

THERMIQUE ETE BOIS

Sous tâche 2.2 : Ponts thermiques

Rédaction : Thomas Garnesson, Stéphanie Decker

Date : 01/03/2017

Version : Finale

CONTENU

ILLUSTRATIONS	3
TABLEAUX	5
Chapitre 1 : TRAVAIL PREPARATOIRE	8
Introduction.....	8
Partie 1 : Etude des Règles Th-I.....	9
1. Introduction.....	9
2. Critère de confort d'été.....	9
3. Calcul des paramètres d'inertie	13
4. Conclusion	20
Partie 2 : Etude de la norme NF EN ISO 13786.....	22
1. Introduction.....	22
2. Méthode des quadripoles	23
3. Capacité thermique surfacique	25
4. Méthodes simplifiées	26
5. Cas des murs à ossature bois	27
6. Conclusion	28
Partie 3 : Modelisation sous VOLTRA et EnergyPlus	30
1. Méthodologie adoptée.....	30
2. Description du cas d'étude.....	31
3. Etude paramétrique	36
4. Analyse de sensibilité	44
Conclusion et synthèse sur les perspectives d'évolution.....	55
Chapitre 2 : PROPOSITION DE PRISE EN COMPTE DE L'OSSATURE	56
Introduction.....	56
Partie 1 : Calcul des parametres d'inertie	57
1. Introduction.....	57

2. Inertie quotidienne.....	59
3. Inertie séquentielle	71
4. Calcul de points d'inertie.....	82
Partie 2 : Etude de l'impact sur les indicateurs réglementaires.....	83
1. Introduction.....	83
2. Cas d'étude.....	84
3. Gain d'inertie à l'échelle paroi	91
4. Gain d'inertie à l'échelle bâtiment.....	96
5. Impact sur Bbio et Tic.....	101
6. Conclusion	108
Conclusion	109
Références.....	110

ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : Schéma RC du modèle de comportement thermique d'un groupe, Méthode Th-BCE .	10
Illustration 2 : Schéma descriptif du modèle de comportement d'un groupe selon la méthode Th-BCE, Julie Duchatelle	11
Illustration 3 : Quadripôle représentatif d'un mur, Sambou Vincent	24
Illustration 4 : Représentation d'un mur par des impédances, Sambou Vincent	24
Illustration 5 : Simplification courante des parois à ossature bois pour application de la norme NF EN ISO 13786	28
Illustration 6 : Modèle géométrique simplifié de bâtiment virtuel.....	30
Illustration 7 : Local étudié et contact avec un espace tampon.....	32
Illustration 8 : Détails des compositions des parois du local et de l'espace tampon.....	33
Illustration 9 : Evolution du rayonnement global horizontal	35
Illustration 10 : Evolution du rayonnement diffus horizontal.....	35
Illustration 11 : Evolution de la température extérieure	36
Illustration 12 : Réponse en température du modèle 1 pour les différents scénarios	38
Illustration 13 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario A (sans ventilation / sans apports internes / SUD).....	39
Illustration 14 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario B (ventilation base / sans apports internes / SUD).....	39
Illustration 15 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario C (ventilation base et naturelle / sans apports internes / SUD).....	40
Illustration 16 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario D (sans ventilation / sans apports internes / OUEST).....	40
Illustration 17 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario E (ventilation base et naturelle / apports internes / SUD).....	40
Illustration 18 : Températures maximales obtenues pour les différentes configurations calculées....	41
Illustration 19: Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario A	41
Illustration 20 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario B	42
Illustration 21 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario C	42

