

UNIVERSITE
PAUL
SABATIER



TOULOUSE III

L A B O R A T O I R E

P H A S E

Physique de l'Homme Appliquée à Son Environnement

SIMULATION DYNAMIQUE POUR LES BUREAUX D'ETUDES

(Convention ADEME/CSTB n° 03.04.C.0092)

A. Trombe^{1,3}, S. Spagno¹, J.C. Fourès³, B. Lacacarrière¹, M. Mouret²

1 : Laboratoire de Physique de l'Homme Appliquée à son Environnement (UPS)

2 : Laboratoire de Matériaux et Durabilité des Constructions (INSA – UPS)

3 : Institut National des Appliquées de Toulouse (INSA)

118 route de Narbonne – 31062 – Toulouse Cedex 4 – France

Tel : 33-(0)5 61 55 65 33 – Fax : 33-(0)5 61 55 81 54

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION..... | 4 |
| <u>CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</u> | 6 |
| 1. INTRODUCTION | |
| 1.2 QU'EST-CE QU'UN PONT THERMIQUE ? | |
| 1.2 DIMINUTION DES PONTS THERMIQUES : EXEMPLES DE SOLUTIONS | |
| 2. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE | |
| 2.1 ETUDES SUR LE CALCUL D'UN PONT THERMIQUE | |
| 2.2 EXEMPLES PARTICULIERS | |
| 2.2.1 Les angles des murs | |
| 2.2.2 Les ponts thermiques en contact avec le sol | |
| 2.3. CONCLUSION | |
| <u>CHAPITRE 2: VALIDATION DU MODELE DE SIMULATION.....</u> | 14 |
| 1. VALIDATION EN REGIME PERMANENT | |
| 1.1 CHOIX DE LA METHODE | |
| 1.2 PONTS THERMIQUES VALIDES | |
| 2. VALIDATION DU EN REGIME TRANSITOIRE | |
| 2.1 DESCRIPTION DU PONT THERMIQUE ETUDIE | |
| 2.2 DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL | |
| 2.3 ANALYSE DES RESULTATS | |
| 2.3.1 Premier signal : cas de la marche descendante | |
| 2.3.2 Deuxième signal : cas de la sinusoïde | |
| 2.4 CONCLUSION | |
| <u>CHAPITRE 3: CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DE PONTS THERMIQUES.....</u> | 22 |
| 1. PREAMBULE | |
| 2. CREATION DE FICHIERS DE DONNEES | |
| 2.1 DONNEES METEOROLOGIQUES | |
| 2.2 AUTRES DONNEES | |
| 2.3 CONDITIONS DE SIMULATION | |
| 3. RESULTATS | |
| 3.1 PONT THERMIQUE AVEC DISCONTINUTE D'ISOLATION : CAS DE LA LIAISON PLANCHER INTERMEDIAIRE-MUR EXTERIEUR | |

- 3.2 PONT THERMIQUE SANS DISCONTINUITÉ D'ISOLATION : CAS DE L'ANGLE RENTRANT
- 3.3 PONT THERMIQUE EN CONTACT AVEC LE SOL
- 3.4 COMPARAISON ENTRE LES TROIS TYPES DE PONTS THERMIQUES
- 3.5 CONCLUSION

CHAPITRE 4: PROPOSITION D'UN EQUIVALENT PAROI DE PONT THERMIQUE.....32

1. PROTOCOLE DE CALCUL D'UN EQUIVALENT PAROI

- 1.1 DEFINITION DE L'EQUIVALENT PAROI
- 1.2 ETAPES DE CALCUL

2. RESULTATS ET ETUDE PARAMETRIQUE

2.1 PONT THERMIQUE AVEC DISCONTINUITÉ D'ISOLATION

- 2.1.1 Cas de la liaison plancher-mur extérieur
- 2.1.2 Cas de la liaison refend-mur extérieur
- 2.1.3 Cas de la liaison balcon-mur extérieur
- 2.1.4 Cas de la liaison plancher haut-mur extérieur (acrotère)

2.2. PONTS THERMIQUES AVEC CONTINUITÉ D'ISOLATION : CAS D'UN ANGLE RENTRANT DE DEUX MURS DONNANT SUR L'EXTERIEUR

- 2.3. PONTS THERMIQUES EN LIAISON AVEC LE SOL : DALLE SUR TERRE-PLEIN AVEC ISOLATION INTERIEURE SUR LE MUR EXTERIEUR
- 2.3 CONCLUSION

CHAPITRE 5: REPOSE DYNAMIQUE DE L'EQUIVALENT PAROI DE PONT THERMIQUE.....42

1. POSITION DU PROBLEME

2. METHODE UTILISEE

3. RESULTATS

- 3.1 CAS D'UNE LIAISON PLANCHER-MUR EXTERIEUR
- 3.2 CONCLUSION

CONCLUSION GENERALE.....4

BIBLIOGRAPHIE.....50

ANNEXE 1: CONFECTION DU PONT THERMIQUE EXPERIMENTAL.....52

ANNEXE 2: CALCUL DES FLUX SUR DIFFERENTS PLANS INCLINES...57

INTRODUCTION

Avec le véritable démarrage de l'isolation thermique au début des années 1970 et la réglementation thermique de 1974, les ponts thermiques sont nés. Dès cette époque, ces points faibles du bâtiment sont signalés et la nécessité de les traiter se ressent.

«...il est nécessaire de renforcer l'isolation et bien souvent on ne pourra le faire qu'en corrigeant les ponts thermiques, faute de quoi il serait illusoire d'augmenter l'épaisseur des isolants.» écrivait Maurice Croiset, du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) en avril 1972.

Le renforcement de l'isolation thermique des parois en partie courante des bâtiments neufs souligne d'une manière accrue le rôle joué par les ponts thermiques. Les éléments de construction étant mieux isolés, on constate l'augmentation de la part due aux ponts thermiques par rapport aux pertes totales en énergie de l'enveloppe. En effet, dans le cas d'un immeuble d'habitation ceux-ci peuvent aujourd'hui représenter 30 à 40 % des déperditions du bâtiment.

La Nouvelle Réglementation Thermique 2000 (RT2000) a remis ces défauts d'isolation sur le devant de la scène en les intégrant dans ces nouvelles exigences. Pour satisfaire à ces exigences réglementaires, des solutions adaptées pour réduire les ponts thermiques se développent : rupteurs, procédés de «trait d'union»... Les logiciels de simulations dynamiques des consommations énergétiques des locaux doivent aussi permettre d'appréhender le rôle des ponts thermiques.

A l'heure actuelle, ces logiciels de calcul des consommations en terme de déperditions ou d'apports thermiques des bâtiments, généralement de type mono dimensionnel, prennent difficilement en compte le rôle très important joué par les ponts thermiques bidimensionnels ou tridimensionnels. Peut-on alors trouver un outil qui permettrait de quantifier un pont thermique et qui s'intégrerait dans les logiciels de calcul mono dimensionnel déjà existants?

Le calcul d'un équivalent paroi de pont thermique paraît être une solution idéale au problème. Il suffit de répondre à la question suivante: en terme de consommations énergétiques, quelle serait la surface de paroi courante qui aurait les mêmes déperditions ou apports que le pont thermique? Ainsi un pont thermique se traduirait par une surface équivalente à rajouter dans les logiciels de calcul de consommations mono dimensionnel permettant un diagnostic thermique au niveau de l'enveloppe du bâtiment.

Ce projet est soutenu par une convention ADEME-PUCA intitulée "Simulation dynamique dans les bureaux d'études" qui s'insère dans l'appel à proposition 2003 "Qualité énergétique, environnementale et sanitaire : Préparer le bâtiment à l'horizon 2010".

Les deux approches du problème, l'une numérique et l'autre expérimentale pour déterminer cet équivalent paroi sont complémentaires.

Pour la partie numérique, un logiciel de calculs est utilisé. Ce logiciel permet de modéliser des parois de bâtiment comportant des ponts thermiques et d'étudier leur comportement face à différentes caractéristiques de matériaux et à différentes conditions aux limites. La visualisation des champs de température et des flux à l'intérieur des matériaux est aussi possible.

La partie expérimentale consiste à placer le pont thermique recréé à échelle réduite entre deux enceintes climatiques dont l'une est capable d'assurer un régime permanent ou de recréer des conditions variables proches des conditions météorologiques. Les résultats de la campagne de mesure permettent de renforcer la validation des modèles numériques proposés.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION

1.1. QU'EST-CE QU'UN PONT THERMIQUE ?

La Nouvelle Réglementation Thermique 2000 [RT2000] donne la définition suivante : un pont thermique est une partie de l'enveloppe du bâtiment où la résistance thermique, par ailleurs uniforme, est modifiée de façon sensible par la pénétration totale ou partielle de l'enveloppe du bâtiment par des matériaux ayant une conductivité thermique différente comme par exemple les systèmes d'attaches métalliques qui traversent une couche isolante. Plusieurs cas sont possibles. Il peut s'agir :

- de la pénétration totale ou partielle de l'enveloppe du bâtiment par des matériaux ayant une conductivité thermique différente ;
- d'un changement local d'épaisseur des matériaux de la paroi, ce qui revient à changer localement la résistance thermique ;
- d'une différence entre les aires intérieure et extérieure, comme il s'en produit aux liaisons entre parois.

Les ponts thermiques entraînent des déperditions supplémentaires qui peuvent dépasser, pour certains bâtiments, 40 % des déperditions thermiques totales à travers l'enveloppe. D'après la RT 2000, il existe principalement deux types de ponts thermiques :

- Les ponts thermiques linéaires ou 2D qui sont caractérisés par un coefficient linéique « ψ » exprimé en $[W. m^{-1}. K^{-1}]$. C'est le cas, par exemple, de la liaison en partie courante mur extérieur – plancher ou refend ;
- Les ponts thermiques ponctuels ou 3D qui sont caractérisés par un coefficient ponctuel « χ » exprimé en $[W. K^{-1}]$. C'est le cas, par exemple, entre un plancher et deux murs de façade perpendiculaires.

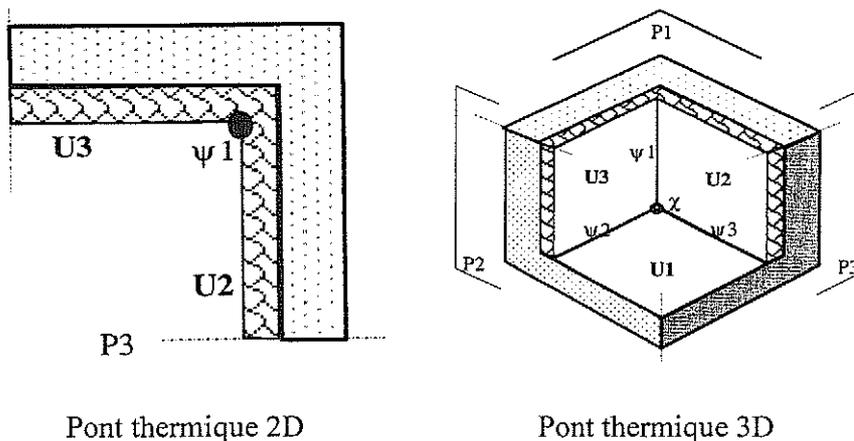


Figure 1.1 : Différents types de ponts thermiques

Dans l'étude qui suit, seuls les principaux ponts thermiques 2D rencontrés dans un bâtiment sont retenus mais trois grands types se différencient:

- les ponts thermiques avec une isolation discontinue : liaison mur-plancher intermédiaire, liaison mur-refend ou liaison mur-plancher haut ;

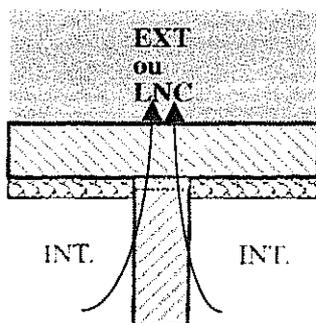


Figure 1.2 :
Liaison mur-refend

- les ponts thermiques avec une isolation continue : angles de murs rentrant ou sortant ;

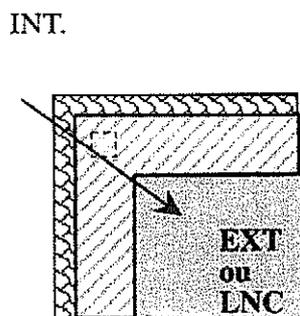


Figure 1.3 :
Liaison angle rentrant

- les ponts thermiques directement en contact avec le sol: liaison périphérique avec un mur et un plancher bas sur terre-plein.

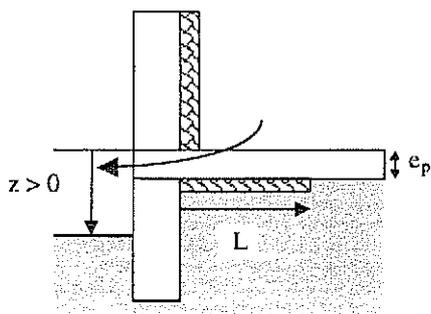


Figure 1.4 :
**Liaison périphérique
en contact avec le sol**

Le calcul d'un pont thermique conformément aux normes européennes nécessite l'utilisation de méthodes de résolution numérique comme les méthodes aux éléments finis ou aux différences finies. Les programmes de calcul doivent être vérifiés conformément à la norme EN ISO 10211-1 [Norme EN ISO 10211-1, 1995] et à la norme 10211-2 [Norme EN ISO 10211-2, 1996].

La RT2000 donne des valeurs par défaut du coefficient « ψ » des liaisons les plus courantes entre deux ou plusieurs parois du bâtiment. Ces valeurs ont été déterminées conformément à la méthode de calcul de la norme européenne. Des exemples de valeurs de « ψ » sont donnés dans le tableau 1.2 suivant.

| Epaisseur plancher | Sans chappe flottante | | | Avec chappe flottante | | |
|--------------------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
| | Ep=15 | Ep=20 | Ep=25 | Ep=15 | Ep=20 | Ep=25 |
| 15 <20 | 0.83 | 0.99 | 1.14 | 0.74 | 0.88 | 0.99 |
| 20 <25 | 0.80 | 0.97 | 1.09 | 0.72 | 0.85 | 0.99 |
| 25 <30 | 0.78 | 0.92 | 1.05 | 0.70 | 0.82 | 0.93 |

Tableau 1.1: Coefficient linéique « ψ » en [W. m⁻¹. K⁻¹] d'une liaison plancher intermédiaire en béton plein sans planelle avec un mur extérieur

1.2. DIMINUTION DES PONTS THERMIQUES : EXEMPLES DE SOLUTIONS

Bien que pour l'instant non obligatoire, le traitement des ponts thermiques représente une priorité, avec une imposition et un renforcement possibles à l'horizon 2005, sous réserve d'une offre industrielle organisée. Un pont thermique peut être traité selon plusieurs principes :

- une barrière thermique judicieusement placée pour intercepter le flux thermique partant de l'intérieur vers l'extérieur à travers le plancher ;
- des chicanes isolantes peuvent rallonger le parcours du flux ;
- des obstacles isolants peuvent être placés de façon à réduire la section de passage du flux.

Il existe des solutions techniques pour diminuer l'importance des ponts thermiques. Certaines sont proposées ci-après. Afin de pouvoir évaluer leurs efficacités, la référence est prise comme la configuration la plus pénalisante en logement: celle à isolation par l'intérieur correspondant au pont thermique non traité de la liaison du plancher intermédiaire.

- Un rupteur de pont thermique est constitué d'un isolant destiné à être posé entre le mur et le plancher dans la continuité de l'isolation des murs. Des armatures métalliques solidaires à l'isolant assurent la transmission des sollicitations mécaniques entre le plancher et le mur. La correction du pont thermique par rapport à la référence est de 60 à 85 % pour une épaisseur d'isolant supérieure ou égale à 8 cms (cf. Fig. 1.5).

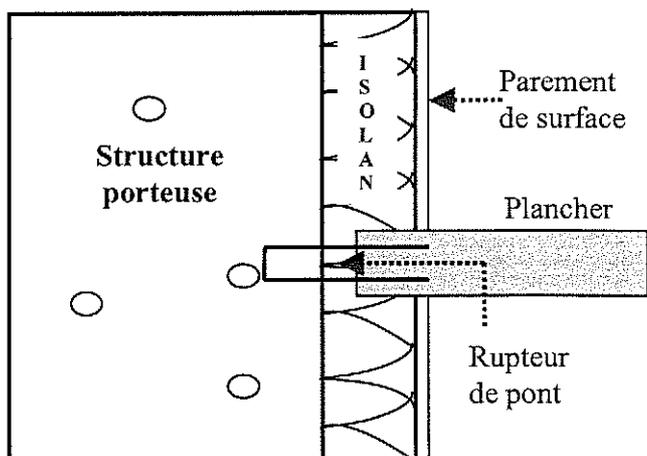


Figure 1.5 :
Le rupteur de pont
thermique

- Le procédé « trait d'union » consiste à insérer lors du coulage du gros oeuvre, un isolant sur le passage des lignes de flux thermique (environ 3 cm d'épaisseur et 30 cm de hauteur), centré en about du plancher et posé à 6 cm de la face extérieure du mur sur le pourtour du plancher (cf. Fig. 1.6). Pour une hauteur d'isolant de 30 cm, la correction du pont thermique par rapport à la référence est de 20 % environ.

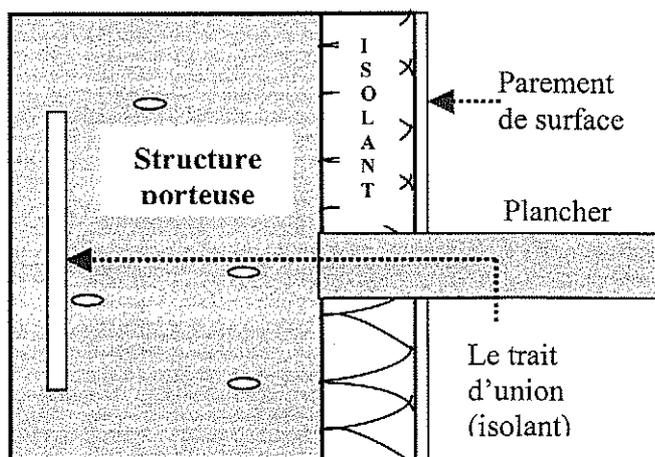


Figure 1.6 :
Le trait d'union

- Le système Bouygues. Ce système de traitement consiste à limiter l'assise du plancher sur le mur de façade à des appuis isolés de 20 à 25 cm de largeur, espacés de 1 à 2,2 m. La correction est de 65 à 70 %, (cf. Fig 1.7).

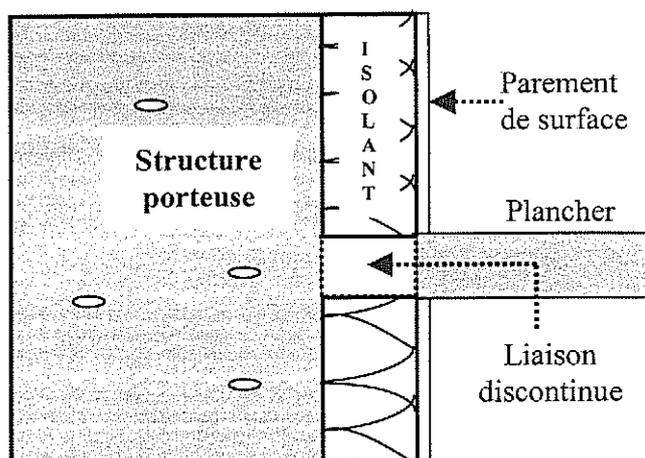


Figure 1.7 :
Le système Bouygues

2. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE

Les publications portant sur le calcul analytique et numérique de différents ponts thermiques reflètent l'intérêt porté par les scientifiques et les industriels pour la prise en compte de ces défauts d'isolation au niveau des logiciels de calcul de consommations énergétiques du bâtiment.

