'analyse (interne ou externe), les fluides utilisés (l'air), et les mécanismes de transfert thermique (convection naturelle/forcée, conduction)..

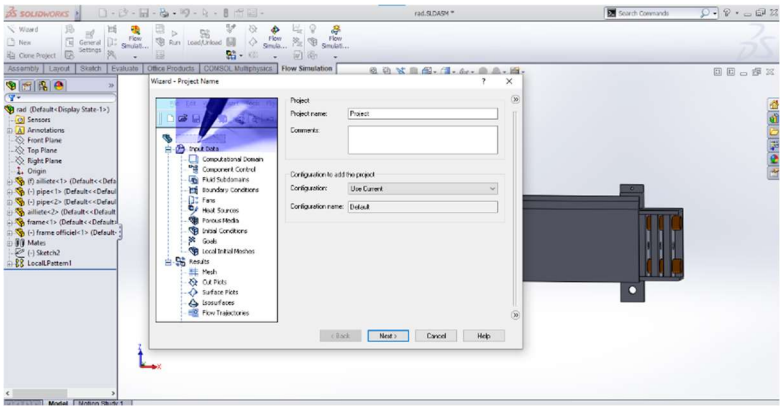


Figure 3.16 : wizard assistant

3.4.3. Attribuer des propriétés aux matériaux

Nous attribuons les propriétés des matériaux aux composants afin d'obtenir des résultats de simulation réalistes, en utilisant la bibliothèque de matériaux de SOLIDWORKS ou en créant des matériaux personnalisés.

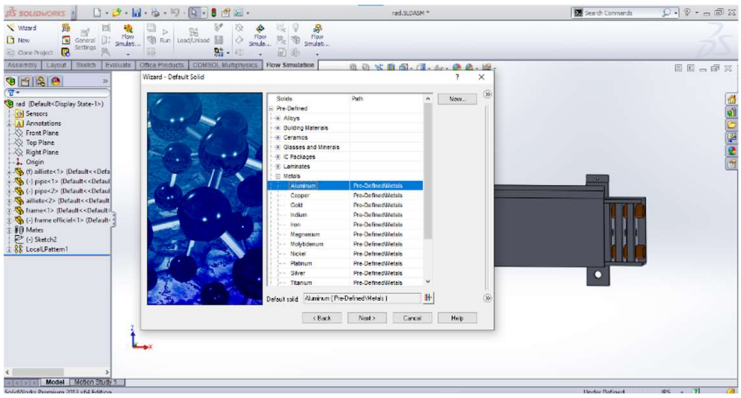


Figure 3.17 : Matériaux appliqués aux corps dans une étude

3.4.4. Définir les conditions aux limites et initiales

Nous définissons les conditions initiales pour fixer la température de départ du système (t = 0), et les conditions aux limites pour émettre les flux d'air et de chaleur permanents aux frontières du modèle.

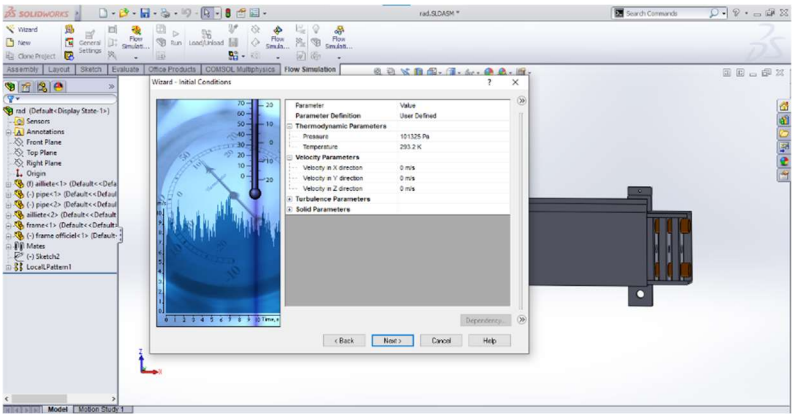


Figure 3.18 : définir les conditions initiales et aux limites

3.4.5. Appliquer une source de chaleur

Cette étape consiste à introduire la puissance thermique fournie par le système de chauffage.