Illustration 22 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario D	42
Illustration 23 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario D	43
Illustration 24 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario A (sans ventilation / sans apports internes / SUD).....	43
Illustration 25 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario A (sans ventilation / sans apports internes / SUD)- Zoom 20 et 21 juin	44
Illustration 26 : Classement des méthodes d'analyse de sensibilité (d'après looss 2011)	46
Illustration 27 : Indices PRCC des paramètres d'un logement appliqués aux besoins de chauffage....	47
Illustration 28 : Courbe normale asymétrique calibrée sur des besoins de chauffage.....	47
Illustration 29 : Configurations de base permettant de déterminer les paramètres à étudier	48
Illustration 30 : Détail des 17 paramètres choisis et de leur plage de variation.....	49
Illustration 31 : Courbe normale asymétrique calibrée sur l'écart de température maximale observé entre les deux modèles	49
Illustration 32 : Comparaison classement des indices de Sobol avec les indices PRCC	50
Illustration 33 : Visualisation des indices PRCC pour les 17 paramètres	50
Illustration 34 : Sélection de 10 paramètres parmi les 17 paramètres préalablement étudiés.	52
Illustration 35 : Courbe normale asymétrique calibrée sur l'écart de température maximale observé entre les deux modèles	52
Illustration 36 : Visualisation des indices PRCC pour les 10 paramètres	53
Illustration 37 : Simplification courante des parois à ossature bois	57
Illustration 38 : Type de mur retenu pour application de la méthodologie proposée, catalogue-construction-bois.fr	64
Illustration 39 : Modélisation sous COMSOL du MOB avec ossature	65
Illustration 40 : Simplification par décomposition d'une paroi à ossature bois	66
Illustration 41 : Calcul des capacités thermiques séquentielles des parties « isolant » et « ossature »	80
Illustration 42 : Cas d'étude « maison individuelle », catalogue-construction-bois.fr	84
Illustration 43 : Caractéristiques de la porte d'entrée, Pléiades.....	85
Illustration 44 : Caractéristiques de la porte donnant sur le garage, Pléiades	85

Illustration 45 : Caractéristiques des portes-fenêtres, Pléiades	85
Illustration 46 : Caractéristiques des fenêtres, Pléiades	86

TABLEAUX

Tableau 1 : Détermination des paramètres <i>Cm</i> et <i>Am</i> en fonction de la classe d'inertie quotidienne, Règles Th-I	13
Tableau 2 : Détermination de la classe d'inertie quotidienne par la méthode forfaitaire, Règles Th-I	14
Tableau 3 : Détermination de la classe d'inertie quotidienne par la méthode à points, Règles Th-I ...	14
Tableau 4 : Points d'inertie de parois courantes de mur, Règles Th-I.....	15
Tableau 5 : Points d'inertie des parois de distribution et de cloisonnement, Règles Th-I.....	16
Tableau 6 : Détermination de la classe d'inertie quotidienne par la méthode par calcul, Règles Th-I.	17
Tableau 7 : Détermination du paramètre <i>Cms</i> en fonction de la classe d'inertie séquentielle, Règles Th-I.....	18
Tableau 8 : Détermination de la classe d'inertie séquentielle par la méthode forfaitaire, Règles Th-I	18
Tableau 9 : Détermination de la classe d'inertie séquentielle par la méthode par « points d'inertie », Règles Th-I	19
Tableau 10 : Détermination de la classe d'inertie séquentielle par la méthode par calcul, Règles Th-I	19
Tableau 11 : Exemple pour lequel le passage par la classe d'inertie séquentielle mène à sous-estimer l'apport d'inertie	20
Tableau 12 : Exemple de saut pour la valeur de <i>Cms</i>	20
Tableau 13 : Caractéristiques de l'exemple 1 de la norme NF EN ISO 13786.....	61
Tableau 14 : Comparaison résultats NF EN ISO 1386 et MEF pour l'exemple 1	62
Tableau 15 : Caractéristiques de l'exemple 2 de la norme NF EN ISO 13786.....	62
Tableau 16 : Comparaison résultats NF EN ISO 1386 et MEF pour l'exemple 2	63
Tableau 17 : Caractéristiques de la composition de mur retenue pour application des méthodes proposées.....	64
Tableau 18 : Caractéristiques du bois d'ossature	64
Tableau 19 : Comparaison résultats NF EN ISO 1386 et MEF pour le MOB sans ossature	65