2.1. ETUDES SUR LE CALCUL D'UN PONT THERMIQUE

De nombreux travaux proposent des méthodes de calcul et montrent l'importance accordée aux ponts thermiques et à l'intégration dans un logiciel de simulation de bâtiment. Les premiers travaux sur les ponts thermiques essaient dans un premier temps de mettre en avant l'effort à donner en ce qui concerne l'art de la construction et ensuite la nécessité d'un calcul précis pour la prise en compte de l'effet sur les pertes d'énergie d'un bâtiment. Pouvoir calculer un pont thermique, c'est-à-dire les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur à travers ces défauts d'isolation, de manière précise et rapide est un challenge relevé par plusieurs scientifiques.

Un modèle analytique simplifié basé sur les méthodes intégrales en régime permanent est d'abord avancé par S. Hassid [Hassid, 1989] pour calculer les effets des ponts thermiques avec des murs homogènes. Il considère le cas d'un mur extérieur avec plusieurs liaisons de planchers intermédiaires. A partir de l'équation de la chaleur en deux dimensions appliquée à la conduction en régime permanent (cf. eq. 1.1) il décrit un modèle simplifié dont les résultats sont vérifiés par un calcul numérique aux différences finies.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{eq. 1.1})$$

Ces travaux sont généralisés un an plus tard aux murs multicouches en reprenant la même méthode [Hassid, 1990]. Cette fois-ci la conductivité thermique est prise variable selon la couche de matériau considérée, (cf. eq. 1.2) L'application de cette méthode reste cependant destinée au calcul des liaisons entre un mur extérieur et un plancher intermédiaire en régime permanent.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{eq. 1.2})$$

Dans son article, G. Mao [Mao et al., 1997] propose un modèle dynamique multidimensionnel (2D ou 3D) pour des géométries simples pour prédire les échanges thermiques à travers un pont thermique en utilisant une méthode fréquentielle. Le pont thermique est maillé et les températures aux noeuds sont exprimées sous la forme d'un nombre complexe caractérisé par une amplitude et une phase. En considérant le bilan d'énergie aux noeuds, la partie réelle et la partie imaginaire de ces nombres complexes sont calculées simultanément. Ce modèle a été testé sur un mur léger à profilés métalliques, sur une liaison mur-plancher intermédiaire et sur une fondation de mur couplée avec le sol. La méthode proposée dans cet article permet donc une description approfondie des échanges dynamiques d'un pont thermique, ce qui peut être utile pour l'analyse de mesures ou pour créer un logiciel de calcul exécutable dans les codes de simulations des bâtiments. Certains scientifiques ont essayé de mettre en évidence les différences existantes entre un calcul bidimensionnel précis d'un pont thermique avec un logiciel spécifique de transfert de chaleur et la prise en compte approximative des ponts thermiques dans un logiciel de simulation d'évaluation des performances énergétiques d'un bâtiment. Ainsi une publication réalisée par F. Deque [Deque et al., 2001] décrit deux types d'outils numériques pour évaluer les pertes de chaleur liées aux ponts thermiques. La première catégorie concerne les logiciels d'évaluation des performances énergétiques d'un bâtiment: TRNSYS, SPARK, IDA ou CLIM2000. Le calcul des ponts thermiques est très souvent approximatif dans ces programmes. Le deuxième type d'outil numérique correspond à des codes spécifiques de calcul de transfert de chaleur à travers les murs (THERM 2.0, TB3D/FMD ou Sisley). Ces outils ne permettent pas l'évaluation des effets des ponts thermiques dans la performance énergétique du bâtiment. Dans cet article, les auteurs comparent le logiciel Sisley qui modélise le transfert de chaleur bi-dimensionnel en régime dynamique et utilise les volumes finis avec le logiciel de simulation de bâtiment CLIM2000 avec prise en compte des ponts thermiques via une approche type régime permanent. Avec des géométries simples (structures en forme de « T » ou de « L »), les résultats des pertes d'énergie à travers les ponts thermiques sont améliorés de 5 à 7 % avec le logiciel 2D. La différence entre les résultats des deux logiciels augmente avec la complexité des structures. La prise en compte dans les codes du comportement thermo-aéraulique des bâtiments exige donc un traitement adapté aux composants 2D et 3D comme les ponts thermiques.

La communication de JJ. Roux, [Roux et al., 2004] expose des solutions envisagées pour apporter une solution numérique acceptable dans ce cadre bien précis. Les modèles dynamiques sont basés sur la réduction du modèle d'état représentant les transferts de chaleur. La première approche consiste à décrire le bâtiment comme la juxtaposition d'éléments 1D, 2D voire 3D. L'autre approche consiste à décomposer le bâtiment en éléments monodimensionnels qui correspondent aux parois courantes et à prendre en compte les ponts thermiques (2D ou 3D) grâce à un surplus de flux. Cette méthode se rapproche le plus de nos travaux dans son but, l'intérêt principal résidant dans le fait que la description monodimensionnelle traditionnellement utilisée dans la plupart des codes de simulation des bâtiments reste conservée.

2.2. EXEMPLES PARTICULIERS

Certains articles s'intéressent plus particulièrement à un seul type de ponts thermiques: les angles de murs, le couplage avec le sol ou encore les fenêtres par exemple.

2.2.1. LES ANGLES DES MURS

- Un modèle numérique à deux dimensions aux éléments finis a été proposé par B.L Sarkis [Sarkis et al., 1987] pour calculer les flux de chaleur et la distribution des températures des angles de murs isolés en régime permanent. Plusieurs cas ont été testés et mettent en évidence les effets de la position, de l'épaisseur et de la conductivité thermique de la couche d'isolant.
- Le risque de condensation côté intérieur est un autre effet néfaste souvent négligé. Au niveau des ponts thermiques comme les angles de murs, des abaissements de température sont souvent enregistrés. La prédiction de la distribution des températures de surface à l'intérieur est une solution au problème de condensation. T. Mingfang [Mingfang et al., 1997] propose dans un article une méthode analytique simple pour un angle de murs homogènes en régime permanent. Le modèle analytique obtenu est basé sur une comparaison entre les isothermes dans un angle et ceux dans un cylindre. Les isothermes dans l'angle des murs sont assimilés à des arcs de cercle et les isothermes éloignés de l'angle sont des lignes parallèles. Des résultats provenant d'un code numérique permettent de vérifier le modèle analytique.
- D. Tang [Tang et al., 1998] a fait l'étude analytique de la distribution des températures et des flux d'un angle homogène de bâtiment en deux dimensions. En utilisant la méthode alternative de Schwarz, un modèle analytique en régime permanent est présenté et même confirmé par une étude numérique complémentaire. L'article décrit aussi deux concepts intéressants : la « longueur significative » qui représente la longueur au bout de laquelle le flux parallèle au mur devient négligeable et le « U équivalent » qui est le coefficient de transmission de la paroi relatif à la longueur significative.

2.2.2. LES PONTS THERMIQUES EN CONTACT AVEC LE SOL

Durant la période de chauffage, l'énergie consommée permet de maintenir la température intérieure désirée. Les déperditions de chaleur à travers des surfaces en contact avec le sol peuvent être responsables jusqu'à 50 % de l'énergie consommée pour maintenir une température intérieure désirée.

La norme EN ISO 13370 [Norme EN ISO 13370, 1999] donne des conseils de calcul pour les transferts de chaleur par le sol ainsi que la prise en compte des ponts thermiques aux jonctions mur-plancher. C'est pourquoi de nombreuses études ont été menées sur le sujet de couplage entre le bâtiment et le sol.

- En 1999, S.W. Rees [Rees et al., 1999] publie un article qui propose un bilan sur toutes les connaissances existantes sur le transfert de chaleur dans le sol et l'effet sur les performances thermiques sur une structure en contact avec le sol. Les procédés

fondamentaux de transfert de chaleur dans les sols sont décrits ainsi que des méthodes pour déterminer les propriétés thermiques du sol, paramètres difficiles à estimer. En effet, la conductivité thermique d'un sol est fonction, entre autre, de l'humidité et de la profondeur. Les auteurs regroupent aussi dans cet article de nombreuses méthodes analytiques, semi-analytiques et numériques pour résoudre de tels problèmes liés au couplage avec le sol. Ils citent enfin et comparent le traitement du problème de plusieurs guides internationaux tel que celui de "American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers" (ASHRAE), de "Chartered Institution of Building Services Engineers" (CIBSE) ou de l'Association des Ingénieurs de Climatation et de Ventilation de France" (AICVF).

- Un article publié par M.H. Adjali [Adjali et al., 2000] expose la comparaison entre un code de calcul 3D et des résultats expérimentaux concernant le flux de chaleur à travers une dalle sur terre-plein. La dalle expérimentée se trouve dans un bâtiment construit dans le cadre d'un programme d'étude concernant l'économie d'énergie. Les mesures faites concernent la température de l'air et du sol, la consommation d'énergie du bâtiment et l'humidité du sol. Les calculs numériques ont été effectués à partir d'un code multidimensionnel ajouté au logiciel de simulation des bâtiments APACHE qui ne prend pas en compte la non-homogénéité des sols due à l'humidité. Les températures du sol mesurées et calculées présentent de légères différences pouvant provenir du calcul de la conductivité du sol et de la détermination de l'énergie fournie au sol, le chauffage se faisant par des conduites d'eau intégrée dans la dalle.

2.3. CONCLUSION

Les différentes études menées sur le calcul des ponts thermiques montrent bien que les ponts thermiques jouent un rôle prépondérant dans les pertes d'énergie des bâtiments actuels. Le calcul d'un pont thermique 2D ou 3D ne pose plus de problème. L'enjeu réside dans la prise en compte de ces ponts thermiques dans les logiciels déjà existants de simulation des bâtiments. Seuls J.J. Roux, F. Coydon et Y. Gao prennent en compte cette difficulté supplémentaire dans leur dernière publication [Roux et al., 2004].

Dans cette optique, nous allons tout d'abord chercher à modéliser et à valider un outil de simulation bi-dimensionnel de ponts thermiques, puis nous allons introduire une nouvelle notion : « l'équivalent paroi » qui permettra la prise en compte directe des ponts thermiques dans les simulateurs de bâtiments déjà existants sans les modifier.

VALIDATION DU MODELE DE SIMULATION

Il existe différentes possibilités de valider un modèle de simulation. Dans cette étude nous en proposons deux. La première correspond à une validation menée en régime permanent par rapport à des valeurs tirées de la littérature. La seconde est réalisée en régime transitoire à l'aide de mesures qui ont été obtenues à partir d'une manipulation expérimentale.

1. VALIDATION DU MODELE EN REGIME PERMANENT

1.1 CHOIX DE LA METHODE

Le calcul de la valeur du pont thermique déterminé avec le logiciel de simulation bi-dimensionnel FEHT [FEHT, 2004] s'effectue en deux étapes à l'aide de la relation suivante, (cf. Fig. 2.1).

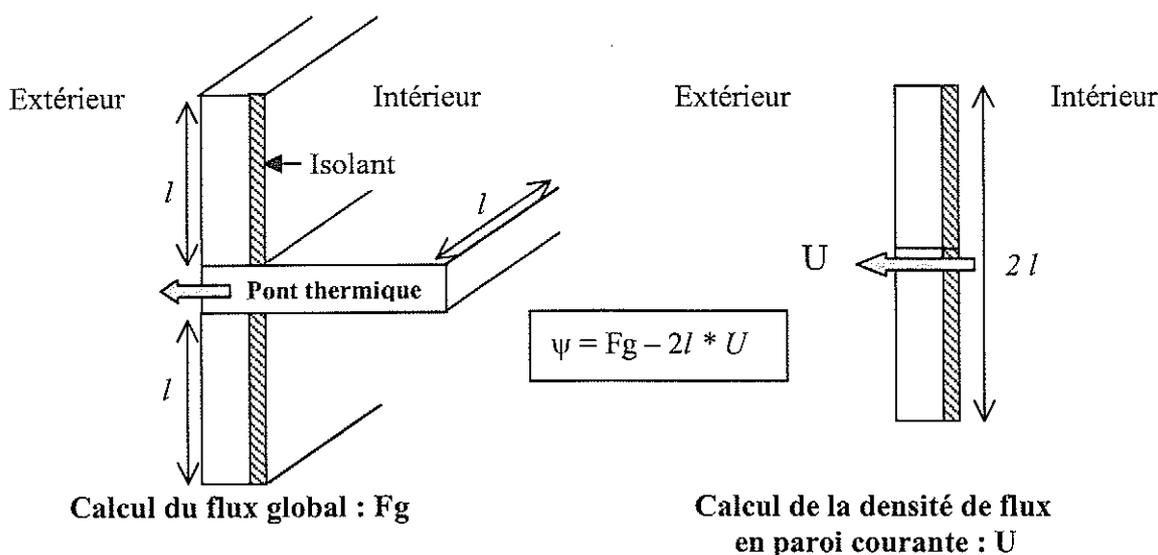


Figure 2.1 : Illustration de la méthode de calcul

Avec :

- Etape 1 : Calcul du flux global perdu « Fg » par la paroi complète avec son pont thermique ;
- Etape 2 : Calcul du terme « U » qui est la densité de flux perdue par la partie courante de la paroi de part et d'autre du pont thermique.

1.2 PONTS THERMIQUES VALIDES

Cette validation a été effectuée pour deux types de ponts thermiques, (cf. Tab. 2.1 et 2.2).

| | |
|--|-------|
| Flux Global = Fg | 1.860 |
| Flux paroi = U | 0.788 |
| ψ calculé $\psi = Fg - 2l * U$ | 1.07 |
| ψ RT2000 | 0.99 |

Tableau 2.1 : Cas de la liaison mur - plancher

| | $\lambda_{\text{béton}} = 2.5 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | | | $\lambda_{\text{béton}} = 1.5 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| | R_{isolant} [m ² .K.W ⁻¹] | R_{isolant} [m ² .K.W ⁻¹] | R_{isolant} [m ² .K.W ⁻¹] | R_{isolant} [m ² .K.W ⁻¹] | R_{isolant} [m ² .K.W ⁻¹] | R_{isolant} [m ² .K.W ⁻¹] |
| | 2 | 2.5 | 3 | 2 | 2.5 | 3 |
| Flux Global = Fg | 1.071 | 0.881 | 0.745 | 1.041 | 0.859 | 0.731 |
| Flux paroi = U | 0.889 | 0.727 | 0.615 | 0.868 | 0.713 | 0.605 |
| ψ calculé ($\psi = Fg - 2l * U$) | 0.182 | 0.154 | 0.130 | 0.173 | 0.146 | 0.126 |
| ψ RT2000 | 0.21 | 0.17 | 0.15 | 0.21 | 0.17 | 0.15 |

Tableau 2.2 : Cas de l'angle rentrant

De plus, nous avons tenu compte dans le cas de l'angle rentrant de plusieurs valeurs d'isolation (ici résistance thermique) fournies par la RT2000 et aussi de deux valeurs du coefficient de conductibilité thermique du mur en béton.

Pour valider la méthode utilisée, nous avons comparé les valeurs des coefficients thermiques linéiques donnés dans la RT2000 avec celles obtenues par le logiciel en régime permanent. On pourra constater sur les tableaux 2.1 et 2.2 que la valeur du pont thermique déterminée par le calcul diffère peu de la valeur proposée par la RT2000. Ceci constitue donc une première validation du modèle de simulation.

2. VALIDATION DU MODELE EN REGIME TRANSITOIRE

2.1 DESCRIPTION DU PONT THERMIQUE ETUDIE

L'approche expérimentale est un des moyens de valider le modèle numérique [Spagnol, 2004]. Pour cela, nous avons choisi de recréer une liaison refend-mur extérieur, pont thermique habituellement rencontré dans tous les bâtiments, et d'étudier le transfert de chaleur à travers cette liaison.

Plusieurs étapes sont nécessaires à la préparation de la manipulation. Il s'agit tout d'abord de confectionner l'éprouvette en question, puis d'en déduire ses propriétés thermiques réelles à prendre en compte dans les calculs, à savoir la conductivité thermique et la masse volumique. Les différentes étapes de ce travail sont décrites en détail en annexe 1. Nous rappelons seulement ci-après les principales caractéristiques du pont thermique étudié

- **Dimensions du pont thermique**

En ce qui concerne l'éprouvette instrumentée en forme de "T", nous avons choisi de diviser les dimensions réelles d'un pont thermique par 4 pour pouvoir manipuler facilement l'éprouvette et pour pouvoir la placer dans le dispositif expérimental existant, (cf. Fig. 2.2).

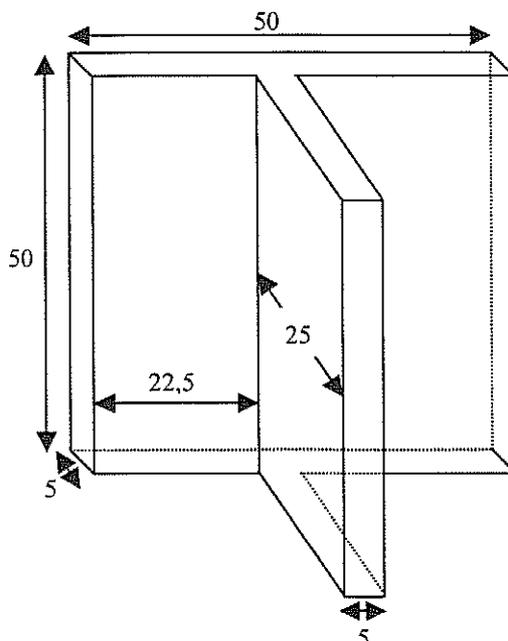


Figure 2.2 : Dimensions en [cm] de l'éprouvette représentant une liaison mur extérieur - refend

La base de l'éprouvette représentant le mur extérieur a pour dimensions 50 * 50* 5 (en cm), sur laquelle est placé un autre parallélépipède reproduisant le refend qui a pour dimensions 50 * 25 * 5. Vient ensuite s'ajouter 2 cm d'isolant sur le mur côté intérieur (au lieu de 8 cm pour un mur réel).

- **Caractéristiques thermophysiques des matériaux utilisés pour la confection du pont thermique**

Il s'agit d'un mortier normalisé dont les caractéristiques thermophysiques sont indiquées dans le tableau 2.3.

| Mortier normalisé | |
|--|------|
| Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] | 1.49 |
| Chaleur massique [$\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] | 1000 |
| Masse volumique [kg. m^{-3}] | 2585 |

Tableau 2.3 : Caractéristiques thermophysiques du mortier normalisé

L'isolant est du polystyrène expansé dont les caractéristiques thermophysiques sont celles proposées dans le certificat ACERMI (cf. tableau 2.4).

| Polystyrène expansé | |
|--|-------|
| Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$] | 0.035 |
| Chaleur massique [$\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$] | 1450 |
| Masse volumique [kg. m^{-3}] | 33 |

Tableau 2.4 : Caractéristiques thermophysiques de l'isolant

2.2 DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental de notre étude a déjà été utilisé lors de la thèse de B. Lacarrière [Lacarrière ; 2003] pour déterminer la résistance thermique d'une brique monomur d'une part et pour valider de manière expérimentale des modèles de représentation de la brique d'autre part.