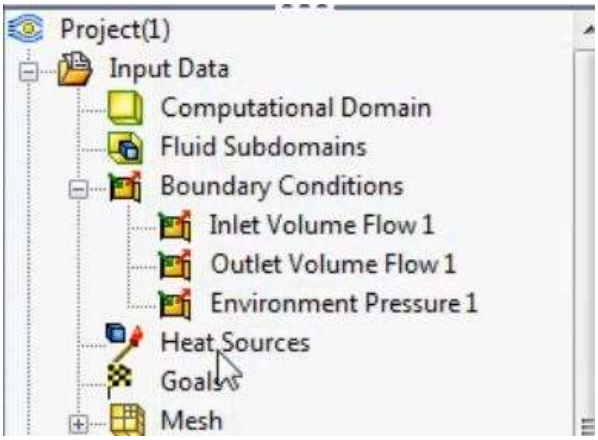


Figure 3.19 : choisir Heat source

3.4.6. Maillage du modèle

Nous réalisons le maillage du modèle en éléments finis afin de faciliter l'analyse, en ajustant la taille des mailles pour obtenir un compromis entre précision et temps de calcul.

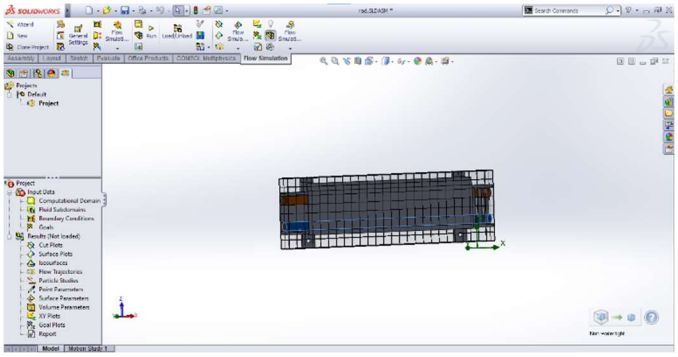


Figure 3.20 : maillages appliqués à la géométrie

3.4.7. Exécuter la simulation

Nous lançons la simulation en sélectionnant Exécuter l'étude après la configuration complète, puis nous attendons le calcul selon la complexité du modèle et du maillage.



Figure 3.21 : Exécution d'une étude

3.5. Les résultats

Profil thermique du fluide

L'étape finale consiste à examiner les résultats pour s'assurer qu'ils ont un sens.

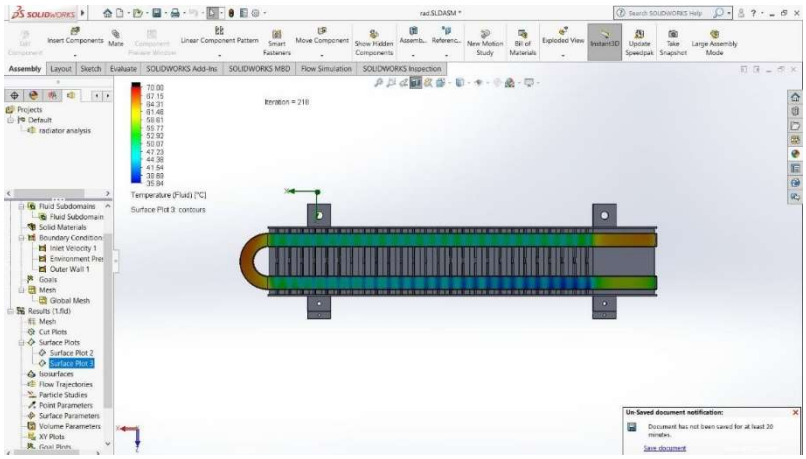


Figure 3.22 : vue de coupe

Cette vue en plan de coupe montre la distribution de la température au sein même du fluide caloporteur.

- L'Entrée (Inlet - Tube supérieur) : Le fluide pénètre à sa température maximale, proche de 70 °C (zone rouge/orange).
- Le Parcours en U : À mesure que le fluide progresse vers la gauche, la couleur vire au jaune puis au vert, indiquant un transfert de chaleur continu et efficace vers les ailettes solides.
- La Sortie (Outlet - Tube inférieur) : Le fluide quitte l'échangeur à environ 35,8 °C (zone bleue).
- Constat expert : Une chute de température (ΔT)d'environ 34 °C sur une longueur aussi compacte démontre une excellente puissance thermique dissipée par l'échangeur à ailettes puis vers l'environnement(l'air).