Tableau 20 : Comparaison résultats MEF pour le MOB sans et avec ossature	66
Tableau 21 : Capacités thermiques périodiques pour les parties « isolant » et « ossature » de la paroi bois	67
Tableau 22 : Vérification de la justesse de la méthode par décomposition	67
Tableau 23 : Propriétés des parties « ossature » et « isolant » et de la couche équivalente	68
Tableau 24 : Vérification de la justesse de la méthode de la couche équivalente	69
Tableau 25 : Epaisseur efficace maximale en fonction de la période des variations, NF EN ISO 1378673	
Tableau 26 : Valeurs de la diffusivité thermique pour plusieurs matériaux	73
Tableau 27 : Propriétés retenue pour la couche d'isolant d'épaisseur considérée infinie	75
Tableau 28 : Valeurs de la capacité thermique séquentielle obtenues selon plusieurs méthodes pour l'exemple 1 de la NF EN ISO 13786	77
Tableau 29 : Valeurs de la capacité thermique séquentielle obtenues par calcul matriciel et MEF pour un mur béton de 2 m d'épaisseur	78
Tableau 30 : Capacités thermiques séquentielles des parties homogènes de la paroi de forte épaisseur	78
Tableau 31 : Comparaison des capacités thermiques séquentielles obtenues pour la paroi complète par MEF et par décomposition	79
Tableau 32 : Gain en inertie dû à l'application de la méthode par décomposition proposée	81
Tableau 33 : Variantes de murs extérieurs	87
Tableau 34 : Caractéristiques de la toiture	87
Tableau 35 : Variantes de planchers bas	88
Tableau 36 : Caractéristiques du mur intérieur	88
Tableau 37 : Variantes de planchers intermédiaires	89
Tableau 38 : Caractéristiques des éléments d'ossature	89
Tableau 39 : Configurations de la maison individuelle	90
Tableau 40 : Capacité thermique quotidienne des murs extérieurs	91
Tableau 41 : Capacité thermique séquentielle des murs extérieurs	91
Tableau 42 : Capacité thermique quotidienne de la toiture	92
Tableau 43 : Capacité thermique séquentielles de la toiture	92
Tableau 44 : Capacité thermique quotidienne du plancher bas bois	92

Tableau 45 : Capacité thermique séquentielle du plancher bas bois	93
Tableau 46 : Capacités thermiques du plancher bas béton	93
Tableau 47 : Capacité thermique quotidienne du mur intérieur	93
Tableau 48 : Capacité thermique séquentielle du mur intérieur	93
Tableau 49 : Capacité thermique quotidienne des planchers intermédiaires	94
Tableau 50 : Capacité thermique séquentielle des planchers intermédiaires.....	94
Tableau 51 : Impact de la prise en compte des ossatures bois à l'échelle bâtiment.....	97
Tableau 52 : Impact sur les indicateurs réglementaires de la prise en compte des éléments d'ossature	102

CHAPITRE 1 : TRAVAIL PREPARATOIRE

INTRODUCTION

Le projet Thermique d'Été Bois tente de répondre aux besoins réels des professionnels de la filière bois et vérifie que les outils de calculs réglementaires sont bien appropriés aux bâtiments à ossature bois et si ce n'est pas le cas proposer une méthode plus appropriée pour le calcul d'inertie dans les règlements thermiques, avec la mise en avant des paramètres spécifiques au système d'ossature bois : comportement dynamique des parois ossature bois, existence de lame d'air, capacité de stockage et restitution d'humidité, composition en série de multiple matériaux.

Le projet thermique d'été se décompose en 3 tâches :

- Tâche 1 : Application des méthodes existantes
- Tâche 2 : Evolution des méthodes
- Tâche 3 : Synthèse des impacts globaux

La première tâche du projet a consisté à réaliser un état des lieux du comportement des bâtiments à ossature bois en confort d'été vu par la réglementation thermique actuelle. En se basant sur un recensement de différentes parois et bâtiments ossature bois associé à une collecte des données, un grand nombre de configurations de bâtiments a été modélisé à l'aide d'un logiciel de calcul RT pour des maisons individuelles ainsi que pour des bâtiments collectifs. Puis, un focus a été fait sur deux des paramètres les plus impactant en termes de confort estival : l'inertie du bâtiment et les apports solaires. Ce travail se traduit par une étude paramétrique dédiée aux spécificités des constructions à ossature bois au regard des Règles Th-I et Th-S de la RT 2012.