La manipulation est constituée de deux enceintes climatiques séparées par un mur isolant dans lequel le pont thermique à étudier vient s'imbriquer, (cf. Fig. 2.3).

L'enceinte chaude est équipée de résistances chauffantes et de trois ventilateurs (d'un débit total de $7200 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ destinés à homogénéiser la température d'air. Elle est de plus équipée d'un groupe frigorifique lui permettant de réguler des températures légèrement inférieures à la température ambiante. On peut couvrir une plage allant de $+10$ à $+40$ °C.

L'enceinte froide, est-elle aussi, équipée de ventilateurs et d'un groupe froid plus puissant. La résistance est, quant à elle, plus faible puisque son rôle n'est pas de créer une ambiance chaude mais d'assurer le dégivrage de l'évaporateur si on travaille en températures négatives. On peut ainsi obtenir une température d'ambiance comprise entre -30 et $+25$ °C. La régulation côté chaud se fait grâce à une commande des résistances chauffantes et se limite à imposer une température de consigne. La régulation de l'enceinte froide se fait par commandes d'électrovannes permettant ainsi de faire varier le débit de fluide réfrigérant dans le compresseur du groupe frigorifique. Elle permet une température stable à ± 0.5 °C de part et d'autre de la valeur de la consigne.

L'enceinte chaude représente le côté intérieur d'un bâtiment et on y impose une température constante. L'enceinte froide sera le côté extérieur et on pourra recréer une alternance "jour-nuit" avec un signal de température extérieure variable au cours de la journée.

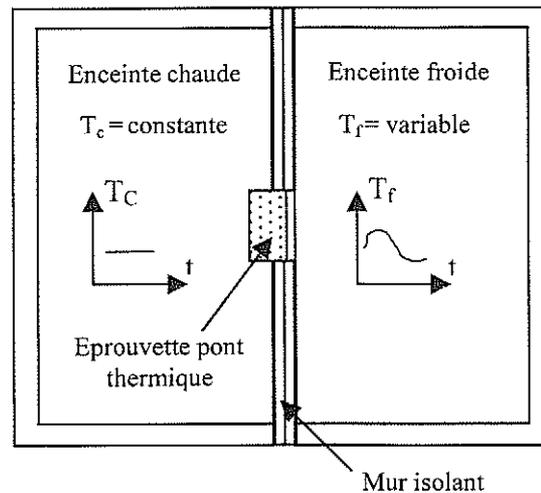


Figure 2.3 : Conditions aux limites du dispositif expérimental

- **Sollicitations étudiées**

Deux types de sollicitations sont envisagés. La première correspond à une brutale chute de température dans l'enceinte froide (marche descendante) après une mise à l'équilibre isotherme des deux enceintes et du pont thermique. La seconde est une variation sinusoïdale de la température dans l'enceinte froide pour recréer une alternance "jour-nuit".

- Premier signal : Marche descendante

On maintient les deux enceintes à une température de consigne de 22 °C. Lorsque le pont thermique est isotherme, la consigne de l'enceinte froide est descendue à 12 °C. L'acquisition des températures est faite toutes les minutes pour tous les thermocouples.

- Deuxième signal : Sinusoïde

L'évolution de la température dans la chambre froide correspond à une condition aux limites de type sinusoïdale alors que la température du côté chaud reste constante et égale à 14 °C. Le signal programmé dans l'enceinte froide a pour équation:

$$T = T_{moyenne} + T_{1/2\text{ amplitude}} \times \text{Sin}(\omega t)$$

Où : $T_{moyenne} = 14 \text{ °C}$;

$T_{1/2\text{ amplitude}} = 5 \text{ °C}$;

$\omega = 2\pi / \Gamma$ (avec Γ = période de 3 heures).

2.3 ANALYSE DES RESULTATS

Les deux sollicitations étudiées et présentées dans le chapitre précédent vont permettre d'analyser le comportement thermique du pont thermique pour valider le modèle. Les graphes présentés dans les parties suivantes représentent l'évolution des températures pour différents thermocouples en fonction du temps. La figure 2.4 permet de situer les thermocouples dans l'éprouvette.

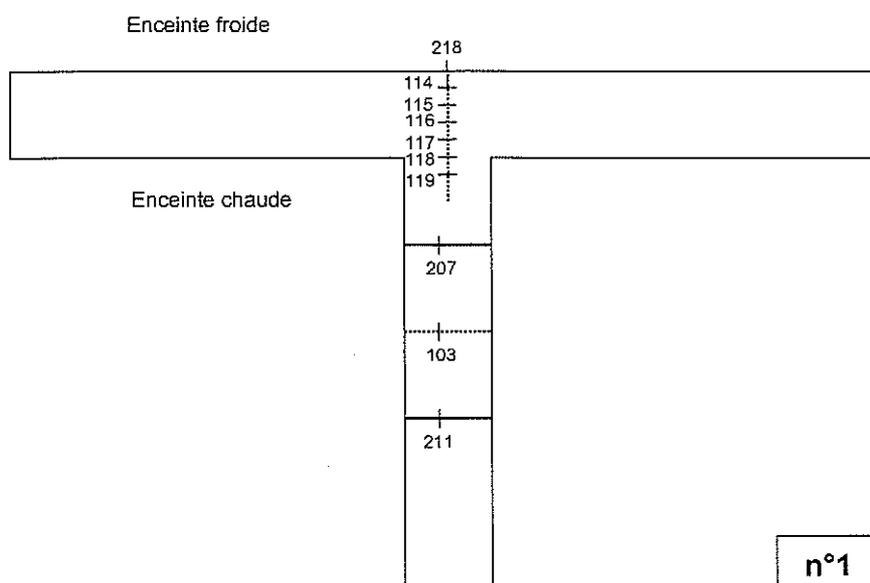


Figure 2.4 : Emplacement des thermocouples pour l'exploitation des résultats expérimentaux

3.3.1 Premier signal : Marche descendante

La figure 2.5 présente les évolutions expérimentale et numérique de la température au cours du temps du thermocouple n°218 (cf. Fig. 2.4 – schéma n°1) situé en surface du mortier du côté de l'enceinte froide. On a également porté sur cette figure le profil théorique de la marche descendante.

On constate tout d'abord sur cette figure la difficulté de reproduire le profil de la marche théorique descendante. Ensuite on peut remarquer que l'évolution de température théorique présente un profil légèrement différent de celui de l'évolution expérimentale. Cependant, compte tenu de l'erreur expérimentale ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) affectée aux mesures de températures, l'évolution théorique déterminée dans le temps par le modèle s'insère dans la courbe enveloppe d'évolution de température expérimentale. Ceci renforce la validation du modèle déjà entreprise lors de l'étude en régime permanent.

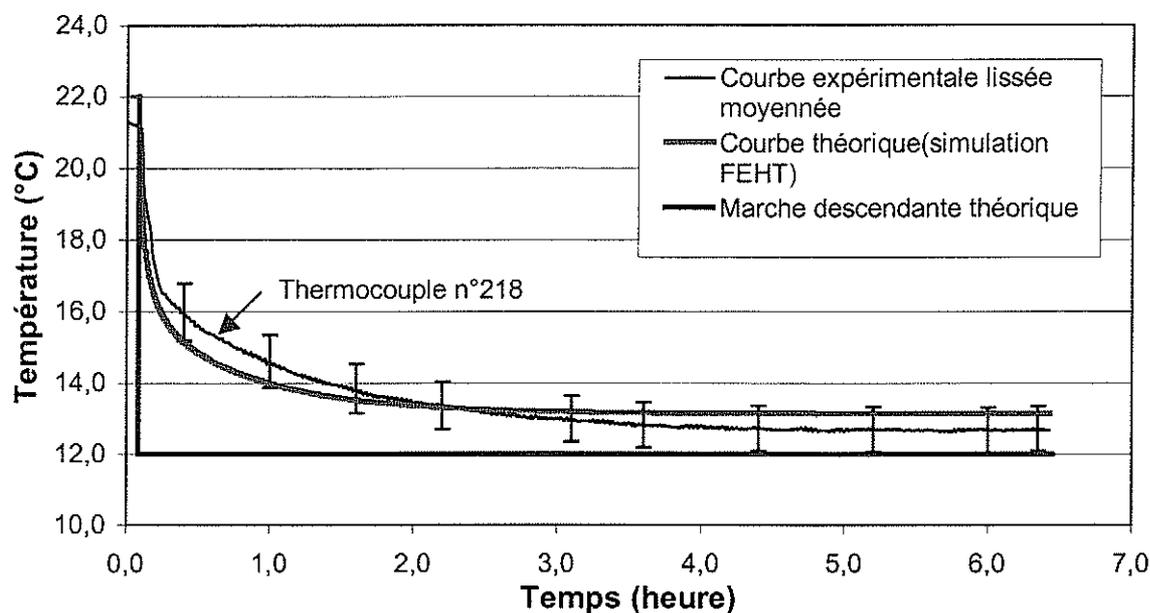


Figure 2.5 : Validation du modèle en température de surface, thermocouple n°218 (cf. figure 2.4 – schéma n°1)

Remarques

- Pour les besoins de l'étude numérique de l'éprouvette, nous avons déterminé les résistances superficielles. Celles-ci sont plus faibles que les valeurs moyennes données par la RT2000 (cf. Tab. 3.3 - Chapitre 3) Elles ont été estimées à partir de l'équilibre dynamique obtenu expérimentalement et elles sont égales à $0.013 \text{ [m}^2 \cdot \text{°C} \cdot \text{W}^{-1}]$ des deux côtés de l'enceinte (même ventilation des deux côtés).
- La courbe d'évolution expérimentale du thermocouple n°218 est une courbe lissée ceci afin d'éviter les fluctuations de températures dues à la régulation en température de l'enceinte froide.

3.3.2 Deuxième signal : sinusoïde

Sur la figure 2.6, nous avons porté les évolutions de températures expérimentale et théorique des thermocouples n°115 et 119 (cf. figure 2.4 - schéma n°1) noyés dans le béton.

Comme ces thermocouples sont situés au droit du pont thermique à des profondeurs différentes de la surface coté froid, il faut s'attendre à une atténuation du signal en fonction de la profondeur. C'est ce que l'on peut observer au niveau du thermocouple n°119 si l'on compare son amplitude de variation par rapport à celle du thermocouple n°115 situé plus près de la surface coté froid. En ce qui concerne les amplitudes de variation de températures expérimentale et théorique elles sont différentes pour les deux thermocouples. Ce phénomène est cependant plus

accentué pour le thermocouple n°115 situé près de la surface ce qui amène par moments des écarts de température théoriques et expérimentale de plus de 1 °C.

Par contre, on n'observe pratiquement pas de déphasage entre les sinusoïdes expérimentales et théoriques.

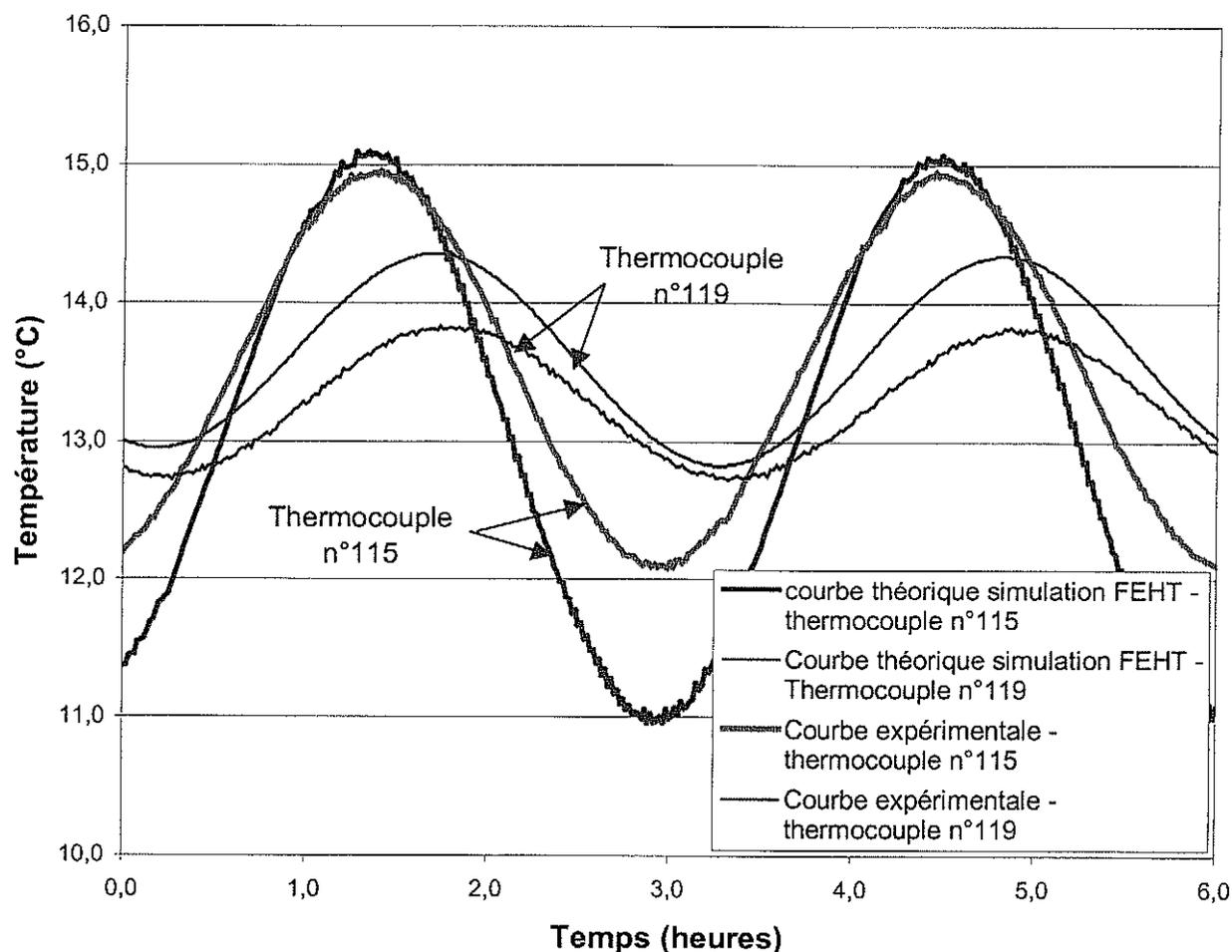


Figure 2.6 : Evolutions expérimentale et théorique des températures de deux thermocouples situés au droit de la liaison refend-mur extérieur (cf. Fig. 2.4 – schéma n°1)

2.4 CONCLUSION

Dans cette partie, deux types de validation (régime permanent et régime transitoire) ont été effectués afin d'évaluer la pertinence du modèle utilisé.

Elles ont conduit toutes les deux à démontrer que le modèle peut être utilisé pour des études plus complètes et variées comme celles que nous allons présenter dans les chapitres suivants.

CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DE PONTS THERMIQUES

1. PREAMBULE

Les premiers résultats sur l'équivalent paroi d'un pont thermique ont été obtenus dans le cadre d'un projet tutoré mené par des élèves du département de Génie civil de l'INSA de Toulouse. Ce projet tutoré avait pour but de mettre en place un outil de simulation pour modéliser des ponts thermiques choisis dans la RT2000. Il a aussi donné naissance à deux communications de J.C. Fourès [Fourès et al., 2004] et de S. Spagnol [Spagnol et al., 2004].

Au cours de cette étude nous allons nous intéresser à trois types de ponts thermiques couramment rencontrés dans les bâtiments et choisis dans le document RT2000. Nous avons vu dans la partie précédente (cf. § 1.1 – Chapitre 1) que ces ponts thermiques peuvent être classés en trois grandes familles. Le tableau 3.1 récapitule les ponts thermiques étudiés avec leurs classes respectives.

| Type de Pont thermique | | |
|---|---|---|
| Isolation discontinue | Isolation Continue | Contact avec le sol |
| <ul style="list-style-type: none"> • Liaison Plancher intermédiaire – mur extérieur ; • Liaison refend - mur extérieur ; • Liaison plancher haut – mur extérieur (acrotère) • Liaison balcon-mur extérieur. | <ul style="list-style-type: none"> • Angle rentrant de 2 murs donnant sur l'extérieur. | <ul style="list-style-type: none"> • Plancher sur terre-plein avec isolation intérieure. |

Tableau 3.1 : Classification des ponts thermiques étudiés

Ces ponts thermiques sont modélisés à partir du logiciel FEHT. La phase de modélisation comprend la création du croquis, le choix des matériaux, le choix du maillage et la détermination de conditions aux limites et de conditions initiales.

2. CREATION DE FICHIERS DE DONNEES

Le calcul des consommations énergétiques des ponts thermiques en régime transitoire nécessite la création de fichier de données réalistes. Il faut en effet pouvoir imposer des conditions aux limites représentatives des variations des ambiances intérieure et extérieure qui délimitent les ponts thermiques.

2.1 DONNEES METEOROLOGIQUES

En relation avec le Bureau d'Etudes «TEP 2E¹» nous avons choisi différents sites météorologiques qui appartiennent aux zones climatiques H1, H2 et H3.

- Pour la zone H1 il s'agit des fichiers météorologiques de Limoges et Trappes ;
- Pour la zone H2 il s'agit du fichier météorologique d'Agen ;
- Pour la zone H3 il s'agit des fichiers météorologiques de Carpentras et de Perpignan.

Ces fichiers contiennent des valeurs météorologiques brutes qui sont issues de mesures effectuées toutes les heures par des stations météorologiques. Il s'agit pour les principales :

- de la température ambiante extérieure en [°C] ;
- de flux solaires qui sont le flux global horizontal (GH), le flux diffus horizontal (DH), et le flux solaire direct horizontal (DIRH) exprimés en [W. m⁻²] ;
- de la vitesse du vent en [m. s⁻¹].

Afin de pouvoir comparer ces différents sites climatiques entre eux, nous avons porté dans le tableau 3.2 la valeur de leurs degrés jours ainsi que l'ensoleillement moyen journalier pour la période de chauffage considérée [1^{er} octobre – 20 mai].

| Zone Climatique Site Météorologique | Zone H1 | | Zone H2 | Zone H3 | |
|--|---------|---------|---------|------------|-----------|
| | Limoges | Trappes | Agen | Carpentras | Perpignan |
| Degrés jours base 19 | 3236 | 3324 | 2632 | 2414 | 1808 |
| Flux global journalier horizontal [W.m ⁻²] | 3173 | 2942 | 3358 | 4412 | 3951 |

Tableau 3.2 : Sites choisis dans les différents zones climatiques

Remarque

A partir de certaines de ces données il est possible de calculer les flux incidents sur les diverses parois verticales orientées à l'est, au sud, à l'ouest et au nord d'un habitat, (cf. annexe 2).

2.2 AUTRES DONNEES

Il s'agit principalement de conditions aux limites dont la plupart ont été prises constantes au cours de la simulation.

- Nous avons adopté des valeurs de résistances thermiques globales superficielles intérieure et extérieure constantes. Ces valeurs sont tirées de la RT2000 et pour les ponts thermiques que nous avons calculés, elles sont données dans le tableau 3.3.