Profil thermique du Solide (Température (Solid) [°C])

Ces images illustrent la température des parois métalliques (tubes, ailettes et carter extérieur). La plage s'étend de 20,91 °C (température ambiante initiale probable) à 67,02 °C (contact direct avec l'entrée du fluide).

- Vue isométrique et Vue (arrière/interne) : On observe parfaitement la conduction thermique. Les ailettes situées du côté de l'entrée d'eau chaude captent fortement les calories (zones vertes à jaunes), tandis que l'enveloppe extérieure reste dans des teintes bleues/vertes (entre 25 °C et 35 °C).

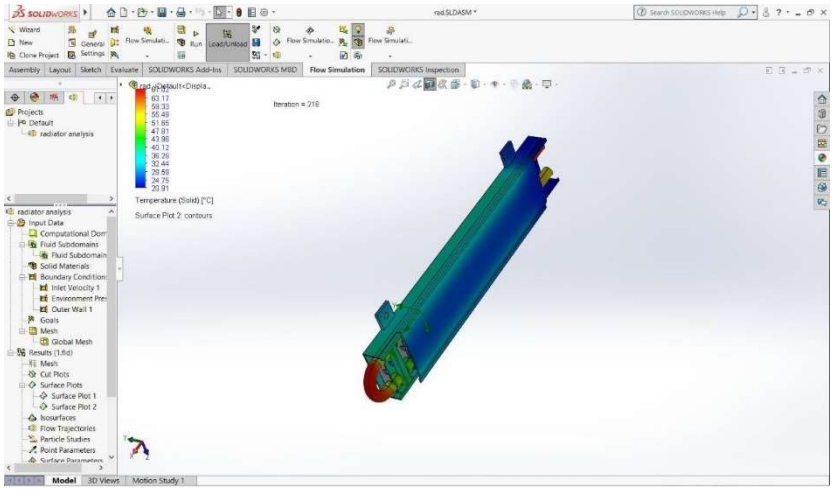


Figure 3.23: vue isométrique

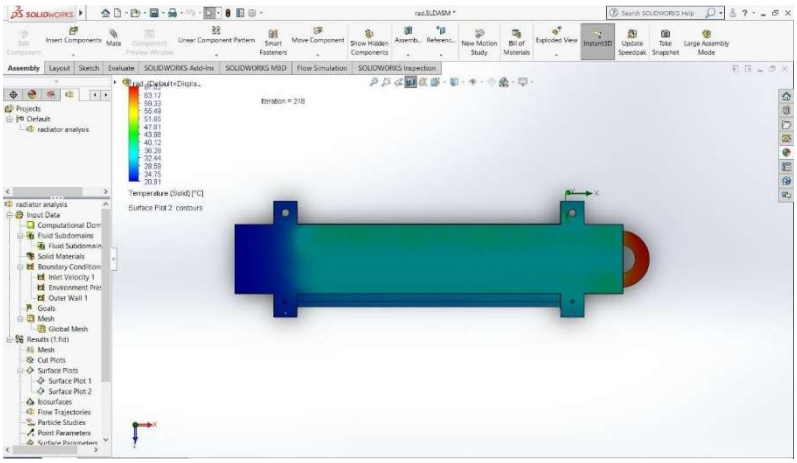


Figure 3.24 : vue arrière/interne

- Vue de (face - Habillage extérieur) : Le carter externe affiche une température très homogène et modérée (bleu dominant, ~24 à 28 °C).