La première partie de ce document s'attache à présenter une partie du travail de la sous tâche 2.2 réalisé dans le cadre de la tâche 2 : évolution des méthodes. La sous tâche 2.2 s'intéresse à la prise en compte de l'inertie thermique apportée par les montants bois des bâtiments à ossature. L'objectif est de proposer des méthodes de prise en compte adaptées à la RT 2012. Cette sous tâche se décompose en deux parties. La première, présentée dans cette première partie, est un travail préparatoire qui consiste à étudier les règles de calcul de l'inertie relatives à la réglementation thermique. Elle vise également l'évaluation, à partir de simulations numériques, du gain que pourrait apporter la prise en compte de l'inertie des ossatures bois vis-à-vis du confort estival.

Ce travail préparatoire débute par l'étude des Règles Th-I de la RT 2012 qui traitent de la caractérisation de l'inertie des bâtiments. L'objectif est ici d'analyser les méthodes de calculs proposées vis-à-vis des bâtiments à ossature bois. Cette première partie se poursuit par l'étude la norme NF EN ISO 13786 qui est à la base de la méthode de détermination de l'inertie par calcul proposée dans les Règles Th-I. Cette première partie se termine par la présentation des résultats de simulations numériques effectuées sur un local à ossature bois suivant plusieurs configurations et scénarii. L'objectif étant d'évaluer l'impact sur le confort estival de la prise en compte de l'inertie de l'ossature bois.

1. INTRODUCTION

Les Règles Th-I portent sur la caractérisation de l'inertie thermique des bâtiments. Ces règles permettent la détermination des classes d'inertie qui sont des données d'entrée dans les méthodes Th-C et Th-E. Ces méthodes permettent respectivement le calcul de la consommation d'énergie d'un bâtiment et le calcul de la température intérieure atteinte en été dans un bâtiment non climatisé.

Cette étude des Règles Th-I a pour objectif d'analyser la manière dont les éléments d'ossature des parois bois sont pris en compte pour le calcul des paramètres d'inertie. Ceux-ci sont nécessaires à la vérification selon la méthode Th-E de l'exigence sur le confort d'été de la RT2012. Ce critère sur le confort d'été est dans un premier temps présenté. Ensuite, les méthodes de calcul des paramètres d'inertie sont décrites et des observations sont faites en rapport avec la prise en compte des éléments d'ossature.

2. CRITERE DE CONFORT D'ETE

La RT2012 impose le respect d'une exigence sur le confort estival. Celle-ci consiste à obtenir une température intérieure conventionnelle T_{ic} n'excédant pas la référence $T_{ic_{ref}}$.

$$T_{ic} \leq T_{ic_{ref}}$$

La méthode Th-E décrite au chapitre 15.1 des règles Th-BCE permet le calcul de la T_{ic} . La température intérieure conventionnelle est définie comme étant la température opérative¹ la plus élevée atteinte lors de la journée la plus froide parmi les cinq plus chaude de l'année pour un site donné. Le calcul de l'évolution de la température intérieure est mené sur quatre semaines consécutives. Les caractéristiques climatiques de la zone étudiée, les caractéristiques liées à l'usage du groupe ainsi que les caractéristiques de l'enveloppe sont les données nécessaires à l'étude de l'évolution de la température.

2.1. Détermination de la température opérative intérieure

La première étape consiste à déterminer au pas de temps horaire l'évolution de la température opérative intérieure sur la durée de l'étude. Le chapitre 7.23 des règles Th-BCE définit le modèle du comportement thermique d'un groupe. Il s'agit d'un modèle dynamique fondé sur des simplifications du transfert de chaleur entre les environnements intérieurs et extérieurs. Une représentation du modèle basé sur l'analogie électrique peut être admise sous la forme d'un réseau résistance-condensateur (RC) comme présenté en suivant.

¹ Température opérative : Température définie comme étant la moyenne des températures de l'air et des surfaces intérieures des parois.