¹ Bureau d'études TEP 2E – Z.I. Avon, 340 avenue des Chasséens – 13320 Gardanne.

| Résistances thermiques Superficielles [m ² .K. W ⁻¹] | Intérieure | | Extérieure | |
|---|------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | Flux vertical = 0.13 | Flux horizontal = 0.10 | Flux vertical = 0.04 |

Tableau 3.3 : Valeurs des résistances thermiques superficielles prises pour la simulation

- Nous avons également considéré que les coefficients d'absorption des flux solaires incidents sur les différentes parois verticales étaient constants au cours la simulation. Comme les ponts thermiques que nous avons choisis correspondent à des cas où l'isolation est intérieure, nous avons retenu pour toutes nos simulations un coefficient d'absorption du flux solaire correspondant à celui d'un mur en béton de couleur crème proposée dans le document de Pouvreau [Pouvreau et al., 2002]. Cette valeur a été prise égale à 0.5.

2.3. CONDITIONS DE SIMULATION

Elles correspondent surtout à des conditions de simulation numérique. Nous développons ci-après les principales.

- Afin d'éviter les instabilités numériques nous avons adopté pour toutes nos simulations un pas de temps de calcul maximal égal à un cinquième d'heure.
- Le nombre d'heures de simulation est de 5568 heures pour la période de chauffage considérée auxquelles on ajoute X heures pour le passé thermique (PT).
- Le calcul des différents ponts thermiques a été réalisé en considérant des conditions de dimension particulières pour les croquis et des conditions aux limites qui sont définies et proposées dans les normes NF [Norme NF EN ISO 10211-1, 1995] et [Norme NF EN ISO 10211-2, 1995].
- Le démarrage de la simulation nécessite de connaître les conditions initiales de celle-ci. Pour cela, nous avons procédé en déterminant le temps d'établissement du régime permanent pour chaque pont thermique étudié. La méthode consiste à réaliser une variation de température marche ascendante (ou descendante) intérieure (ou extérieure) puis à déterminer le temps au bout duquel nous obtenons 99% de la réponse en régime permanent. Rappelons que ce temps de réponse est, dans le cas d'un système du premier ordre, égal à 4,6 fois la valeur de la constante de temps « τ » [Rogez et al., 1992]. Nous avons finalement conservé pour la simulation une valeur de passé thermique correspondant à un nombre de jours immédiatement supérieur à la valeur du temps correspondant, (cf. Fig. 3.1).

Les résultats de cette étude sont portés sur les figures 3.2, 3.3 et 3.4 pour les trois ponts thermiques étudiés. Comme on pouvait s'y attendre les temps d'établissement du régime permanent sont très différents. Ils sont faibles pour les deux ponts thermiques qui ne sont pas en contact avec le sol : liaisons plancher – mur extérieur et angle rentrant.

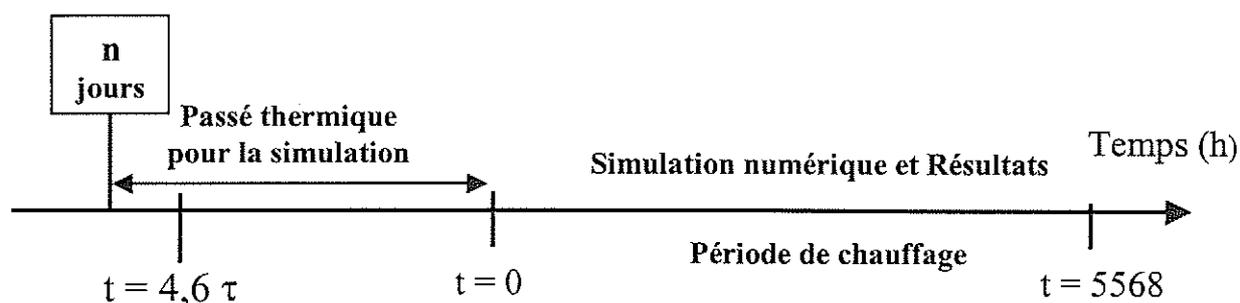


Figure 3.1 : Passé thermique retenu

Par contre, il est bien plus élevé pour le pont thermique en contact avec le sol, (cf. Fig 3.4). En fait au bout de 6000 heures, ce qui représente environ les trois quarts d'une année on n'a encore pas atteint un régime d'évolution de température stable. Compte tenu des incertitudes sur la nature du sol et sur les valeurs de ses propriétés thermophysiques, nous avons décidé de nous en tenir à une erreur relative de 5 % sur l'obtention de ce régime, (cf. figure 3.5). Ceci nous a amené à retenir une valeur de passé thermique légèrement supérieure à cette erreur et égale à de 3000 heures.

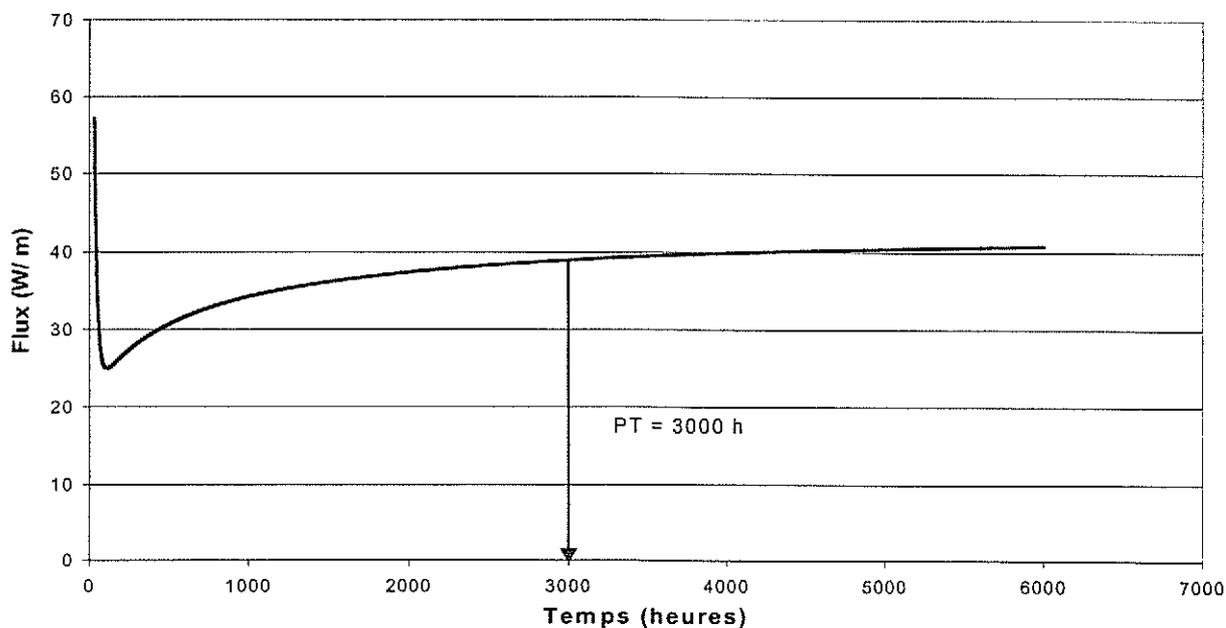


Figure 3.2 : Passé thermique pour la simulation liaison plancher- mur extérieur

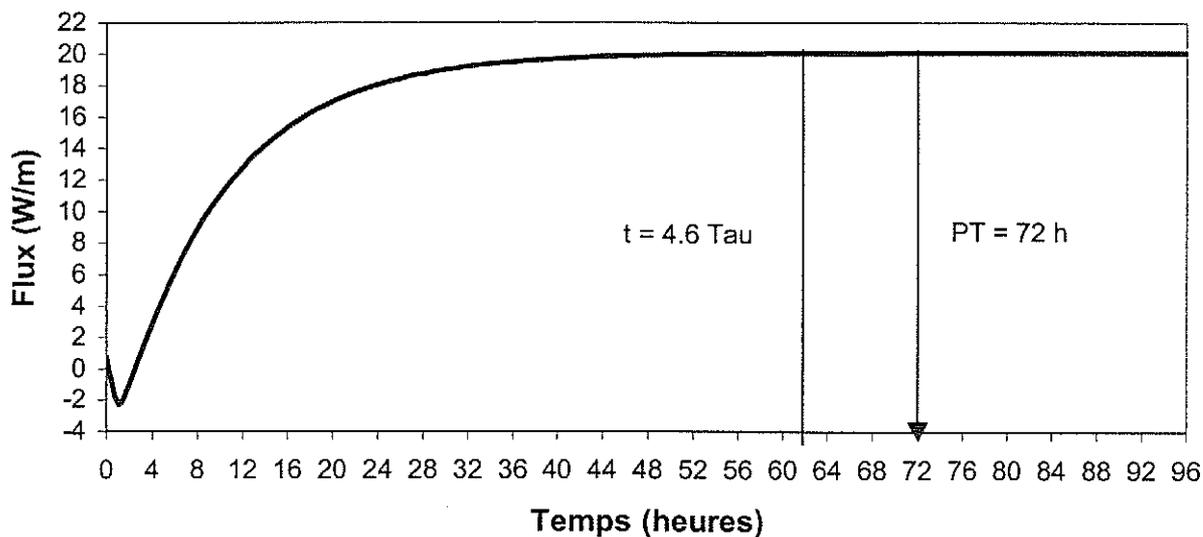


Figure 3.3 : Passé thermique (PT) pour la liaison angle rentrant

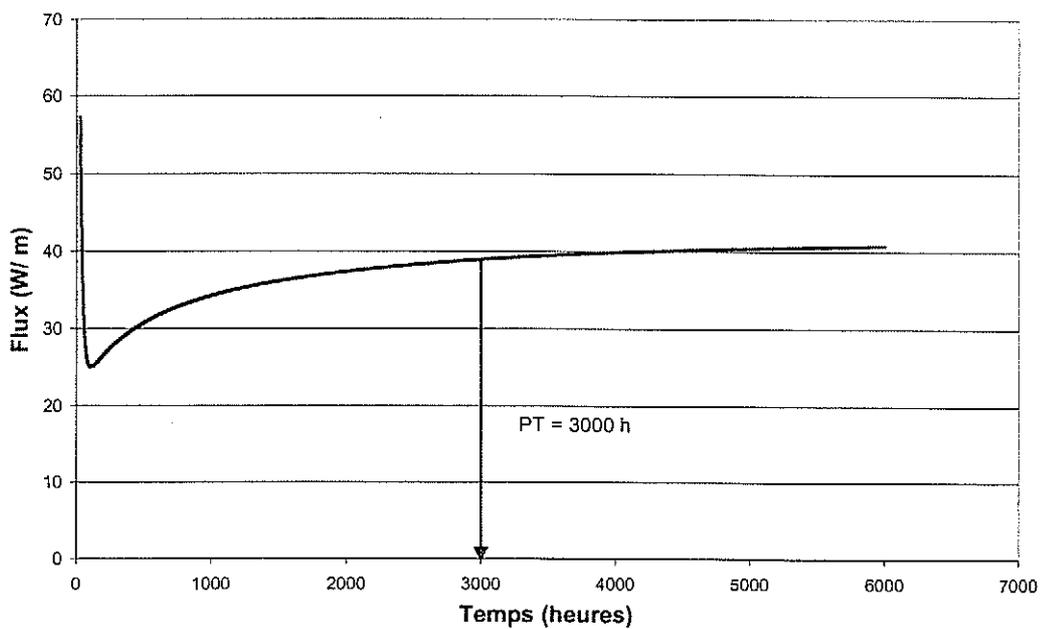


Figure 3.4 : Passé thermique (PT) pour la simulation d'un pont thermique en contact avec le sol

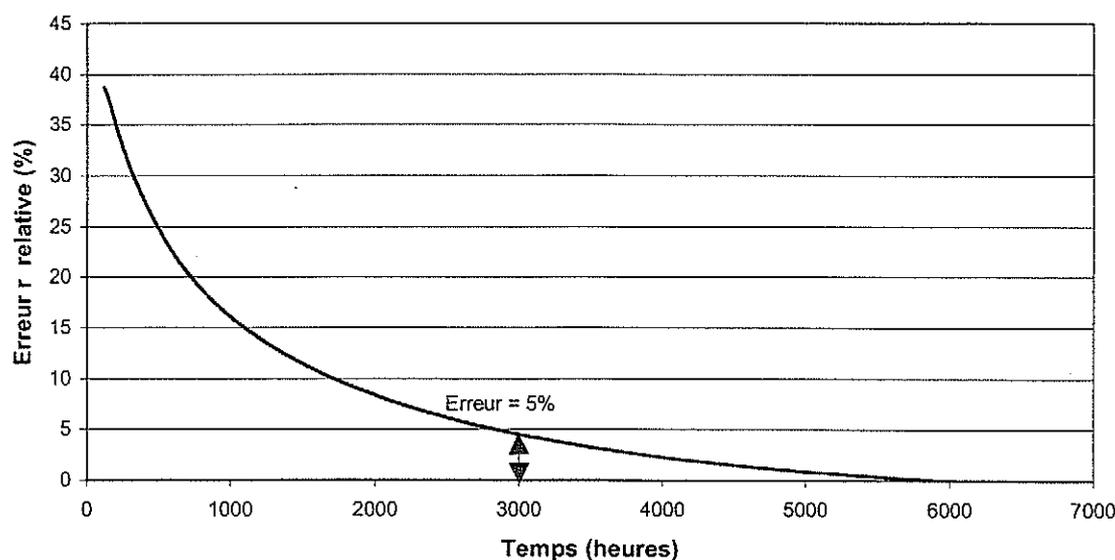


Figure : 3.5 : Erreur relative sur le passé thermique pour un pont thermique en contact avec le sol

Nous avons finalement retenu pour valeurs d'initialisation du calcul le nombre de jours immédiatement supérieur à la valeur de $t = 4.6 \Gamma$, ce qui correspond à :

- 2 jours pour la liaison – mur extérieur – plancher ;
- 3 jours pour la liaison angle rentrant ;
- 125 jours (de l'ordre de 4 mois) pour les liaisons en contact avec le sol.

3. RESULTATS

Pour calculer les consommations énergétiques des ponts thermiques en régime transitoire nous utilisons la même méthode de superposition que pour le calcul en régime permanent mais nous travaillons heure par heure.

- Les conditions de simulation que nous avons adoptées pour ce calcul de pont thermique en régime transitoire sont les suivantes :
 - Le coefficient « U » de paroi courante en régime permanent a été maintenu constant pour cette étude, (cf. Tab. 3.4).

| Matériau | Epaisseur [m] | Conductibilité thermique [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$] | Masse volumique [$kg \cdot m^{-3}$] | Capacité calorifique [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] |
|------------|---------------|--|---------------------------------------|---|
| Béton armé | 0.20 | 2.3 | 2350 | 1000 |
| Isolant | 0.08 | 0.039 | 15 | 1030 |

Tableau 3.4 : Caractéristiques thermophysiques des matériaux étudiés

- Le calcul a été effectué en maintenant la température intérieure constante. En effet, le choix d'une température intérieure variable dépend du site climatique mais aussi du type de logement (ex.: logement plus ou moins vitré), ou encore de l'orientation des pièces du logement.
 - Vu qu'il n'y a pas de critère objectif pour déterminer une période de chauffage (qui peut être différente d'un site climatique à l'autre et dépendre aussi des années), nous avons adopté une durée de période de chauffage identique pour les 2 sites climatiques de Trappes et de Carpentras. Celle-ci pour les calculs va du 1^{er} octobre au 20 mai.
- Comme pour la validation en régime permanent (cf. §1 – chap. 2.) on réalise deux calculs qui correspondent aux consommations de la paroi avec et sans pont thermique. La différence des deux résultats obtenus donne l'effet du pont thermique seul. On ne conserve alors que valeurs correspondant aux déperditions. Ainsi, en ne gardant que les déperditions on se place dans le cas le plus défavorable pendant la période de chauffage car ce sont ces déperditions qui engendrent les besoins énergétiques.
 - Les résultats de consommation énergétique sont présentés de la manière suivante.
 - Les consommations énergétiques ont été déterminées par la méthode présentée au paragraphe 1 du chapitre 2.
 - Elles correspondent à **1 mètre linéaire de pont thermique.**

3.1 PONT THERMIQUE AVEC DISCONTINUITÉ D'ISOLATION : CAS DE LA LIAISON PLANCHER INTERMÉDIAIRE-MUR EXTERIEUR

On constate, (cf. Tab. 3.5), que deux facteurs jouent un rôle important sur les consommations du pont thermique. Il s'agit respectivement du site climatique et de l'orientation du pont thermique vis à vis de l'ensoleillement. Ces deux facteurs agissent dans le même sens et augmentent les consommations énergétiques dues au pont thermique.

- Le site climatique de Trappes plus froid et moins ensoleillé que celui de Carpentras entraîne des consommations énergétiques de pont thermique plus élevées.
- La récupération des apports solaires par le pont thermique est plus forte au sud qu'au nord, ce qui contribue à diminuer les consommations de celui-ci pour l'orientation la plus favorable à l'ensoleillement.

| | Consommations énergétiques (kWh) | | | | |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------|--|
| | Modèle pont thermique (Fg) | Modèle paroi courante ($2I * U$) | Paroi courante déperditive ($2I * U > 0$) | Effet pont thermique (ψ) | Effet pont thermique déperditif ($\psi > 0$) |
| Carpentras (H3) Sud | 80.6 | 36.5 | 37.8 | 44.1 | 51.2 |
| Carpentras (H3) Nord | 107.6 | 44.8 | 45.3 | 62.8 | 62.2 |
| Trappes (H1) Sud | 127.9 | 53.8 | 54.1 | 74.1 | 74.4 |
| Trappes (H1) Nord | 137.7 | 57.9 | 58 | 79.8 | 79.8 |

Tableau 3.6 : Consommations énergétiques de la liaison plancher intermédiaire – mur extérieur

Les résultats sont identiques pour les deux autres types de ponts thermiques, Tableaux 3.6 et 3.7.