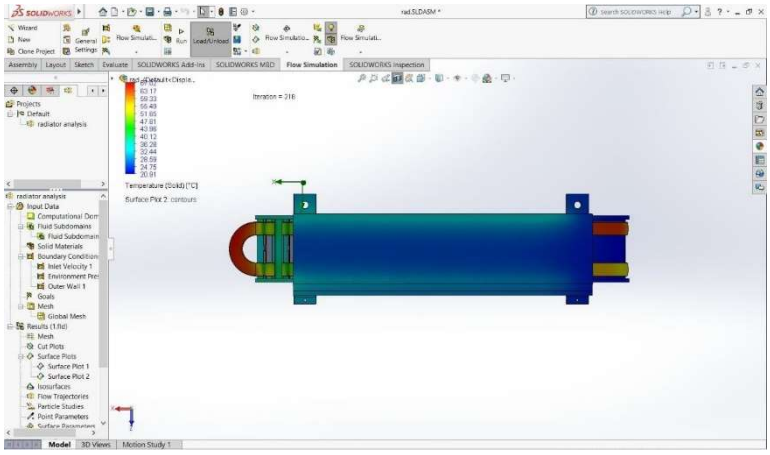


Figure 3.25 : vue face - Habillage extérieur

3.6. Interprétation et conclusions techniques

L'analyse de vos 218 itérations de calcul met en évidence trois points clés pour la validation de mon prototype :

- **Haute efficacité de l'échangeur compact :** Le gradient de température du fluide (Photo 1) prouve que la géométrie tube-ailettes remplit parfaitement son rôle. L'énergie interne du fluide est massivement transférée au solide.
- **Sécurité au toucher (Confort thermique) :** La Photo 3 est cruciale pour votre projet. Elle démontre que malgré un fluide chaud à 70 °C à l'intérieur, la température de surface de la plinthe reste tiède et sécurisante pour les utilisateurs (aucun risque de brûlure au contact direct, ce qui est un avantage majeur par rapport aux radiateurs classiques).
- **Dynamique de convection :** La configuration du flux solide-fluide indique que la chaleur sera principalement évacuée par l'ouverture supérieure de la plinthe, favorisant un flux d'air chaud ascendant le long du mur (effet de paroi chaude par convection naturelle).

3.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté le développement et la réalisation du prototype de la plinthe chauffante selon deux approches : une fabrication conventionnelle par usinage des pièces métalliques et une fabrication additive par impression 3D. Une simulation numérique a ensuite été réalisée avec SOLIDWORKS Flow Simulation afin d'étudier le comportement thermo-hydraulique du système. Les résultats obtenus montrent une bonne diffusion de la chaleur à travers l'échangeur (tube-ailettes) avec une diminution de la température du fluide le long du parcours, confirmant la validité de la conception développée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche et de développement s'inscrit dans le contexte actuel de l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et de la recherche de solutions innovantes permettant d'optimiser le confort thermique intérieur. Face aux exigences croissantes liées à la réduction de la consommation énergétique et à l'amélioration des conditions de vie des occupants, l'objectif principal de cette étude était de concevoir, modéliser et réaliser un système de chauffage compact basé sur une plinthe chauffante, capable d'offrir une meilleure répartition de la chaleur tout en réduisant les limites des systèmes de chauffage classiques.

À travers les différentes étapes réalisées, plusieurs résultats importants ont été obtenus.

Tout d'abord, l'étude théorique du confort thermique et des phénomènes de transfert de chaleur a permis de mettre en évidence l'intérêt d'une diffusion de chaleur située au niveau périphérique et proche du sol. Cette configuration favorise une meilleure sensation thermique pour l'occupant en limitant les phénomènes d'inconfort tels que la stratification de l'air chaud et l'effet de paroi froide.

Ensuite, la modélisation numérique a constitué une étape essentielle dans l'analyse du comportement thermique du système développé. L'utilisation de la simulation CFD basée sur les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie a permis d'étudier les échanges thermiques au sein de l'échangeur tubes-ailettes et d'évaluer ses performances avant la réalisation physique du prototype.

La phase expérimentale de conception et de fabrication a permis de transformer le modèle numérique en deux prototypes physiques réalisés selon deux approches complémentaires. La première méthode repose sur une fabrication conventionnelle utilisant des procédés d'usinage métallique, notamment le fraisage et l'électroérosion par fil, permettant d'obtenir une structure associant le cuivre et l'aluminium. La deuxième approche utilise la fabrication additive par impression 3D, offrant une grande flexibilité dans la réalisation des formes complexes et dans la validation du concept proposé.