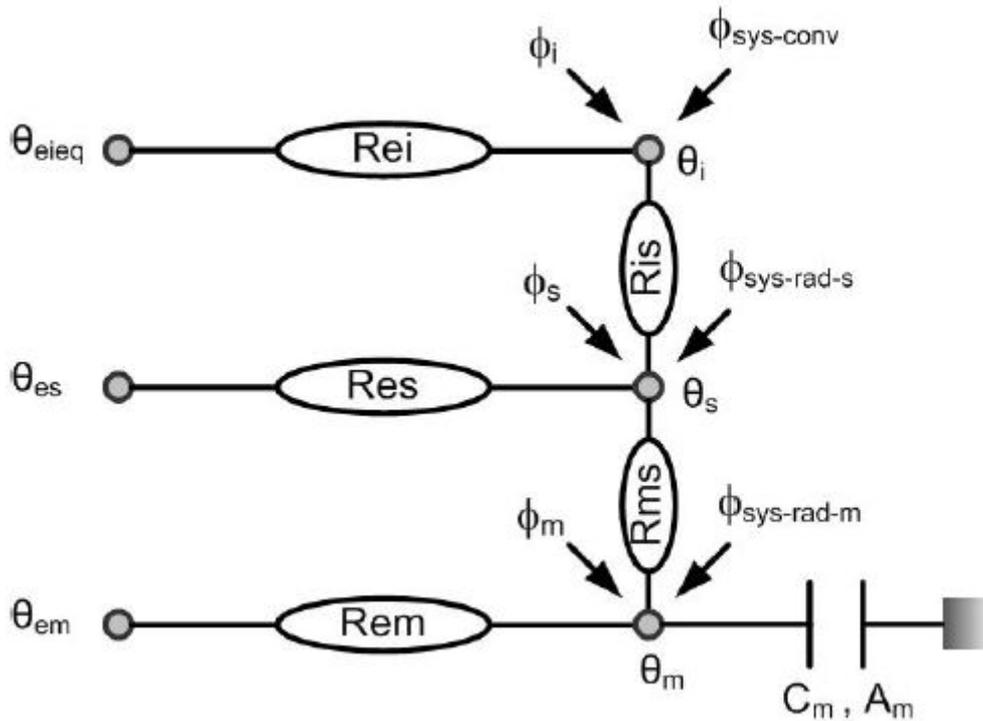


Illustration 1 : Schéma RC du modèle de comportement thermique d'un groupe, Méthode Th-BCE

Où :

θ_{eieq} , θ_{es} et θ_{em} sont des températures extérieures équivalentes correspondant respectivement à la température de l'air entrant dans le groupe en provenance de l'extérieur et d'autres groupes, à la température des baies et à la température des parois opaques

θ_i , θ_s et θ_m sont des nœuds de température correspondant respectivement à l'air intérieur, à la surface intérieure des parois et à la surface extérieure des parois

ϕ_i , ϕ_s et ϕ_m sont des flux de chaleur respectivement le flux de chaleur convectif au nœud d'air θ_i dû aux sources internes et aux apports de chaleur convectifs dus à la lame d'air intérieure ventilée du vitrage, le flux de chaleur radiatif au nœud θ_s dû aux sources internes et le flux de chaleur radiatif au nœud θ_m dû aux sources internes

$\phi_{sys-conv}$, $\phi_{sys-rad-s}$ et $\phi_{sys-rad-m}$ sont respectivement la puissance sensible totale convective émise par le ou les émetteurs du groupe, la puissance sensible totale radiative émise par le ou les émetteurs du groupe au nœud de température θ_s et la puissance sensible totale radiative émise par le ou les émetteurs du groupe au nœud de température θ_m

R_{ei} , R_{es} et R_{em} sont des résistances thermiques qui sont respectivement les inverses du facteur de transmission thermique dû au renouvellement d'air H_{ei} , du facteur de transmission thermique global pour les baies entre les environnements intérieurs et extérieurs H_{es} et du facteur de transmission thermique entre l'environnement extérieur et la surface intérieure des parois opaques H_{em}

R_{ms} et R_{is} sont des résistances thermiques qui sont respectivement les inverses du facteur de transmission thermique entre les surfaces internes et l'ambiance intérieure H_{ms} et du facteur de transmission thermique dû aux échanges internes par convection et rayonnement H_{is}

- $C_m \left[\frac{kJ}{K} \right]$: Capacité thermique quotidienne
- $A_m [m^2]$: Surface d'échange équivalente qui permet une agrégation des capacités thermiques quotidiennes à travers leurs surfaces active

Les méthodes de calcul pour la détermination de ces paramètres d'inertie sont données dans les Règles Th-I qui traitent de la caractérisation de l'inertie thermique des bâtiments. L'annexe 4 de ces règles traite en particulier de la prise en compte de l'inertie thermique dans la méthode Th-E.