3.2 PONTS THERMIQUES SANS DISCONTINUITÉ D'ISOLATION : CAS DE L'ANGLE RENTRANT

| | Consommations énergétiques (kWh) | | | | |
|----------------------|----------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------------|--|
| | Modèle pont thermique (Fg) | Modèle paroi courante ($2I * U$) | Paroi courante déperditive ($2I * U > 0$) | Effet pont thermique (ψ) | Pont thermique déperditif ($\psi > 0$) |
| Carpentras (H3) Sud | 46.9 | 38.5 | 39.7 | 8.4 | 9 |
| Carpentras (H3) Nord | 53.1 | 43.6 | 44.1 | 9.5 | 9.8 |
| Trappes (H1) Sud | 66.7 | 54.7 | 55 | 12 | 12.1 |
| Trappes (H1) Nord | 69.7 | 57.2 | 57.3 | 12.5 | 12.6 |

Tableau 3.7 : Consommations énergétiques de la liaison angle rentrant

3.3 PONT THERMIQUE EN CONTACT AVEC LE SOL

Pour cette étude les caractéristiques de la paroi verticale ont été prises identiques à celles définies dans le tableau 3.4. Cependant, nous avons adopté une isolation périphérique de sol horizontale en polystyrène extrudé ($E_p = 0.08$ m, Longueur = 1.5 m, $\lambda = 0.039$ W.m⁻¹. K⁻¹) et une valeur de conductivité thermique de sol de 1.5 W. m⁻¹. K⁻¹.

| | Consommations énergétiques (kWh) | | | | |
|----------------------|----------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|-----------------------------------|
| | Modèle pont thermique (Fg) | Modèle paroi courante (2l *U) | Paroi courante déperditive (2l *U > 0) | Effet pont thermique (ψ) | Pont thermique déperditif (ψ > 0) |
| Carpentras (H3) Sud | 117.6 | 18.2 | 18.9 | 99.4 | 117.8 |
| Carpentras (H3) Nord | 123.9 | 22.4 | 22.6 | 101.5 | 123.9 |
| Trappes (H1) Sud | 159.8 | 23.4 | 24.1 | 136.9 | 159.8 |
| Trappes (H1) Nord | 166 | 27.5 | 27.6 | 138.5 | 166 |

Tableau 3.7 : Consommations énergétiques de la liaison « pont thermique en contact avec le sol »

3.4 COMPARAISON ENTRE LES TROIS TYPES DE PONT THERMIQUE

Si on s'intéresse ensuite dans chaque tableau aux valeurs de pont thermique déperditif ($\psi > 0$) on peut calculer les écarts de consommations entre le Nord et le Sud pour les sites respectifs de Carpentras et Trappes, (cf. Tab. 3.8), grâce à l'équation suivante :

$$\text{Ecart relatif} = \frac{\text{consommations au Nord} - \text{consommations au Sud}}{\text{consommations au Nord}} \quad (\text{eq. 3.1})$$

| | Liaison plancher – mur extérieur | Angle rentrant | Pont thermique en contact avec le sol |
|------------|----------------------------------|----------------|---------------------------------------|
| Carpentras | 21 % | 8 % | 4.9 % |
| Trappes | 6.7 % | 4 % | 3.7 % |

Tableau 3.8 : Influence de l'orientation et du site climatique sur les écarts relatifs de consommation (valeurs de pont thermique déperditif)

On remarque que l'ensoleillement influence différemment les consommations énergétiques des divers types de ponts thermiques. Les écarts relatifs sont plus importants pour le pont thermique relatif à la liaison plancher-mur extérieur. Ceci est dû au fait que ce pont thermique cumule à la fois une discontinuité d'isolation thermique et une faible inertie, ce qui n'est pas le cas des deux autres types de pont thermique.

2.5 CONCLUSION

D'autres sites climatiques ont été testés dans chaque zone définie par la RT 2000: Limoges (H1), Agen (H2) et Perpignan (H3). Pour chaque site, le pont thermique a été calculé au nord et au sud.

D'une manière générale, on constate que les consommations énergétiques générées par les ponts thermiques sont plus élevées au nord et dans la zone H1, où le climat est plus froid et moins ensoleillé.

On constate également que les paramètres d'inertie et d'isolation du pont thermique sont évidemment des paramètres prépondérants de ses consommations énergétiques.

PROPOSITION D'UN EQUIVALENT PAROI DE PONT THERMIQUE

1. PROTOCOLE DE CALCUL D'UN EQUIVALENT PAROI

1.1 DEFINITION DE L'EQUIVALENT PAROI

Le calcul de l'équivalent paroi de pont thermique se fait à partir des consommations énergétiques des ponts thermiques pour la période de chauffage considérée. Il peut être défini de la manière suivante : en terme de consommations énergétiques, c'est la surface de la paroi courante qui a les mêmes déperditions que le pont thermique. La figure 4.1 décrit de manière synthétique le déroulement du calcul de l'équivalent paroi. A partir de deux calculs (paroi avec le pont thermique et sans le pont thermique) on en déduit l'effet du pont thermique qui est ensuite traduit en une surface de paroi courante. Ainsi les déperditions de la structure n° 1 avec le pont thermique sont égales à celles de la structure n°3 avec rajout de x% de paroi courante en plus.

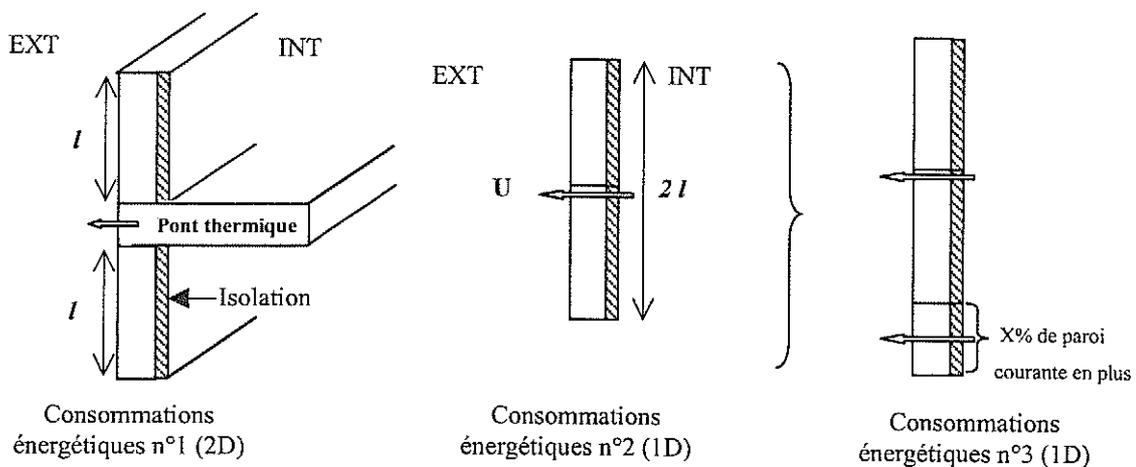


Figure 4.1 : Schéma de l'équivalent paroi de pont thermique

1.2 ETAPES DE CALCUL

La détermination de l'équivalent paroi est basée sur la connaissance des consommations énergétiques des différents ponts thermiques. Elle nécessite donc les mêmes étapes de calcul que celles qui ont été précisées dans les chapitres précédents (cf. §1 – chap. 2).

De manière générale l'équivalent paroi de pont thermique est donné sous forme de surface équivalente « $S_{\text{équivalente}}$ » et est calculé à l'aide de l'équation 4.1. On ne considère dans cette formulation que les déperditions du pont thermique et de la paroi courante.

$$S_{\text{équivalente}} = \frac{\text{Consommations effet pont thermique}}{\text{Consommations paroi courante déperditive de longueur "l"}}$$
 (eq. 4.1)

2. RESULTATS ET ETUDE PARAMETRIQUE

A l'exception des études de sensibilité pour lesquelles nous faisons varier un paramètre (ex : conductivité thermique de l'isolant), les caractéristiques thermophysiques des matériaux utilisés pour cette étude sont identiques à celles prises pour la détermination des consommations énergétiques des ponts thermiques du chapitre précédent.

2.1 PONTS THERMIQUES AVEC DISCONTINUITÉ D'ISOLATION

2.1.1 Cas de la liaison plancher-mur extérieur

L'orientation de la paroi avec le pont thermique a été l'une de nos premières préoccupations. En effet, comme nous l'avons déjà vu (cf. chapitre 3) la valeur des flux solaires influence sensiblement les consommations énergétiques des ponts thermiques. Cet apport est bien entendu plus important au sud qu'au nord.

Par contre, quelle que soit l'orientation et le site climatique l'équivalent paroi obtenu pour le pont thermique est le même et est égal à environ $2.74 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$, (cf. Tab. 4.1) On retrouve donc le même équivalent paroi. Ce résultat est confirmé par les calculs faits sans flux solaire. On atteint alors un maximum de déperditions pour les deux modèles mais l'équivalent paroi reste constant.

| | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$) |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|
| Carpentras H3 (Sud) | 51.2 | 37.8 | 2.72 |
| Carpentras H3 (Nord) | 62.2 | 45.3 | 2.75 |
| Trappes H1 (Sud) | 74.4 | 54.1 | 2.75 |
| Trappes H1 (Nord) | 79.8 | 58 | 2.75 |

Tableau 4.1 : Résultats pour la liaison plancher intermédiaire-mur extérieur en fonction de la zone climatique et de l'orientation

Nous avons ensuite testé l'influence de la conductivité thermique de l'isolant en faisant plusieurs calculs avec des conductivités allant de 0.03 à $0.043 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, (cf. Tab. 4.2). Plus la conductivité de l'isolant augmente, plus les déperditions à travers la paroi courante augmentent, ce qui diminue la part de flux attribuée au pont thermique seul. Par conséquent, plus la conductivité thermique de l'isolant (à épaisseur constante) augmente plus la surface équivalente de pont thermique augmente.

Remarque

Une simulation a été faite avec seulement un mur de béton de 28 cm (20 cm + 8 cm d'isolant devenu du béton). Dans ce cas, l'équivalent paroi est faible ($0.24 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$) puisque le pont thermique est peu déperditif par rapport à la paroi courante en considérant la paroi courante isolée.

| Conductivité thermique de l'isolant ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | Résistance thermique paroi courante ($\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$) | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$) |
|--|---|---------------------------------|----------------------------------|--|
| 0.030 | 2.92 | 52.4 | 29.9 | 3.51 |
| 0.036 | 2.48 | 51.7 | 35.2 | 2.93 |
| 0.039 | 2.33 | 51.2 | 37.8 | 2.72 |
| 0.041 | 2.21 | 51.6 | 39.5 | 2.61 |
| 0.043 | 2.12 | 51.7 | 41.2 | 2.48 |

Tableau 4.2 : Résultats pour la liaison plancher intermédiaire-mur extérieur en fonction de la conductivité thermique (épaisseur du plancher = 20 cm)

On peut également raisonner en valeur de résistance thermique. Dans ce cas, l'équivalent paroi augmente avec la résistance thermique, (cf. Fig 4.2) En fait, si on considère le pont thermique comme un point faible, le flux aura tendance à passer à travers celui-ci si la résistance thermique de la paroi est forte et inversement si elle est mauvaise.

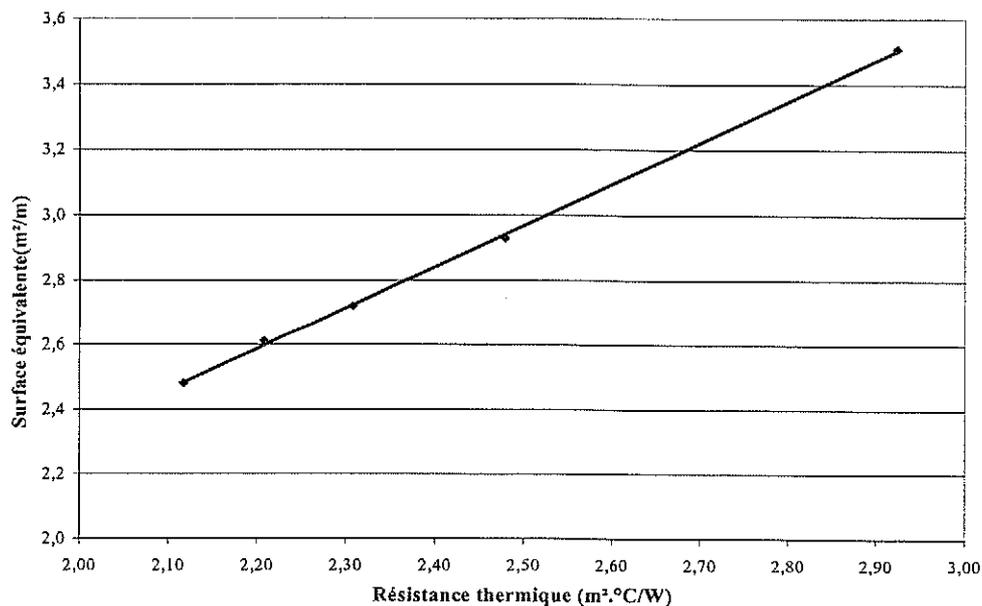


Figure 4.2 : Influence de la résistance thermique de l'isolant sur la surface équivalente de pont thermique

L'épaisseur du plancher joue aussi un rôle dans les déperditions du pont thermique. En effet, on remarque que les consommations du pont thermique seul augmentent lorsque l'épaisseur du plancher augmente, (cf. Tab. 4.3).

| Epaisseur du plancher (cm) | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente ($m^2 \cdot m^{-1}$) |
|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|
| 15 | 45 | 37.8 | 2.38 |
| 20 | 51.2 | 37.8 | 2.72 |
| 25 | 59.9 | 37.8 | 3.17 |

Tableau 4.3 : Surface équivalent de paroi en fonction de l'épaisseur du plancher intermédiaire (Carpentras Sud).

Dans la liaison plancher intermédiaire l'équivalent paroi est aussi une fonction linéaire de l'épaisseur du plancher, (cf. Fig. 4.3). Ce résultat confirme que pour une valeur de U_{Paroi} constante (ex : épaisseur du plancher ou épaisseur d'isolation constantes), l'équivalent paroi de pont thermique est également constant quelle que soit l'orientation ou le site climatique.

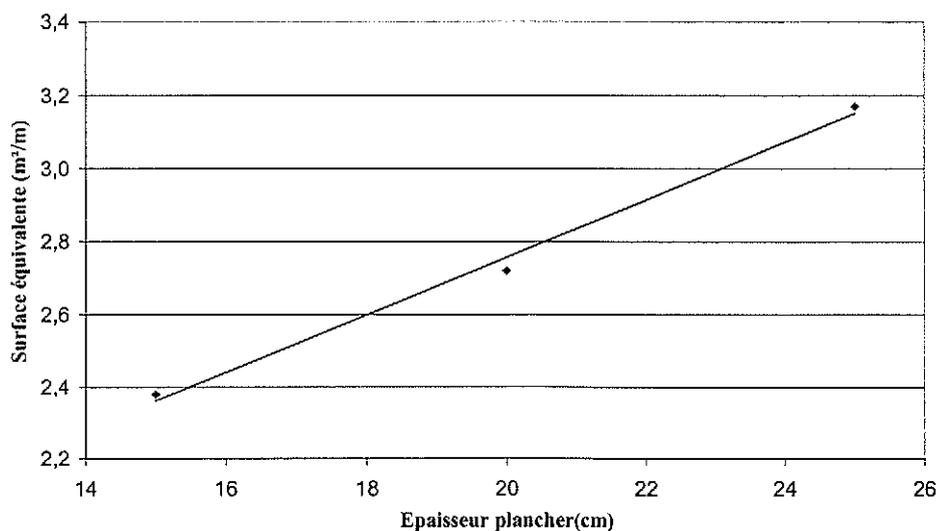


Figure 4.3 : Valeur de la surface équivalente en fonction de l'épaisseur du plancher intermédiaire. Liaison plancher-mur extérieur

L'analyse des courbes présentées, (cf. Fig. 4.2 et 4.3), montre que sur les plages de variation des paramètres que nous avons considérées la valeur de la surface équivalente est une fonction linéaire croissante à la fois de la résistance thermique de la paroi en partie courante de l'épaisseur du pont thermique (ici le plancher en béton). On peut aussi constater sur la figure 4.2 que le

produit de l'inverse de la valeur de la résistance thermique de la paroi courante par la valeur de la surface équivalente est pratiquement égal à une constante « A », (cf. eq. 4.2).

$$A = \frac{\text{Surface équivalente}}{\text{Résistance thermique paroi courante}} \quad (\text{eq. 4.2})$$

Ainsi, pour une liaison plancher-mur extérieur de caractéristiques dimensionnelles suivantes : épaisseur béton = 0.2 m et épaisseur Isolant = 0.08 m en paroi courante, la valeur moyenne de la constante est de 1.182, (cf. Tab. 4.4).

| Conductivité thermique [W. m ⁻¹ . K ⁻¹] | Résistance thermique [m ² . K. W ⁻¹] | Surface équivalente [m ² . m ⁻¹] | Valeur de la constante [W. m ⁻¹ . K ⁻¹] |
|---|--|--|---|
| 0.03 | 2.92 | 3.51 | 1.200 |
| 0.036 | 2.48 | 2.93 | 1.181 |
| 0.039 | 2.31 | 2.72 | 1.178 |
| 0.041 | 2.21 | 2.61 | 1.181 |
| 0.043 | 2.12 | 2.48 | 1.171 |
| Valeur moyenne de la constante « A » | | | 1.182 |

**Tableau 4.4 : Valeur moyenne constante « A »
pour une épaisseur de plancher béton = 0.20 m**

Cette constatation permet de calculer simplement la valeur de la surface équivalente pour une valeur de résistance thermique de paroi courante homogène différente.

Exemple

- On modifie seulement l'épaisseur d'isolant de la paroi courante, celle du béton restant inchangée ainsi que ses caractéristiques thermiques.
 - Nouvelle valeur d'épaisseur isolant = 0.10 m ;
 - Conductivité thermique isolant $\lambda = 0.030 \text{ W. m}^{-1}. \text{K}^{-1}$.
- Valeur de la nouvelle résistance thermique paroi homogène
 - Caractéristiques béton : (Ep.= 0.20 m, $\lambda = 2.3 \text{ W. m}^{-1}. \text{K}^{-1}$) ;
 - Caractéristiques dimensionnelle isolant (Ep.=0.10 m) ;
 - Résistances superficielles : $0.17 \text{ m}^2. \text{K. W}^{-1}$;
 - → Valeur finale de résistance thermique finale = $3.59 \text{ m}^2. \text{K. W}^{-1}$.
- Valeur de la surface équivalente : $R_{\text{Thermique}} \times \text{Constante} = 3.59 * 1.182 = 4.24 \text{ m}^2. \text{m}^{-1}$;
- Vérification par calcul (logiciel FEHT) : $S_{\text{équivalente}} = 4.26 \text{ m}^2. \text{m}^{-1}$.

Enfin il faut noter que la valeur moyenne de la constante dépend aussi de l'épaisseur du pont thermique, figure 4.4, c'est à dire pour nous de l'épaisseur de béton du plancher. Pour des épaisseurs de plancher différentes, la valeur de la constante prend des valeurs différentes.

- Plancher béton d'épaisseur 0.15 m → Valeur de la constante $A = 0.966$;
- Plancher béton d'épaisseur 0.25 m → Valeur de la constante $A = 1.897$.

2.1.2 Cas de la liaison refend-mur extérieur

Les mêmes paramètres ont été testés pour la liaison refend-mur extérieur: le site climatique, l'orientation, la conductivité thermique de l'isolant et l'épaisseur du refend. Les mêmes conclusions que pour la liaison plancher-mur extérieur ont été obtenues.

L'équivalent paroi est à nouveau une fonction linéaire de la résistance thermique et de l'épaisseur du refend, (cf. Fig 4.4). Les résultats sur l'équivalent paroi pour la liaison refend-mur extérieur sont très proches de ceux pour la liaison plancher-mur extérieur. En effet, seules les conditions aux limites intérieures à savoir les résistances thermiques superficielles du refend et du plancher changent dans le modèle.