Les résultats obtenus par simulation ont montré un comportement thermique satisfaisant de la plinthe chauffante. L'échangeur développé présente une capacité importante de transfert thermique grâce à l'association des matériaux conducteurs et à la géométrie adoptée. L'analyse du profil thermique a également confirmé que la température de surface reste adaptée à une utilisation en intérieur, assurant un fonctionnement sécurisé tout en favorisant la montée naturelle de l'air chaud le long des parois.

Cependant, malgré les résultats encourageants obtenus, certaines améliorations restent nécessaires afin de confirmer les performances du système dans des conditions réelles d'utilisation.

Perspectives

Les travaux futurs pourront s'orienter vers plusieurs axes d'amélioration :

- La réalisation d'une campagne expérimentale sur les prototypes fabriqués dans un environnement contrôlé permettra de comparer les résultats expérimentaux aux résultats numériques, d'améliorer la précision des modèles et de valider définitivement les performances thermiques du système.
- L'extension des simulations CFD à l'échelle d'une pièce complète permettra d'étudier l'influence réelle de la plinthe chauffante sur la distribution de température ambiante et sur l'amélioration du confort thermique des occupants.
- Une étude approfondie d'optimisation des matériaux, des coûts de fabrication et de l'impact environnemental devra être menée afin d'évaluer la possibilité d'une industrialisation future et d'un déploiement à grande échelle de cette solution de chauffage innovante.

En conclusion, ce travail a permis de démontrer la faisabilité d'un concept de plinthe chauffante associant modélisation numérique, simulation thermique et réalisation de prototypes physiques. Les résultats obtenus constituent une base intéressante pour le développement futur d'un système de chauffage plus performant, compact et adapté aux exigences de l'efficacité énergétique dans les bâtiments modernes.

Références bibliographiques

[1] "ISO 7730 :2025(fr), Ergonomie des ambiances thermiques — Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local." Accessed: Feb. 17, 2026. [Online]. Available: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:7730:ed-4:v1:fr:sec:4

[2] "Read-Only Versions of ASHRAE Standards." Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards

[3] P. O. Fanger, *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970. Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: http://archive.org/details/thermalcomfortan0000fang

[4] "Effets de la chaleur sur la santé en milieux résidentiels | INSPQ," Institut national de santé publique du Québec. Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: https://www.inspq.qc.ca/publications/3700

[5] "Travailler à des températures élevées = productivité réduite." Accessed: Feb. 18, 2026. [Online]. Available: https://www.merlin-technology.com/fr/newsfeed/news/travailler-a-des-temperatures-elevees-productivite-reduite

[6] A. Wurtz, C. Roux, F. Jacquinod, C. About, and A. Feraille, "Etude du comportement thermique et des impacts environnementaux d'une école parisienne," vol. 43, 2025.

[7] W. César, "Outils numériques et technologiques pour l'analyse de la qualité de l'air intérieur," 2014.

[8] "20131129 dossier valeur verte pbd." Accessed: Mar. 07, 2026. [Online]. Available: https://www.planbatimentdurable.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/20131129_dossier_valeur_verte_pbd.pdf

[9] C. Pagès, "La place du paysagiste dans l'amélioration du confort thermique des bâtiments: vers un confort thermique dit écologique".

[10] "Standard 55 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy." Accessed: Feb. 19, 2026. [Online]. Available: https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy

[11] "NF EN 16798-1," Afnor EDITIONS. Accessed: Feb. 20, 2026. [Online]. Available: https://www.boutique.afnor.org/en-gb/standard/nf-en-167981/energy-performance-of-buildings-ventilation-for-buildings-part-1-indoor-env/fa187070/85501

[12] K. Imessad *et al.*, "Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment," *J. Renew. Energ.*, vol. 20, no. 4, pp. 591–597, Dec. 2017, doi: 10.54966/jreen.v20i4.652.

[13] C.-A. Roulet, *CONDITIONS DE CONFORT ET DE LOGEMENT SAIN*. 2008.

[14] D. Berkouk and S. Mazouz, "Étude expérimentale de l'impact de la température ambiante de l'air sur le niveau du confort thermique des occupants," *Courr. Savoir*, Jun. 2017.