2.2. Correction par la prise en compte de l'inertie séquentielle

Dans la première étape, seule l'inertie quotidienne est prise en compte. Ensuite, un correctif est apporté à l'évolution de la température opérative intérieure déterminée précédemment. Il permet la prise en compte de l'inertie thermique séquentielle du bâtiment qui caractérise l'effet de la variation de la température extérieure sur une période de douze jours. Le correctif correspond à un abaissement de la température noté *DTI* dont la détermination est donnée dans la méthode Th-E. Dans le calcul de cet abaissement le paramètre C_{ms} est utilisé.

- $C_{ms} \left[\frac{kJ}{K} \right]$: Capacité thermique séquentielle

Comme pour les paramètres caractérisant les effets de l'inertie thermique quotidienne, les Règles Th-I donnent les méthodes de calcul pour la détermination de la capacité thermique séquentielle notamment au travers de l'annexe 4 de ces règles.

2.3. Calcul de la température intérieure conventionnelle de référence

La méthode de calcul de la Tic_{ref} est identique à celle utilisée pour le calcul de la température intérieure conventionnelle. Seules les caractéristiques du bâtiment sont différentes. Celles à prendre en compte pour le calcul de la Tic_{ref} sont données dans l'annexe XI de l'arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments. Cette annexe indique que les caractéristiques à considérer sont celles utilisées pour le calcul du besoin bioclimatique (*Bbio*) du projet à l'exception des caractéristiques portant sur les points suivants :

- Masques proches
- Inerties quotidienne et séquentielle
- Caractère traversant
- Gestion des protections mobiles
- Facteur de transmission lumineuse
- Facteurs solaires des parois opaques, des ponts thermiques et des baies

3. CALCUL DES PARAMETRES D'INERTIE

Le calcul des paramètres relatifs à l'inertie thermique du bâtiment est nécessaire pour la détermination de la température intérieure conventionnelle. Deux types d'inertie sont considérés : l'inertie quotidienne et l'inertie séquentielle. L'approche adoptée par les Règles Th-I consiste à définir une classe d'inertie quotidienne ainsi qu'une classe d'inertie séquentielle qui sont utiles à la détermination des valeurs pour les paramètres d'inertie.

3.1. Inertie quotidienne

Les paramètres qui permettent la prise en compte de l'inertie quotidienne sont :

- $C_m \left[\frac{kJ}{K} \right]$: Capacité thermique quotidienne
- $A_m [m^2]$: Surface d'échange équivalente qui permet une agrégation des capacités thermiques quotidiennes à travers leurs surfaces active

La détermination de ces paramètres est effectuée selon les Règles Th-I et en particulier l'annexe 4 qui traite de la prise en compte de l'inertie thermique dans la méthode Th-E. Comme présenté dans le tableau suivant, la capacité quotidienne et la surface d'échange à considérer dépendent d'une classe d'inertie quotidienne et de la surface utile du bâtiment notée $A_{bât}$.

Tableau 1 : Détermination des paramètres C_m et A_m en fonction de la classe d'inertie quotidienne, Règles Th-I

Classe d'inertie quotidienne	Capacité quotidienne C_m (kJ/K)	Surface d'échange A_m (m ²)
Très légère	$80 \times A_{bât}$	$2,5 \times A_{bât}$
Légère	$110 \times A_{bât}$	$2,5 \times A_{bât}$
Moyenne	$165 \times A_{bât}$	$2,5 \times A_{bât}$
Lourde	$260 \times A_{bât}$	$3,0 \times A_{bât}$
Très lourde	$370 \times A_{bât}$	$3,5 \times A_{bât}$

La classe d'inertie quotidienne est calculée pour chaque niveau du bâtiment. La classe retenue est celle du niveau où elle s'avère être la plus défavorable. Cette classe dépend de l'inertie apportée par les parois, elle peut être « Très légère », « Légère », « Moyenne », « Lourde » ou bien « Très lourde ». La classe d'inertie quotidienne peut être déterminée selon une méthode forfaitaire, une méthode par « points d'inertie » ou encore par le calcul de C_m et A_m en considérant les capacités calorifiques surfaciques quotidiennes des parois χ_j définies selon la norme NF EN ISO 13786 qui traite des caractéristiques thermiques dynamiques des composants de bâtiment.