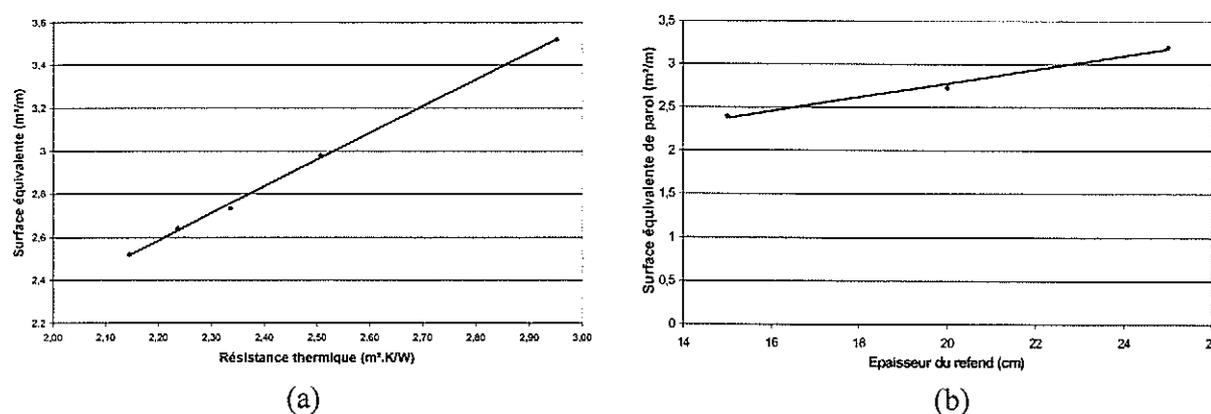


Figure 4.4 : Influence de l'épaisseur de refend (a) et de la résistance thermique (b) sur la valeur de la surface équivalente de pont thermique

2.1.3 Cas de la liaison balcon-mur extérieur

La liaison balcon-mur extérieur ressemble beaucoup à la liaison plancher intermédiaire-mur extérieur. D'ailleurs les résultats le confirment. En effet, nous avons fait varier la zone climatique, l'orientation et la conductivité de l'isolant et nous retrouvons des résultats similaires.

Par exemple pour Perpignan en zone H3, la surface équivalente est d'environ $2.7 m^2.m^{-1}$ quelle que soit l'orientation alors qu'elle est égale à environ $2.73 m^2.m^{-1}$ pour la liaison plancher intermédiaire-mur extérieur. Les consommations énergétiques sont du même ordre de grandeur.

2.1.4 Cas de la liaison plancher haut-mur extérieur (acrotère)

Dans le cas de la toiture terrasse, le pont thermique se situe au niveau de la liaison plancher haut-mur extérieur. Nous avons effectué plusieurs simulations en faisant varier la zone climatique, l'orientation et l'épaisseur de l'isolant.

On peut considérer que l'équivalent paroi reste constant quel que soit la zone climatique considérée ou quelle que soit l'orientation. Sa valeur est égale à environ $3.2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ ce qui fait que l'effet pont thermique sur la structure est plus important que pour les deux cas précédents.

Les mêmes résultats sont encore obtenus pour la variation de la conductivité de l'isolant. On retrouve un équivalent paroi fonction linéaire de la conductivité de l'isolant.

2.2 PONTS THERMIQUES AVEC CONTINUITE D'ISOLATION : CAS D'UN ANGLE RENTRANT DE DEUX MURS DONNANT SUR L'EXTERIEUR

Nous avons étudié l'angle rentrant de deux parois extérieures avec isolation continue intérieure en faisant varier plusieurs paramètres: la zone climatique, l'orientation et la conductivité thermique de l'isolant.

L'équivalent paroi obtenu pour l'angle rentrant est constant pour toutes les zones climatiques et pour toutes les orientations. Il est égal à environ $0.44 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$, (cf. Tab. 4.5). Grâce à l'isolation continue à l'intérieur, la part due au pont thermique seul dans les déperditions est peu importante, d'où un faible équivalent paroi par rapport aux ponts thermiques avec discontinuité de l'isolant.

| | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$) |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|--|
| Carpentras H3 (SUD) | 9 | 39.7 | 0.45 |
| Carpentras H3 (NORD) | 9.8 | 44.1 | 0.44 |
| Trappes H1 (SUD) | 12.1 | 55 | 0.44 |
| Trappes H1 (NORD) | 12.6 | 57.3 | 0.44 |

Tableau 4.5 : Résultats pour la liaison angle rentrant de deux murs extérieurs en fonction de la zone climatique et de l'orientation

Lorsqu'on fait varier la conductivité thermique de l'isolant, l'équivalent paroi reste constant, ce qui est nouveau par rapport aux ponts thermiques précédents, (cf. Tab 4.6). L'effet du pont thermique étant moindre grâce à la continuité de l'isolation, même la conductivité thermique ne va pas jouer sur l'équivalent paroi si on étudie une fourchette de conductivité allant de 0.03 à $0.043 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (valeurs réalistes d'un isolant). Par contre, si nous regardons le résultat sur la simulation avec un mur de béton de 28 cm, l'équivalent paroi diminue et est égal à $0.29 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$. La conductivité thermique de l'isolant influence le résultat si celle-ci est prise dans une fourchette plus grande (dans ce cas $2.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) mais irréaliste par rapport à la conductivité d'un véritable isolant.

| Conductivité thermique (W. m ⁻¹ K ⁻¹) | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente (m ² . m ⁻¹) |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 0.030 | 7.2 | 31.4 | 0.46 |
| 0.036 | 8.4 | 37 | 0.45 |
| 0.041 | 9.3 | 41.5 | 0.45 |
| 0.043 | 9.7 | 43.3 | 0.45 |

Tableau 4.6 : Résultats pour la liaison angle rentrant de deux murs extérieurs en fonction de la conductivité thermique (Carpentras SUD)

2.3 PONTS THERMIQUES EN LIAISON AVEC LE SOL : DALLE SUR TERRE-PLEIN AVEC ISOLATION INTERIEURE SUR LE MUR EXTERIEUR

La modélisation de ce genre de pont thermique entraîne beaucoup de difficultés. Pour représenter correctement les échanges d'une dalle sur terre plein avec le sol, il faudrait utiliser un logiciel en trois dimensions. Nous avons choisi de considérer le pont thermique en deux dimensions, la troisième dimension étant prise à l'infini. Nous ne nous intéresserons qu'aux échanges à travers le pont thermique qui peut être alors considéré en deux dimensions. En ce qui concerne la conductivité dans le sol, nous l'avons considéré comme constante. Il aurait été intéressant de prendre plusieurs valeurs pour tenir compte de la profondeur. La deuxième hypothèse concerne les conditions aux limites du sol. Elles ont été prises adiabatiques, on aurait aussi pu considérer le cas avec des isothermes. On a aussi opté pour une température initiale de 12 °C dans le sol, valeur qui correspond à une température mesurée à 3 mètres de profondeur au mois de mai.

Les paramètres testés sont: la zone climatique, l'orientation, la conductivité thermique du sol, l'épaisseur de la dalle et l'isolation en sous face de la dalle, (cf. Tab. 4.7 et 4.8 et 4.9). L'équivalent paroi obtenu pour ce type de pont thermique est le plus important. Tous paramètres confondus, l'équivalent paroi est compris entre 5.47 et 7.47 m².m⁻¹.

| | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente (m ² . m ⁻¹) |
|----------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Carpentras H3 (SUD) | 117.8 | 18.9 | 6.23 |
| Carpentras H3 (NORD) | 123.9 | 22.6 | 5.47 |
| Trappes H1 (SUD) | 159.8 | 24.1 | 6.62 |
| Trappes H1 (NORD) | 166 | 27.6 | 6.01 |

Tableau 4.7 : Dalle de sol sur terre plein en fonction de la zone climatique, de l'orientation ($\lambda_{\text{sol}} = 1.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur dalle = 15 cm et isolation périphérique)

Les consommations du pont thermique seul sont très importantes par rapport aux consommations de la paroi courante. Si on considère la zone climatique et l'orientation, les

consommations énergétiques sont plus élevées dans la zone H1 et au nord. On retrouve donc les mêmes résultats que pour les autres ponts thermiques. Par contre l'équivalent paroi varie d'un site à l'autre et d'une orientation à l'autre.

La conductivité thermique du sol joue un rôle important en ce qui concerne les consommations énergétiques, (cf. Tab. 4.8). Plus la conductivité est importante, plus les consommations sont élevées. L'effet du pont thermique seul augmente ainsi que l'équivalent paroi lorsque la conductivité du sol augmente. On assiste au même phénomène lorsque l'épaisseur de la dalle augmente: les consommations et l'équivalent paroi augmentent aussi.

| Conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} K^{-1}$) | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente ($m^2 \cdot m^{-1}$) |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 1.5 | 117.8 | 18.9 | 6.23 |
| 2 | 130 | 18.9 | 6.87 |
| 2.5 | 141.2 | 18.9 | 7.47 |

Tableau 4.8 : Dalle de sol en fonction de la conductivité thermique (Carpentras Sud, épaisseur dalle = 15 cm et isolation périphérique)

L'isolation en sous face est un paramètre important pour une dalle sur terre-plein. Elle peut être totale ou périphérique, (cf. Tab. 4.9). Il est évident que les déperditions à travers une dalle non isolée sont plus importantes que celles d'une dalle isolée. L'équivalent paroi est ainsi plus important pour une dalle non isolée.

| Type d'isolation sous la dalle | Pont thermique déperditif (kWh) | Paroi courante déperditive (kWh) | Surface équivalente ($m^2 \cdot m^{-1}$) |
|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Totale | 95.1 | 18.9 | 5.03 |
| Périphérique | 117.8 | 18.9 | 6.23 |
| Aucune | 140.9 | 18.9 | 7.45 |

Tableau 4.9 : Dalle de sol en fonction de la conductivité thermique (Carpentras Sud, épaisseur dalle = 15 [cm] et isolation périphérique)

La liaison périphérique de la dalle sur terre-plein avec le mur extérieur est un pont thermique sensible à tous les paramètres étudiés. A ce stade de l'étude, il faudrait approfondir les simulations pour améliorer le modèle avec d'autres conditions aux limites comme une conductivité thermique du sol variable ou une température initiale du sol qui varie avec la profondeur.

2.4 CONCLUSION

Nous avons proposé dans ce chapitre un nouveau concept appelé « équivalent paroi de pont thermique » dont l'emploi a été généralisé à plusieurs types de ponts thermiques appartenant à différentes familles.

Ce concept établi pour la période de chauffage considérée présente des propriétés intéressantes. Outre le fait qu'il permet de ramener des calculs de type 2D à des calculs de type 1D, il permet aussi de s'affranchir de l'orientation de la paroi et la zone climatique considérée pour les ponts thermiques avec et sans discontinuité d'isolation.

Pour ces deux types de ponts thermiques, les études de sensibilité mettent en évidence que la valeur de la surface équivalente de pont thermique est une fonction linéaire simple de l'épaisseur du pont thermique et de la résistance thermique de la paroi courante. Ces résultats peuvent conduire à des simplifications de calcul de l'équivalent paroi de pont thermique pour des situations de paroi courantes différentes.

En ce qui concerne les ponts thermiques en contact avec le sol, il reste encore à approfondir le comportement de l'équivalent paroi à l'aide d'une étude de sensibilité.

REPONSE DYNAMIQUE DE L'EQUIVALENT PAROI DE PONT THERMIQUE

1. POSITION DU PROBLEME

Au chapitre précédent nous avons établi et vérifié le concept de surface équivalente de pont thermique. L'avantage principal de ce concept est qu'il ramène les consommations énergétiques d'un pont thermique (2D généralement) à celles d'une surface équivalente (1D) de consommations énergétiques identiques.

Par contre, il s'avère que le fait de remplacer la paroi réelle avec son pont thermique par une surface de paroi équivalente courante et homogène (cf. §1- Chap. 4) ne conserve pas forcément le comportement thermique dynamique (déphasage et amortissement) de la paroi réelle. Dans ce cas, la continuité de l'isolation thermique et la modification des paramètres d'inertie de la paroi équivalente par rapport à celle de la paroi réelle risquent de modifier sensiblement la réponse. Ceci est certainement sans importance si on s'intéresse à des périodes de consommations énergétiques importantes (temps longs), mais il peut le devenir pour des périodes réduites (temps courts). Les appels de puissance demandés par la régulation aux temps courts peuvent alors intervenir à des moments différents et avec des amplitudes également différentes.

Pour illustrer ce problème nous avons choisi deux ponts thermiques qui appartiennent à deux familles différentes. Le premier correspond à une liaison de type angle rentrant et pour laquelle l'isolation est continue, (cf. Fig 5.1). Le second représente la liaison plancher-mur extérieur et dans ce cas l'isolation est discontinue, (cf. Fig. 5.2).

Remarque

Nous avons retenu pour cette comparaison le site climatique de Carpentras et l'orientation sud.

L'analyse de ces figures montre que la paroi équivalente n'a pas pas la même réponse thermique que la paroi réelle.

En ce qui concerne le paramètre de déphasage « $\Delta\phi$ » on constate que seule la liaison plancher-mur extérieur en présente un. Le déphasage est de l'ordre de deux heures entre la paroi réelle et la paroi équivalente, (cf. Fig 5.2). Par contre, on observe aussi des différences d'amplitude « Δa » (amortissement différent) dans ces deux cas de liaison thermique. Ce phénomène est assez peu marqué pour la liaison angle rentrant, (cf. Fig. 5.1). Ceci s'explique par la continuité de l'isolation. Il est plus important pour la liaison mur extérieur-plancher, (cf. Fig. 5.2). Ceci est dû à la fois à la discontinuité de l'isolation et la différence d'inertie qui en résulte. C'est la raison pour laquelle la liaison plancher-mur extérieur présente par moment des valeurs de consommations thermiques nettement différentes de celles de la paroi équivalente. En conclusion, l'utilisation de l'équivalent paroi de pont thermique reste satisfaisant pour des consommations énergétiques sur une période importante (temps longs). Cependant, il peut ne pas l'être sur une période plus réduite (temps courts). Ceci est cependant à pondérer, en fonction de la famille à laquelle appartient le pont thermique.

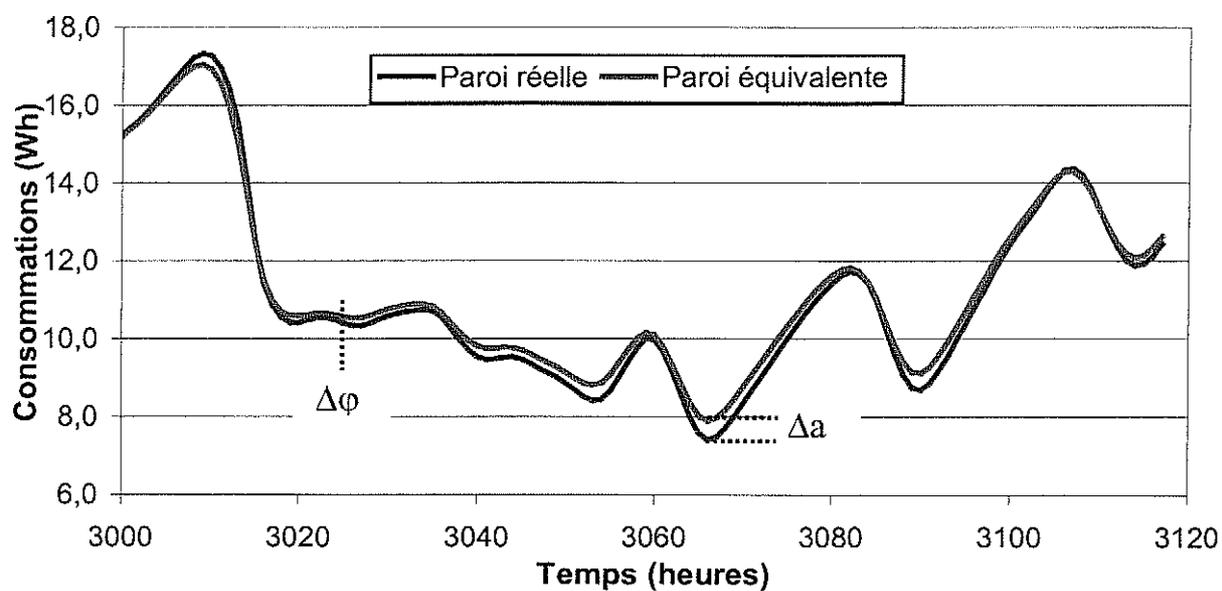


Figure 5.1 : Comportements thermiques de la paroi réelle et de la paroi équivalente - Liaison angle rentrant

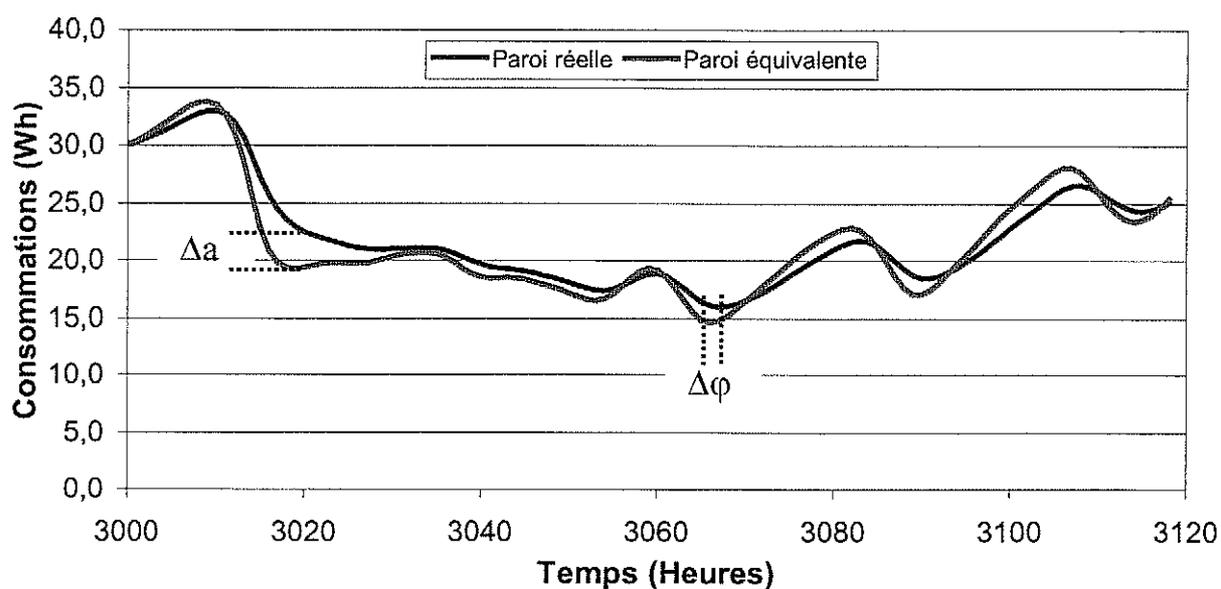


Figure 5.2 : Comportements thermiques de la paroi réelle et de la paroi équivalente. Liaison plancher- mur extérieur

2. METHODE UTILISEE

La méthode utilisée que nous proposons consiste à rechercher une valeur d'inertie qui permette de se rapprocher du comportement thermique de la paroi réelle et cela à tout instant. Comme nous sommes en régime transitoire nous pouvons jouer sur plusieurs paramètres qui sont

inclus dans le terme de diffusivité thermique $a = \frac{\lambda}{\rho \times C}$.

Avec :

- a : diffusivité thermique en $[m^2 \cdot s^{-1}]$;
- λ : coefficient de conductivité thermique en $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$;
- ρ : masse volumique en $[kg \cdot m^{-3}]$;
- C : capacité calorifique en $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$.

Nous avons finalement choisi de maintenir les valeurs des coefficients de conductivité thermique (λ) et de capacité calorifique thermique (C) constantes. Par contre, nous avons fait varier la valeur de la masse volumique du béton (ρ) de la surface équivalente par une méthode « essai-erreur ». Cela revient finalement à définir un matériau fictif qui puisse conserver les consommations de la paroi réelle avec le pont thermique (but initial recherché) tout en ayant une réponse thermique analogue en particulier aux temps courts. La méthode que nous avons adoptée est illustrée par la figure 5.3.