[15] "Températures à la maison : quelles sont les recommandations ? | Choisir.com." Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.choisir.com/energie/articles/116963/quelle-temperature-ideale-a-la-maison

[16] R. Fauconnier, "L'action de l'humidite de l'air sur la sante dans les bitiments tertiaires".

[17] admin, “Les notions de confort thermique et estival,” BatiVernetEco. Accessed: Mar. 01, 2026. [Online]. Available: https://bativerneteco.fr/les-notions-de-confort-thermique-et-estival/
[18] “ALEC-Nancy-Grands-Territoires-3-actions-1-1.pdf.” Accessed: Mar. 08, 2026. [Online]. Available: https://alec-nancy.fr/wp-content/files/2017/09/ALEC-Nancy-Grands-Territoires-3-actions-1-1.pdf
[19] M. N. Diffusion JLL, “7 clés essentielles pour un bon confort thermique,” Matériaux Naturels. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.materiaux-naturels.fr/blog/87-confort-thermique
[20] B. Jones, K. Hsieh, and M. Hashinaga, “The effect of air velocity on thermal comfort at moderate activity levels,” *Ashrae Trans.*, 1986, Accessed: Mar. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.semanticscholar.org/paper/The-effect-of-air-velocity-on-thermal-comfort-at-Jones-Hsieh/bd3d0b505fdc6f7d4fa3f22d819040f7adad66ba
[21] “Le confort – un objectif ressenti ou mesurable ?” Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.kampmann.be/kampmann-aujourd-hui/technique-et-connaissances/le-confort-un-objectif-ressenti-ou-mesurable
[22] “Définitions : métabolisme - Dictionnaire de français Larousse.” Accessed: Feb. 21, 2026. [Online]. Available: https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/m%C3%A9tabolisme/50809
[23] “ISO 11079:2007(en), Ergonomics of the thermal environment — Determination and interpretation of cold stress when using required clothing insulation (IREQ) and local cooling effects.” Accessed: Feb. 21, 2026. [Online]. Available: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:11079:ed-1:v1:en
[24] P. B. Claude CHEZE, *La thermodynamique, des principes aux applications*, Editions Ellipses. in Energétique. TECHNOSUP label, 2011.
[25] T. Matthews, “Heatwave: think it’s hot in Europe? The human body is already close to thermal limits elsewhere,” The Conversation. Accessed: Mar. 04, 2026. [Online]. Available: http://theconversation.com/heatwave-think-its-hot-in-europe-the-human-body-is-already-close-to-thermal-limits-elsewhere-121003
[26] “La rosée2.”
[27] V. Gallizia, “Qu’est ce que le point de rosée et comment l’éviter ?,” Easy-Therm.fr. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.easy-therm.fr/quest-ce-que-le-point-de-rosee-et-comment-leviter/
[28] K. Parsons, *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, Third Edition*. 2014, p. 586. doi: 10.1201/b16750.
[29] M. Santamouris, “Cooling the buildings – past, present and future,” *Energy Build.*, vol. 128, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.07.034.
[30] R. Hafied, “MÉCANIQUE Option: ENERGÉTIQUE”.
[31] “Heat Conduction Illustrations - iStock.” Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.istockphoto.com/illustrations/heat-conduction-illustrations?page=2
[32] “Conduction Heat Transfer - an overview | ScienceDirect Topics.” Accessed: Feb. 25, 2026. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/conduction-heat-transfer#chapters-articles
[33] “Les transferts thermiques,” Méthode Physique. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.methodephysique.fr/transferts_thermiques/