3.1.1. Méthode forfaitaire

La méthode forfaitaire permet de déterminer la classe d'inertie quotidienne en fonction de la caractérisation du plancher bas, du plancher haut et des parois verticales. Dans cette méthode, une paroi peut être considérée comme « Lourde » ou comme « Légère ». Le tableau suivant donne la classe d'inertie quotidienne en fonction de la caractérisation des parois.

Tableau 2 : Détermination de la classe d'inertie quotidienne par la méthode forfaitaire, Règles Th-I

Plancher bas	Plancher haut	Paroi verticale	Classe d'inertie
Lourd	Lourd	Lourde	Très lourde
-	Lourd	Lourde	Lourde
Lourd	-	Lourde	Lourde
Lourd	Lourd	-	Lourde
-	-	Lourde	Moyenne
-	Lourd	-	Moyenne
Lourd	-	-	Moyenne
-	-	-	Très légère

Comme le montre le tableau précédent, l'application de la méthode forfaitaire ne permet pas d'obtenir une classe d'inertie « Légère ». Une seule paroi dite « Lourde » suffit à obtenir une classe d'inertie « Moyenne ». Les parois à ossature bois sont considérées comme « Légères ». En effet, une paroi est classée « Lourde » uniquement lorsqu'elle met en œuvre une certaine quantité de béton ou de brique. Un travail sur la composition d'un mur à ossature bois de manière à en augmenter l'apport d'inertie ne serait pas valorisé par l'application de cette méthode. Un bâtiment à ossature bois se retrouvera donc le plus souvent avec une classe d'inertie « Très légère ». Toutefois, pour le niveau le plus défavorable, si le plancher bas est composé d'une chape béton d'au moins 5 cm avec un revêtement sans effet thermique², il est possible d'obtenir une classe d'inertie quotidienne « Moyenne ».

3.1.2. Méthode par « points d'inertie »

Par cette méthode, la classe d'inertie thermique quotidienne est déterminée en fonction du nombre de points d'inertie obtenus pour le niveau du bâtiment le plus défavorable. Chaque type de paroi, y compris le cloisonnement intérieur, est associé à un nombre de points d'inertie. Ces points s'expriment en $W/(K.m^2)$. Ils correspondent au rapport entre le flux échangé ramené à la surface au sol et la sollicitation en température intérieure. Dans cette méthode l'apport du mobilier est également pris en compte de manière forfaitaire. Le tableau présenté en suivant permet de déterminer la classe d'inertie quotidienne en fonction du nombre de points obtenus pour le niveau étudié.

Tableau 3 : Détermination de la classe d'inertie quotidienne par la méthode à points, Règles Th-I

Classe d'inertie	Très légère	Légère	Moyenne	Lourde	Très lourde
Points d'inertie avec mobilier	5 ou 6	7 ou 8	9 à 12	13 à 18	19 et plus

Le nombre de points d'inertie obtenu par une paroi peut-être déterminé de deux manières. La première consiste à faire appel à des tableaux de cotation qui tiennent compte des parois courantes. La seconde permet de déterminer les points d'inertie d'une paroi à partir de sa capacité calorifique surfacique χ_j obtenue selon la norme NF EN ISO 13786 et de sa surface.

Le tableau de cotation relatif aux parois courantes de mur donné en suivant ne fait pas directement référence aux murs à ossature bois. Des points d'inertie pourront tout de même être accordés à ce

²Un revêtement est considéré sans effet thermique soit si sa masse volumique est supérieure à 900 kg/m³, soit si sa résistance thermique est inférieure à 0,02 m² .K/W (on peut, pour les apprécier, utiliser les valeurs tabulées définies dans les règles Th-U fascicule 2 Matériaux), Règles Th-I

type de mur s'il est revêtu côté intérieur d'1 cm de plâtre. Les revêtements réalisés à partir de panneaux OSB ne sont pas considérés.