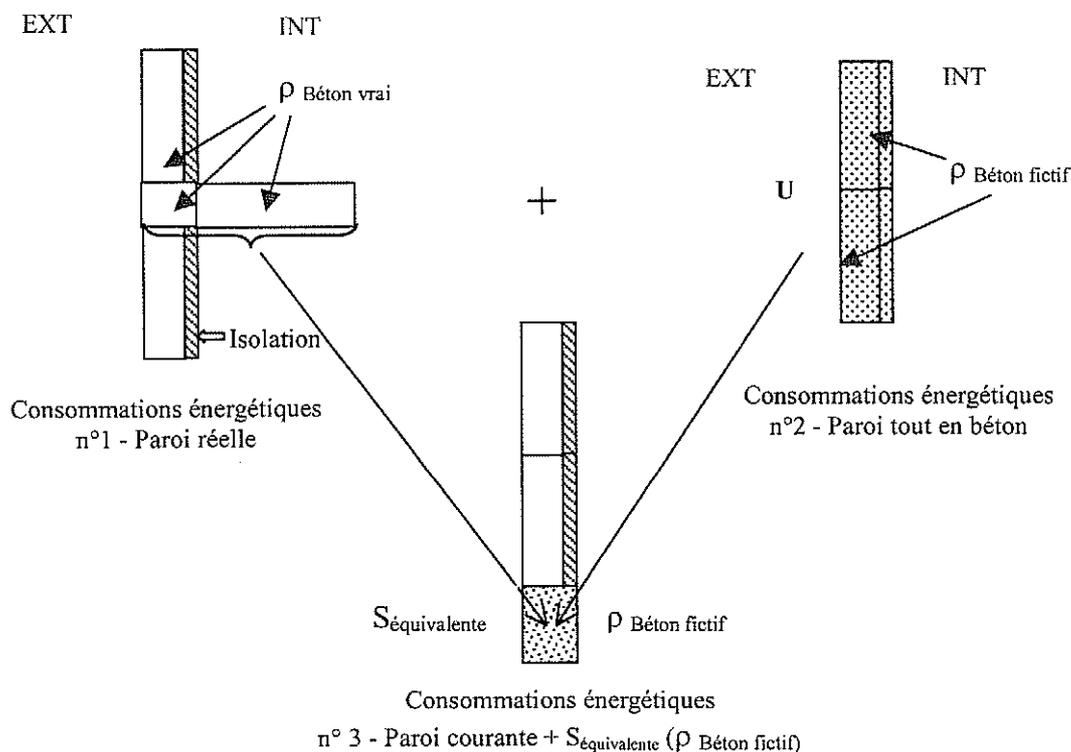


Figure 5.3 : Illustration de la méthode utilisée pour trouver un équivalent paroi qui répondent aux exigences des temps courts

Les différentes étapes de la méthode sont les suivantes :

- Etape 1 : Calcul des consommations énergétiques (n°1) de la paroi réelle en prenant en compte les caractéristiques thermophysiques réelles des matériaux utilisés et notamment celles correspondant à la masse volumique du béton « $\rho_{\text{béton vrai}}$ » ;
- Etape 2 : Calcul des consommations énergétiques (n°2) de la paroi courante en considérant que celle-ci est entièrement constituée de béton et en choisissant une valeur de « $\rho_{\text{béton fictif}}$ » ;
- Etape 3 : Calcul des consommations énergétiques de la paroi équivalente (n°3) composée de la surface équivalente de béton « $\rho_{\text{béton fictif}}$ » et de la paroi courante homogène ;
- Etape 4 : On vérifie la validité du critère ci-dessous, (eq. 5.1). S'il n'est pas satisfait, on revient à l'étape 2 en prenant une autre valeur de masse volumique de béton.

$$\sum_{H=0}^n \left| \text{Consommations paroi réelle}_{(H)} - \text{Consommations paroi équivalente}_{(H)} \right| \approx 0 \text{ (eq. 5.1)}$$

Avec H : qui représente le nombre d'heures correspondant à la période considérée.

Remarques

Le critère ci-dessus est appliqué aux déperditions comme nous l'avons fait jusqu'à maintenant. Il correspond à la différence heure par heure prise en valeur absolue des consommations énergétiques des parois réelle et équivalente.

Ce critère va prendre plusieurs valeurs suivant la masse volumique « $\rho_{\text{béton fictif}}$ » que l'on attribue au béton au cours de la simulation. On va donc rechercher la valeur de « $\rho_{\text{béton fictif}}$ » qui minimise le critère.

3. RESULTATS

3.1 CAS D'UNE LIAISON PLANCHER-MUR EXTERIEUR

Les conditions de simulation de la paroi correspondent à la station météorologique de Carpentras Sud. Les caractéristiques thermophysiques de la paroi réelle sont portées dans le tableau 5.1.

| | Epaisseur [m] | Conductibilité thermique [W. m ⁻¹ . K ⁻¹] | Masse volumique [kg. m ⁻³] | Capacité calorifique [J. kg ⁻¹ . K ⁻¹] |
|------------|------------------|--|--|---|
| Béton armé | 0.20 | 2.3 | 2350 | 1000 |
| Isolant | 0.08 | 0.039 | 15 | 1030 |

Tableau 5.1 : Caractéristiques thermophysiques des matériaux simulés

Les résultats sont portés figure 5.3 et tableau 5.2 ci-dessous.

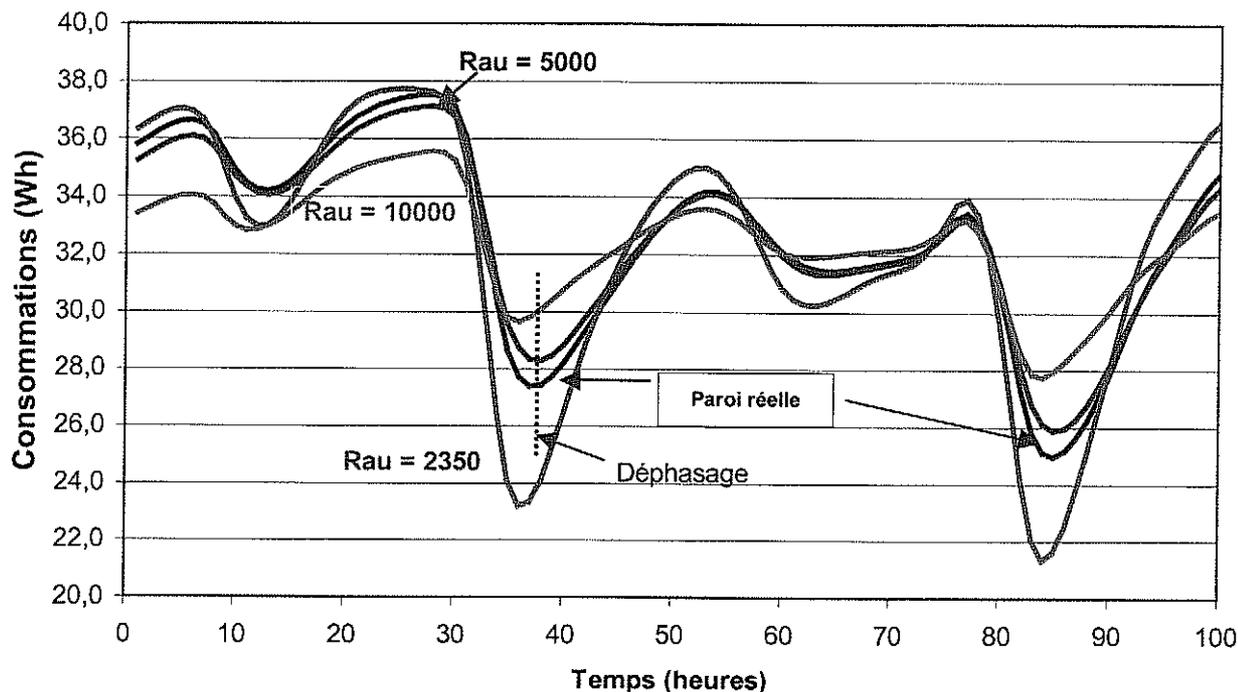


Figure 5.4 : Influence de la valeur de « $\rho_{\text{béton}}$ » sur la réponse thermique de la paroi équivalente pour une liaison plancher-mur extérieur

Comme on peut le constater sur cette figure le comportement thermique de la paroi varie avec la valeur de la masse volumique du béton. Pour des valeurs de masse volumique de béton comprises entre ($2350 < \rho_{\text{béton}} < 10000 \text{ kg. m}^{-3}$) le comportement thermique de la paroi équivalente fictive est très différent de celui de la paroi réelle. Il s'en approche sensiblement pour une valeur de « $\rho_{\text{Béton fictif}}$ » de l'ordre de 5000 kg. m^{-3} . Ceci est confirmé par le tableau 5.2 grâce au critère que nous avons défini précédemment, (cf. eq. 5.1).

| | Masse volumique béton [kg. m ³] | | |
|---|--|------------------------------|-------------------------------|
| | $\rho_{\text{Béton}} = 2350$ | $\rho_{\text{Béton}} = 5000$ | $\rho_{\text{Béton}} = 10000$ |
| $\sum_{H=0}^{100} \text{Cons. paroi réelle} - \text{Cons. paroi équivalente} $ | 109.29 | 33.28 | 129.89 |

Tableau 5.2 : Evolution du critère de minimisation en fonction de la valeur de la masse volumique du béton

Remarque

L'épaisseur du plancher de la liaison plancher-mur extérieur peut être variable suivant le mode constructif. Afin de vérifier la validité du critère proposé, nous avons mené deux études complémentaires. La simulation a été réalisée pour l'orientation et pour la station météorologique de Carpentras. A l'exception de l'épaisseur qui a été prise successivement égale à 0.15 et 0.25 m les autres paramètres de l'étude, en particulier les caractéristiques thermophysiques des matériaux, ont été maintenues constantes. Les résultats sont portés dans le tableau 5.2 ci-dessous et confirment la validité du critère.

| | Masse volumique béton [kg.m^{-3}] | | |
|---|--|------------------------------|-------------------------------|
| | $\rho_{\text{Béton}} = 2350$ | $\rho_{\text{Béton}} = 5000$ | $\rho_{\text{Béton}} = 10000$ |
| | Epaisseur plancher = 0.15 m | | |
| $\sum_{H=0}^{100} \text{Cons. paroi réelle} - \text{Cons. paroi équivalente} $ | 79.04 | 50.06 | 132.74 |
| | Epaisseur plancher = 0.25 m | | |
| $\sum_{H=0}^{100} \text{Cons. paroi réelle} - \text{Cons. paroi équivalente} $ | 134.61 | 28.9 | 138.11 |

Tableau 5.2 : Evolution du critère de minimisation en fonction de la valeur de la masse volumique du béton et de l'épaisseur du plancher

3.2 CONCLUSION

Cette étude a finalement montré que l'équivalent paroi de pont thermique permet si on lui adjoint une masse volumique corrigée de béton « $\rho_{\text{Béton}} \text{ fictif}$ » de rapprocher sensiblement aux temps courts le comportement thermique de la paroi équivalente de celui de la paroi réelle.

Ce concept de masse volumique fictive peut s'appliquer aux deux familles de pont thermiques qui ont été étudiées. Cependant, pour les ponts thermiques ne présentant pas de discontinuité d'isolation thermique on peut s'abstenir de l'utiliser car dans ce cas les réponses respectives aux sollicitations thermiques des parois réelle et équivalente sont dès le départ très proches l'une de l'autre.

CONCLUSION GENERALE

Le but de cette étude était de proposer une méthode simplifiée de prise en compte des ponts thermiques (2D) dans les logiciels (1D) actuels de simulation dynamique des bâtiments.

Pour cela, nous avons tout d'abord effectué un état de l'art relatif à la prise en compte des ponts thermiques dans ces logiciels. Puis, nous avons réalisé en deux temps la validation du logiciel utilisé.

- Dans un premier temps, celle-ci a été faite en régime permanent en comparant les résultats obtenus par le modèle avec des valeurs tirées de la littérature et provenant de la nouvelle réglementation thermique 2000.
- Dans un second temps, nous avons construit un pont thermique de dimension réduite toujours dans le but d'étalonner les résultats du modèle avec des mesures relevées en régime transitoire dans une enceinte contrôlée en température.

Ces deux types de travaux ont finalement conduit à une validation correcte du logiciel que nous avons numériquement utilisé pour la suite de cette étude.

Le travail numérique ainsi effectué nous a permis de déterminer les consommations énergétiques ainsi que les équivalents paroi (1D) de six ponts thermiques. Les résultats sont proposés en considérant trois familles de ponts thermiques au comportement bien distinct: les ponts thermiques avec discontinuité d'isolation, les ponts thermiques avec continuité d'isolation et les ponts thermiques en contact avec le sol.

Les résultats mettent en évidence que l'équivalent paroi de pont thermique est généralement constant. Il ne dépend ni de l'orientation ni de la zone climatique considérée. Par contre, à l'exception des ponts thermiques à isolation continue il est sensible à la valeur de résistance thermique de la paroi (coefficient de conductivité thermique et épaisseur de l'isolant) en partie courante ainsi qu'à la géométrie du pont thermique, épaisseur notamment, dans le cas d'une liaison plancher intermédiaire-mur extérieur ou refend.

D'autre part ce concept d'équivalent paroi peut être adapté au type de pont thermique rencontré.

- Si le pont thermique est à isolation continue on peut se contenter d'une approche simplifiée de l'équivalent paroi. Celle-ci consiste essentiellement à définir un pourcentage supplémentaire de paroi homogène (1D) qui satisfait aussi bien les consommations énergétiques aux temps longs qu'aux temps courts.
- Si le pont thermique est à isolation discontinue, il y a lieu pour satisfaire les temps courts d'introduire une valeur fictive de masse volumique de pont thermique. La modification de ce paramètre permet dans ce dernier cas de rapprocher le comportement dynamique de l'équivalent paroi (1D) de celui de la paroi réelle (2D) avec son pont thermique ainsi que de conserver la consommation énergétique de la paroi réelle, ce qui était le but initial recherché.

Il faut cependant remarquer que cette étude a été menée sur un seul type de pont thermique (cas de la liaison plancher intermédiaire-mur extérieur) et qu'il serait nécessaire de l'étendre à d'autres ponts thermiques du même type.

Au cours de cette étude seule la période de chauffe pendant l'hiver a été traitée. Il serait intéressant de l'étendre à la période estivale.

La partie à approfondir en premier lieu serait certainement celle correspondant à la famille des ponts thermiques en contact avec le sol en analysant quelques points précis comme:

- le passage en trois dimensions pour pouvoir étudier des bâtiments autre que linéaires (dont une des dimensions est considérée comme infiniment grande) ;
- la variation de la conductivité thermique et de la température du sol en fonction de la profondeur ;
- l'influence des conditions aux limites pour le sol ;
- la nature de l'isolant (épaisseur, dimension, conductivité thermique....) ;
- le choix d'une température intérieure variable.

La finalité de l'étude serait d'appliquer ces équivalents parois à un bâtiment entier et de faire une comparaison des consommations avec la prise en compte classique des ponts thermiques.

BIBLIOGRAPHIE

- [Ajali et al., 1999] M.H. ADJALI, M. DAVIES, C. NI RIAIN, J.G. LITTLER
In situ measurements and numerical simulation of of heat transfer beneath a heated ground floor slab.
Energy and Buildings, Vol 33, pp 75-83, (2000)
- [Ben- Nakhi, E., 2002] ABDULLATIF E. BEN-NAKHI.
Minimizing thermal bridging through window systems in buildings of hot regions.
Applied Thermal Engineering, Vol 22, pp 989-998, (2002)
- [Deque et al., 2001] F. DEQUE, F.OLLIVIER, J.J. ROUX
Effect of 2D modelling of thermal bridges on the energy performances of buildings. Numerical application on the matisse apartment.
Energy and buildings, Vol 33, pp 583-587, (2001)
- [Fourès et al., 2004] J.C FOURES, A. TROMBE, B. LACARRIERE
Consommations énergétiques de ponts thermiques : présentation de la problématique.
6ème journée TRNSYS, 8 Mars 2004, Sophia-Antipolis.
- [Hassid, 1989] S. HASSID
Thermal bridges in homogeneous walls : A simplified approach.
Building and Environment, Vol 24, pp 258-264, (1989)
- [Hassid, 1990] S. HASSID
Thermal bridges across multilayer walls : An integral approach.
Building and Environment, Vol 25, n°2, pp 143-150, (1990)
- [Mao et al., 1997] G. MAO., G. JOHANESSON.
Dynamic calculation of thermal bridges
Energy and buildings, Vol 26, pp 233-240, (1997)
- [Mingfang et al., 1997] T. MINGFANG, C. QIGAO
A simple expression for internal surface temperature distribution in corners of external walls.
Building and Environment, Vol 32, n° 4, pp 313-316, (1997)
- [Norme EN ISO 1370, 1999]
[NORME EN ISO 1370]
Norme européenne NF EN ISO 13370 : Performance thermique des bâtiments, transfert de chaleur par le sol. Méthode de calcul (1999)
- [Norme NF X 10-021, 1972]
Détermination de la de la conductivité thermique
Norme NF, (1972)

- [Norme NF EN ISO 10211-1, 1995]
Ponts thermiques dans le Bâtiment – Flux de chaleur et températures superficielles.
Partie 1 : Méthode générale de calcul.
Norme NF EN ISO 102 11-1, (1995)
- [Norme NF EN ISO 10211-2, 1995]
Ponts thermiques dans les bâtiments.
Partie 2 : Calcul des ponts thermiques linéaires.
Norme NF EN ISO 10211-2, (1995)
- [Pouvreau et al., 2002] J.M. POUVREAU, J. MAYET, A. TROMBE
Propriétés thermiques de matériaux.
Convention ADEME - ICO (2002)
- [Rogez et al., 1992] J. ROGEZ, J. LE COZE
Mesure des températures
Technique de l'Ingénieur, traité Mesure et Contrôle, R2515_01, Vol RC 2
(1992)
- [Roux et al., 2004] J.J. ROUX, F. COYDON, Y. GAO
Traitement numérique de composants 2D et 3D dans les codes du comportement thermo-aéraulique des Bâtiments.
Journée thématique SFT « Groupe Génie Climatique », Toulouse, 4 mars
(2003)
- [RT2000, 2000] Nouvelle réglementation Thermique 2000
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (2000).
- [Sarkis et al., 1987] B.L. SARKIS and K.M. LETHERMAN.
Heat flow rates and temperature distributions in corners of external walls with non-isothermal surfaces.
Building and Environment, Vol 22(4), pp 251-258, (1987)
- [Spagnol, 2004] S. SPAGNOL
Etude d'un équivalent paroi de pont thermique
DEA Energétique et Transfert (2004).
- [Spagnol et al., 2004] S. SPAGNOL, J.C FOURES, D. FOUQUET, B. LACARRIERE, , A. TROMBE
Proposition d'un équivalent paroi de pont thermique.
Quatrième conférence IBPSA-France, 7-8 octobre 2004, Toulouse.
- [Tang et al., 1998] D.TANG and G.S. SALUJA
Analytic analysis of heat loss from corners of buildings.
International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol 41(4-5), pp 681-689,
(1998)

ANNEXES

ANNEXE 1 : CONFECTION DU PONT THERMIQUE EXPERIMENTAL

1. CONFECTION DE L'ÉPROUVETTE

La confection de l'éprouvette du pont thermique expérimentée est une opération délicate. Plusieurs difficultés sont à résoudre:

- quelles sont les dimensions à choisir ?
- quels sont les matériaux à utiliser ?
- où placer les capteurs de température ?