[34] “Conductivité thermique λ,” THERMOCONCEPT. Accessed: Feb. 26, 2026. [Online]. Available: https://www.thermoconcept-sarl.com/documents/conductivite-thermique/
[35] “Chimie du solide.” Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://public.iutenligne.net/chimie/valls/chimie-du-solide/propri_ceramiques_3.htm
[36] A. Bejan, *Convection Heat Transfer*. John Wiley & Sons, 2013.
[37] “Heat transfer.” Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: http://www.greenspec.co.uk/building-design/heat-transfer-conduction-convection-radiation/
[38] M. I. Davidzon, “Newton’s law of cooling and its interpretation,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 55, no. 21–22, pp. 5397–5402, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.035.
[39] “Microsoft Word - Diffusion Thermique.” Accessed: Feb. 26, 2026. [Online]. Available: https://ressources.unisciel.fr/sillages/physique/cours_physique_1a_2a/res/Diffusion_thermique.pdf
[40] B. Giovannini, *Transfert De Chaleur*, Editions Cépaduès., vol. 504 pages. 2012.
[41] “Les moyens de chauffage.”
[42] “Premium-Content_CBSHeatingGuide_FR_Article-Learning1.pdf.” Accessed: Mar. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.ghc-algerie.com/ghc/wp-content/uploads/2021/07/Premium-Content_CBSHeatingGuide_FR_Article-Learning1.pdf
[43] F. Boudali Errebai, L. Derradji, Y. Maoudj, M. Amara, and A. Mokhtari, “Confort thermique d’un local d’habitation: Simulation thermoaéraulique pour différents systèmes de chauffage,” *Revue Energ. Renouvelables*, vol. 15, no. 1, pp. 91–102, Mar. 2012.
[44] “Poêle à gaz : avantages, inconvénients et alternatives.” Accessed: Feb. 23, 2026. [Online]. Available: https://www.effy.fr/travaux-energetique/chauffage/poele/poele-gaz
[45] “Chauffages,” Atlas. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://atlas-dz.com/chauffages/
[46] “revue nÂ°10-ilovepdf-compressed.pdf.” Accessed: Mar. 08, 2026. [Online]. Available: https://dspace.enstp.edu.dz/server/api/core/bitstreams/52d5fba5-afc3-4c43-ad0e-d819c742cfa5/content
[47] “Pourquoi choisir un chauffage au sol à eau pour son habitation ?,” Chauffage-et-clim.net. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.chauffage-et-clim.net/chauffage-sol-a-eau-faut-penser/
[48] “Fonctionnement du chauffe-eau solaire,” ECOinfos. Accessed: Mar. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffe-eau-solaire/fonctionnement-chauffe-eau-solaire/
[49] “Panneaux solaires thermiques : prix, aides et avantages,” ECOinfos. Accessed: Mar. 12, 2026. [Online]. Available: https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffe-eau-solaire/panneau-solaire-thermique-chauffe-eau/
[50] Sedona, “Pompe à chaleur air-air : fonctionnement et avantages,” Thermor. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.thermor.fr/nos-conseils/comment-fonctionne-une-pompe-a-chaleur-air-air
[51] adminlepetitelectricien, “Chauffage électrique : son fonctionnement et les différents types,” Le petit electrien. Accessed: Mar. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.lepetitelectricien.fr/2020/04/30/chauffage-electrique/
[52] “chauffage.”
[53] thionvillois, “Chauffage central à eau chaude,” Chauffage durable et écologique. Accessed: Mar. 12, 2026. [Online]. Available: https://chauffagedurable.canalblog.com/archives/2013/08/12/27825359.html