- **Nombre d'éprouvettes**

Pour l'étude et la détermination des caractéristiques des matériaux, nous avons besoin de plusieurs éprouvettes:

- une éprouvette en forme de "T" qui recrée la liaison refend-mur extérieur ;
- deux éprouvettes parallélépipédiques composées seulement de la base de l'éprouvette précédente pour la mesure de la conductivité thermique ;
- six éprouvettes prismatiques pour la mesure de la masse volumique.

- **Dimensions des éprouvettes**

En ce qui concerne l'éprouvette instrumentée en forme de "T", nous avons choisi de diviser les dimensions réelles d'un pont thermique par 4 pour pouvoir manipuler facilement l'éprouvette et pour pouvoir la placer dans le dispositif expérimental existant.

La base de l'éprouvette représentant le mur extérieur a pour dimensions 50 * 50 * 5 (cm), sur laquelle est placé un autre parallélépipède reproduisant le refend qui a pour dimensions 50 * 25 * 5. Vient ensuite s'ajouter 2 cm d'isolant sur le mur côté intérieur (au lieu de 8 [cm] en réalité). La figure 2.2 du chapitre 2 montre les dimensions de l'éprouvette en béton sans l'isolant.

Les deux éprouvettes utilisées pour la mesure de la conductivité ne comportent que la base de l'éprouvette précédente et ont pour dimensions 50 * 50 * 5. Les six prismes pour la mesure de la masse volumique ont pour dimensions 4 * 4 * 16.

- **Matériaux utilisés**

On utilise du mortier normalisé pour la confection des éprouvettes. Le tableau A 1.1 rappelle le dosage de ce mortier et les matériaux utilisés.

| Composants | Dosage normalisé [kg.m ⁻³] |
|---------------------|---|
| Sable de Garonne | 1350 |
| Ciment CEM I 52.5 R | 450 |
| Eau | 225 |

Tableau A 1.1 : Dosage pour un mortier normalisé

Après la confection du mortier et le coulage des éprouvettes, les éprouvettes sont séchées à l'air libre pendant 20 jours. Leur séchage est achevé par 7 jours à l'étuve à 40°C.

Pour l'isolant intérieur, on utilise un polystyrène expansé dont les caractéristiques sont connues Tableau A1.2 ci-après. Celui-ci est collé directement sur le mortier (cf. Tab. A 1.2)

| Polystyrène expansé | |
|--|-------|
| Conductivité thermique [$\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | 0.035 |
| Chaleur massique [$\text{J. kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | 1450 |
| Masse volumique [kg. m^{-3}] | 33 |

Tableau A 1.2 : Dosage pour un mortier normalisé

- **Capteurs de température**

L'éprouvette en forme de "T" est instrumentée grâce à des thermocouples de type K: 50 thermocouples sont coulés dans le mortier lors de sa confection et 19 thermocouples sont placés en surface du mortier. La figure 2.4 du chapitre 2 montre l'emplacement exact de certains thermocouples.

Les thermocouples sont coulés à l'intérieur du mortier et sont fixés sur des tiges en verre (diamètre 4mm pour les tiges rectilignes et 7mm pour la tige en forme de croix) de manière à assurer leur positionnement lors de la mise en place du mortier dans les moules. Le verre a été choisi comme matériau pour sa conductivité thermique très proche de celle du mortier ($\lambda_{\text{verre}} = 1.14 \text{ W. m}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Les thermocouples ont été étalonnés avant la mise en place dans et sur l'éprouvette. L'étalonnage consiste à associer à des valeurs parfaitement déterminées de mesurande, en l'occurrence la température, les valeurs correspondantes de la grandeur électrique de sortie. Pour cela, on utilise un capteur de référence (sonde étalon en platine) dont on possède la courbe d'étalonnage et dont on est assuré de la stabilité.

La sonde et les thermocouples sont plongés dans un bain thermostaté. On relève la valeur de la résistance de la sonde qui est directement traduite par une température de référence grâce à la courbe d'étalonnage. On relève ensuite les valeurs de températures indiquées pour tous les thermocouples. On répète cette manipulation pour plusieurs températures de consigne du bain thermostaté. Pour chaque thermocouple, on détermine alors une équation caractéristique du capteur de la forme :

$$T_{\text{ref}} = a * T_{\text{thermo}} + b$$

- a et b sont les coefficients déterminés grâce à l'étalonnage ;
- T_{thermo} est la température indiquée par le thermocouples ;
- T_{ref} est la température de référence de la sonde étalon.

On estime alors à $\pm 0.3^\circ\text{C}$ l'incertitude sur la mesure des températures (chaîne de mesure comprise), sur la plage qui nous intéresse.

2. MESURE DE LA MASSE VOLUMIQUE REELLE DU MORTIER

La masse volumique du mortier est déterminée par pesée hydrostatique. L'essai consiste à déterminer la masse d'un corps d'épreuve sec et la masse lorsqu'il est saturé en eau par pesée dans l'eau.

- Etape 1 : On commence par placer les six prismes éprouvettes dans un dessiccateur. On y fait le vide, puis on immerge les éprouvettes de mortier et on refait le vide. L'eau pénètre alors les pores ouverts et les éprouvettes sont saturées en eau ;
- Etape 2 : On procède à la pesée hydrostatique des éprouvettes de mortier et on obtient m_{eau} . Celles-ci sont suspendues à une balance et immergées dans un récipient rempli d'eau ;
- Etape 3 : On place les six prismes dans une étuve à 80°C pendant une semaine jusqu'à séchage complet ;
- Etape 4 : On pèse les six éprouvettes séchées à l'air et on obtient m_{air} ;

On obtient la masse volumique réelle du mortier à partir de la formule suivante:

$$\rho_{\text{mortier}} = \rho_{\text{eau}} \times \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{air}} - m_{\text{eau}}}$$

- ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau et est égale à 999.6 kg. m⁻³ pour une température de l'eau égale à 18.6 °C.

Le tableau A 1.3 montre les résultats obtenus pour m_{air} , m_{eau} et ρ_{mortier} , pour les six éprouvettes.

| Eprouvettes | Masse dans l'air m_{air} [kg] | Masse dans l'eau m_{eau} [kg] | Masse volumique ρ_{mortier} [kg. m ⁻³] |
|-------------|---|---|---|
| 1 | 537,75 | 330,32 | 2591 |
| 2 | 537,11 | 329,52 | 2586 |
| 3 | 550,63 | 337,22 | 2579 |
| 4 | 544,09 | 333,22 | 2579 |
| 5 | 547,42 | 336,21 | 2592 |
| 6 | 547,6 | 335,67 | 2583 |

Tableau A 1.3 : Résultats de l'essai pour la mesure de la masse volumique du mortier par pesée hydrostatique

On fait la moyenne des six masses volumiques obtenues et on obtient au final $\rho_{\text{mortier}} = 2585$ kg. m⁻³ pour un écart type de 12.84.

3. MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DU MORTIER

La conductivité thermique du mortier normalisé est déterminée à l'aide de la méthode de la plaque chaude gardée avec échantillons symétriques. La norme NF 10-021 [Norme NF 10-021, 1972] détaille le principe et le déroulement de l'essai.

L'apport d'énergie se fait par une source thermique dite "plaque chaude gardée". Un flux thermique constant avec plans isothermes parallèles est entretenu à travers deux éprouvettes de mortier (50 * 50 * 5) situées de part et d'autre de la plaque chaude gardée. L'énergie ayant traversé les éprouvettes est alors dissipée par deux plaques froides situées de part et d'autre des éprouvettes.

L'énergie apportée en régime permanent à la plaque chaude est mesurée. On détermine aussi le gradient de température dans les éprouvettes à l'aide de thermocouples placés à la surface des éprouvettes. La conductivité thermique du mortier est alors donnée par la formule suivante:

$$\lambda_{\text{mortier}} = \frac{\Phi \times e}{S \times \Delta T}$$

- λ_{mortier} est exprimé en $[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}]$;
- Φ est le flux de chaleur en $[\text{W}]$ égal à la moitié de la puissance électrique dissipée dans la plaque chaude ;
- e est l'épaisseur de l'éprouvette = 5 cm ;
- S est la surface de la zone de mesure en $[\text{m}^2]$;
- ΔT est le gradient de température dans l'éprouvette.

On trouve pour notre mortier une valeur égale à $1.49 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Remarque

En ce qui concerne la chaleur massique du mortier, celle-ci n'a pas été déterminée expérimentalement. On la prendra donc égale à $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ valeur proposée par la RT 2000 et qui reste quasiment constante d'un mortier à l'autre.

ANNEXE 2 : CALCUL DES FLUX SUR LES DIFFERENTS PLANS INCLINES

Repérage du lieu :

- φ : Latitude

Repérage du soleil :

- Par rapport au plan horizontal
 - H : hauteur : angle de la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal ;
 - A : azimut : angle de la direction Nord - Sud avec la projection verticale de la direction du soleil.
- Par rapport au plan de l'écliptique (équateur céleste)
 - AH : Angle Horaire : angle du plan du méridien et du cercle horaire ;
 $AH = (t-12) \cdot 15$ en degrés
 $t = \text{heure solaire} = 12 \text{ à midi solaire}$
 - δ : déclinaison : donnée par : $\delta = 23,45 \sin [360/365 \cdot (j+285)]$ et $j = n^\circ$ du jour.

Repérage du plan de projection :

- α : angle de la projection horizontale de la normale au plan considéré avec l'axe N-S ;
- γ : angle de la normale au plan considéré avec le plan horizontal.

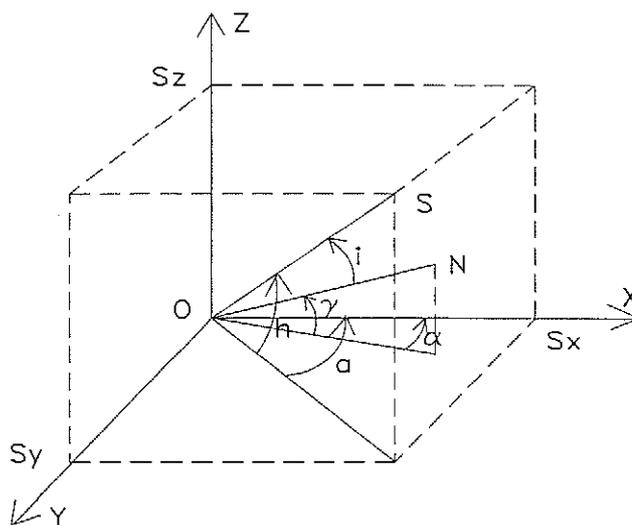


Figure A 2.1 : Détermination de l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur un plan quelconque

Calcul de la hauteur du soleil

- $\sin h = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos AH + \sin \delta \cdot \sin \varphi$

Calcul de l'angle d'incidence du rayonnement direct

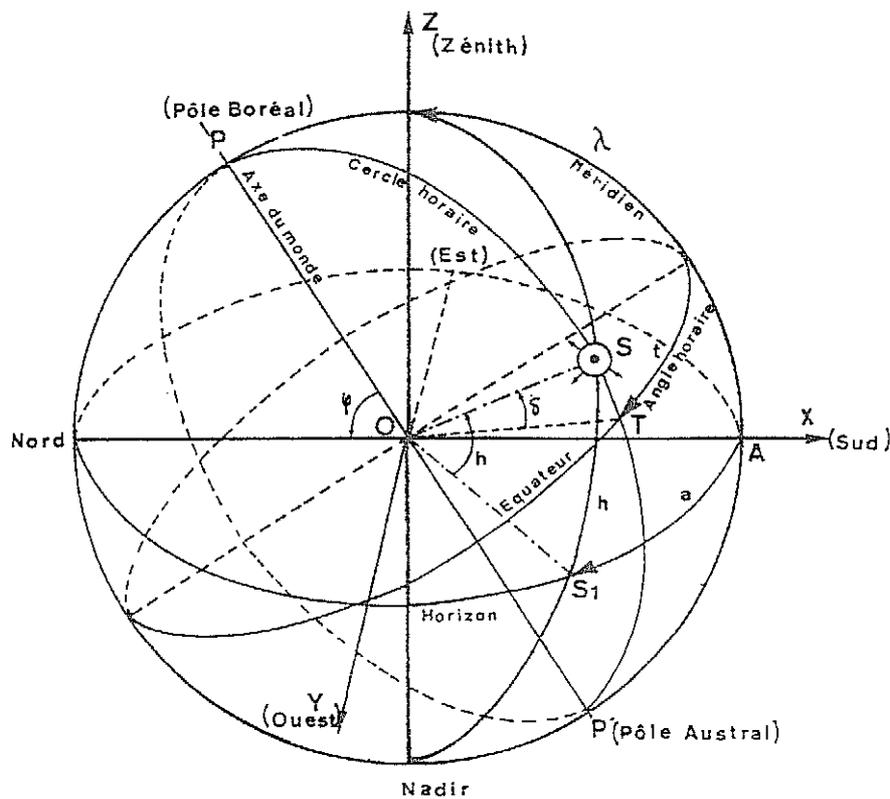
- $\cos i = \cos \alpha \cdot \cos \gamma (\cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos AH - \sin \delta \cdot \cos \varphi)$
 $+ \sin \alpha \cdot \cos \gamma (\cos \delta \cdot \sin AH) + \sin \gamma (\cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos AH + \sin \delta \cdot \sin \varphi)$

Calcul de l'ensoleillement global sur un plan quelconque

- $G(\alpha, \gamma) = I_H \cdot \cos i / \sin h + D_H / 2 \cdot [1 + \cos (\pi/2 - \gamma)] + G_H / 2 \cdot \text{Alb} \cdot [1 - \cos (\pi/2 - \gamma)]$

Avec :

- I_H : Direct horizontal ;
- D_H : Diffus horizontal ;
- G_H : global horizontal ;
- Alb : Albédo (coefficient de réflexion du sol).



Géométrie du rayonnement solaire
(observateur au centre de la sphère)

Figure A 2.2

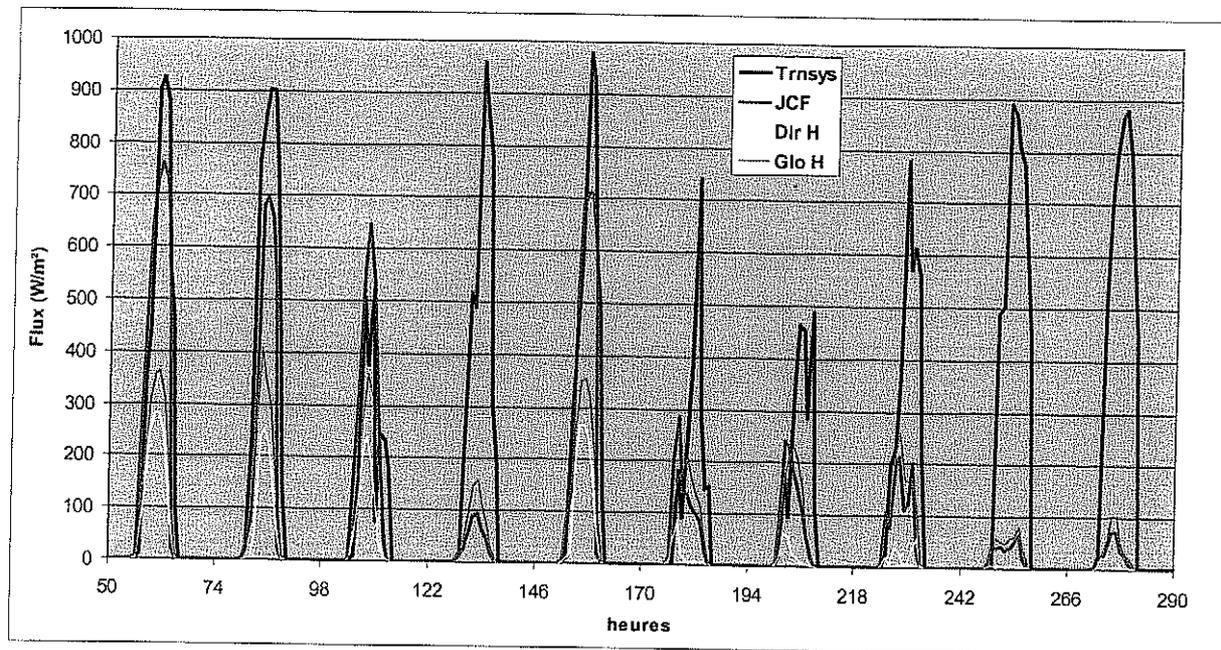


Figure A 2.3 : Comparaison des valeurs calculées TRNSYS - Méthode INSA

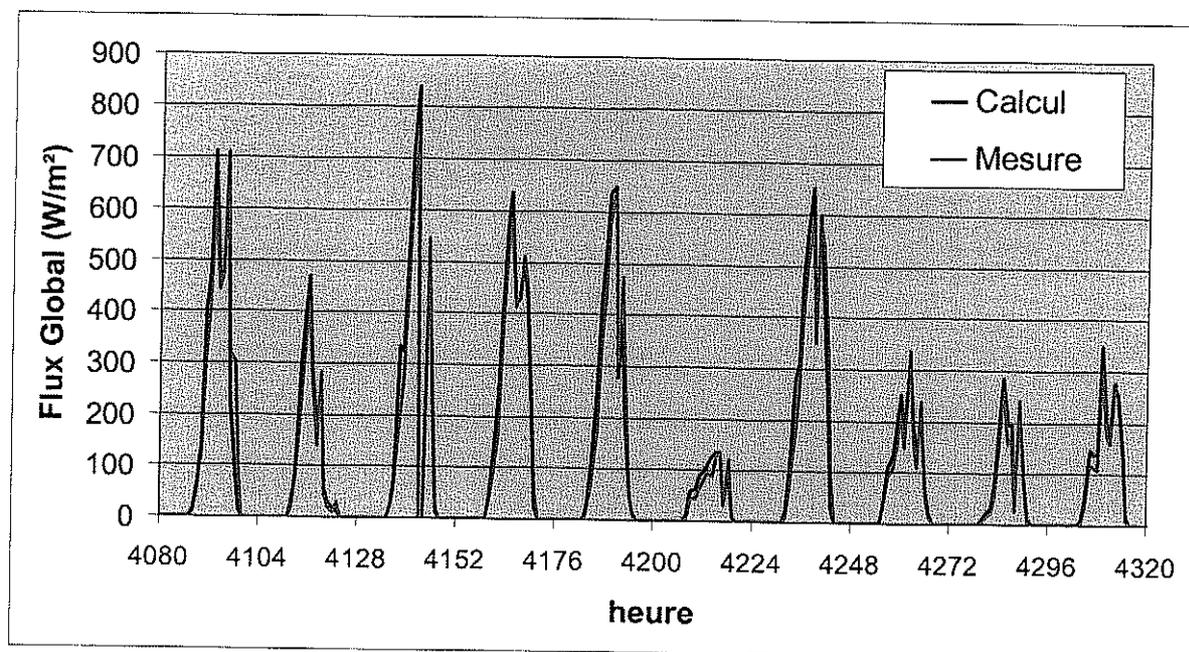


Figure A 2.4 : Comparaison « Mesure - Calcul » Plan vertical orienté SSO

Les Pradettes – Toulouse