[54] “Documentation-technique-THERMODUL.”
[55] “Comment fonctionne une chaudière à gaz ?” Accessed: Feb. 25, 2026. [Online]. Available: http://www.saunierduval.fr/particulier/nous-vous-accompagnons/je-m-informe/sur-la-chaudiere/comment-fonctionne-une-chaudiere/
[56] R. Bergeron, “Prix des différentes chaudières à gaz : le comparatif,” Expertise Rénovation. Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: https://www.expertise-renovation.com/guide-renovation/le-prix-dune-chaudiere-au-gaz-un-systeme-de-chauffage-repandu/
[57] “Chauffe-eau gaz : comparatif, guide d’achat et installation.” Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: https://climate.selectra.com/fr/renovation-energetique/chauffe-eau/gaz
[58] “Radiateurs,” Energie Plus Le Site. Accessed: Feb. 25, 2026. [Online]. Available: https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-a-eau-chaude/radiateurs/
[59] “Circulateurs [Chauffage],” Energie Plus Le Site. Accessed: Feb. 25, 2026. [Online]. Available: https://energieplus-lesite.be/techniques/chauffage10/chauffage-a-eau-chaude/circulateurs/
[60] XPair, “N°4 - Les différents types de rotor - niv. 3,” XPair. Accessed: May 16, 2026. [Online]. Available: https://formation.xpair.com/cours/differents-types-rotor.htm
[61] “Les systèmes de distribution de chaleur à eau chaude.” Accessed: May 17, 2026. [Online]. Available: https://www.ecohabitation.com/guides/2536/les-systemes-de-distribution-de-chaleur-a-eau-chaude/
[62] caro, “Économisez de l’argent grâce à un vase d’expansion de chaudière,” Heat Me. Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://www.heat-me.be/economiser-argent-grace-a-un-vase-dexpansion/
[63] “Comment fonctionne un robinet thermostatique ?” Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://www.danfoss.com/fr-fr/about-danfoss/our-businesses/heating/knowledge-center/heating-school/how-does-a-thermostatic-radiator-valve-work/
[64] “Qu’est-ce que l’électrovanne pour chauffage ?,” TotalEnergies. Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/qu-est-ce-que-l-electrovanne-pour-chauffage
[65] G. Lipon, “Comprendre le rôle et les avantages d’un réducteur de pression | Espace Aubade.” Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://www.espace-aubade.fr/blog/chauffage/quel-est-le-role-d-un-reducteur-de-pression.html
[66] “La soupape de sécurité, la protection de votre installation de chauffage!” Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://www.pompes-direct.com/eau-chaude-sanitaire/eau-chaude/soupape-securite/index.html
[67] “siemens-brochure-thermostats-ambiance.”
[68] “4287_Chauffageregul_v12.” Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://www.hauteloire.fr/sites/cg43/IMG/pdf/chauffage_regulation_eau_chaude.pdf
[69] E. Wahba, “Derivation of the differential continuity equation in an introductory engineering fluid mechanics course,” *Int. J. Mech. Eng. Educ.*, vol. 50, no. 2, pp. 538–547, Apr. 2022, doi: 10.1177/03064190211014460.
[70] C. Schäfle and C. Kautz, “Student reasoning in hydrodynamics: Bernoulli’s principle versus the continuity equation,” *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 17, no. 1, p. 010147, Jun. 2021, doi: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010147.
[71] S. Charnyi, T. Heister, M. A. Olshanskii, and L. G. Rebholz, “On conservation laws of Navier-Stokes Galerkin discretizations,” *J. Comput. Phys.*, vol. 337, pp. 289–308, May 2017, doi: 10.1016/j.jcp.2017.02.039.

[72] O. B. Feodoritova, M. M. Krasnov, and V. T. Zhukov, “A Numerical Method for Conjugate Heat Transfer Problems in Multicomponent Flows,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2028, no. 1, p. 012024, Oct. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2028/1/012024.
[73] A. Amaral Madeira, “Major and minor head losses in a hydraulic flow circuit: experimental measurements and a Moody’s diagram application,” *Eclética Quím. J.*, vol. 45, no. 3, pp. 47–56, Jul. 2020, doi: 10.26850/1678-4618eqj.v45.3.2020.p47-56.
[74] A. REDJIL, “Data-driven condition-based maintenance for LNG transport systems via pipeline,” ABBES LAGHROUR university, Khenchela, 2026.
[75] L. Tahar, M. Zakaria, and A. E. Mechri, “Failure Analysis of Road Tanker Transportation,” memoire, ABBES LAGHROUR university, Khenchela, 2026.
[76] “Conception assistée par ordinateur (CAO) | Siemens Software,” Siemens. Accessed: May 20, 2026. [Online]. Available: https://www.siemens.com/fr-fr/technology/computer-aided-design-cad/
[77] Institute of Solid Mechanics of Romanian Academy, C. Dragne, C. Radu Frenţ, Institute of Solid Mechanics of Romanian Academy, M. Iliescu, and Institute of Solid Mechanics of Romanian Academy, “MECHANICAL ENGINEERING OF ROBOTIC SYSTEMS BY SOLIDWORKS,” *Int. J. Mod. Manuf. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 61–68, Dec. 2022, doi: 10.54684/ijmmt.2022.14.2.61.
[78] E. Fialkova, V. Baronov, A. Slobodin, and K. Nechaev, “SolidWorks flow simulation software potential in hydrodynamic processes analysis for cone vortex emulsion,” *E3S Web Conf.*, vol. 402, p. 03007, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202340203007.