Tableau 4 : Points d'inertie de parois courantes de mur, Règles Th-I

Point d'inertie W/(K.m ² sol)	Surface de paroi ramenée à la surface utile A/A_{niv}		
	$A/A_{niv} > 0,9$	$0,9 > A/A_{niv} > 0,5$	$0,5 > A/A_{niv} > 0,25$
Isolation extérieure avec à l'intérieur :			
Béton plein 7 cm ou plus			
Bloc perforé en béton 10 cm ou plus	5	3	1
Bloc creux béton 11 cm ou plus			
Brique pleine ou perforée 10,5 cm ou plus			
Autres briques 15 cm ou plus enduites	4	2	1
Isolation répartie avec :			
Brique de terre cuite à perforations verticales de 37 cm ou plus	4	2	1
Bloc de béton cellulaire 30 cm ou plus	3	2	1
Brique de terre cuite à perforations verticales de 30 cm à 36 cm	3	2	1
Isolation intérieure :			
Cloison brique 5 cm ou plus enduite			
Doublage carreau de plâtre 5 cm	3	1	1
Doublage bloc béton 5 cm			
Cloison brique 3,5 cm ou plus enduite	2	1	1
Doublage 1 cm plâtre	1	0	0
Panneau léger de remplissage bardage métallique	1	0	0

Dans le tableau suivant il peut également être remarqué que les parois de distribution et de cloisonnement réalisés en ossature bois ne sont pas considérées. Elles pourront être considérées, suivant le revêtement intérieur, comme des cloisons alvéolaire à parement de plâtre 1 cm sur chaque face.

Tableau 5 : Points d'inertie des parois de distribution et de cloisonnement, Règles Th-I

Points d'inertie $W/(K.m^2)$	Taille moyenne des locaux (A_{loc})		
	$A_{loc} < 30 m^2$	$30 < A_{loc} < 100 m^2$	$A_{loc} > 100 m^2$
Béton plein ou perforé en béton 10 cm ou plus	8	5	2 ^(*)
Brique pleine ou perforée 10,5 cm ou plus Bloc plein ou perforé en béton 7,5 cm enduit	7	4	2 ^(*)
Bloc creux béton 10 cm enduit ou plus	6	3	1 ^(*)
Brique 15 cm ou plus enduite Bloc de béton cellulaire 15 cm enduit	5	2 ^(*)	1 ^(*)
Brique creuse 5 cm ou plus enduite ou carreau de plâtre plein 6 cm ou bloc aggro béton 5 cm enduit ou bloc de béton cellulaire 7 cm enduit	4	2 ^(*)	1 ^(*)
Brique 3,5 cm enduite	3	1 ^(*)	0 ^(*)
Cloison alvéolaire à parement de plâtre 1 cm sur chaque face	2 ^(*)	1 ^(*)	0 ^(*)

* Si le bâtiment possède un (ou des) refend(s) intérieur(s) de masse surfacique supérieure à 120 kg/m² et placé(s) à une distance inférieure à 12 m l'un de l'autre et par rapport aux pignons, son nombre de points d'inertie de « distribution-cloisonnement » ne peut être inférieur à 2 si les refends possèdent un doublage intérieur, et à 3 en l'absence de doublage intérieur.

3.1.3. Méthode par calcul

Dans cette dernière méthode, la classe d'inertie quotidienne est déterminée à partir des paramètres C_m et A_m calculés en considérant les capacités calorifiques surfaciques des parois et des cloisons χ_j [kJ/m².K] définies selon la norme NF EN ISO 13786, leur surface A [m²] et de la surface utile du niveau étudié A_{niv} [m²]. L'apport du mobilier est également pris en compte de manière forfaitaire à 20 kJ/(K.m²) pour les bâtiments d'habitation, d'hébergement, de bureaux et à 0 kJ/(K.m²) pour les bâtiments à usage sportif.

$$C_m = \sum A_i \times \chi_{ji} + (20A_{niv} \text{ ou } 0) \text{ [kJ/K]}$$

$$A_m = \left(\sum A_i \times \chi_{ji} \right)^2 / \left(\sum A_i \times \chi_{ji}^2 \right) \text{ [m}^2\text{]}$$

Il est à noter que l'annexe 4 des Règles Th-I précise que les valeurs de C_m et A_m calculées ne sont pas directement utilisées pour le calcul de la Tic mais servent uniquement à la détermination de la classe d'inertie quotidienne comme donné dans le tableau suivant. Cette classe est alors utilisée pour déterminer des valeurs de C_m et A_m destinées à alimenter le modèle RC des règles Th-BCE présenté précédemment.

Tableau 6 : Détermination de la classe d'inertie quotidienne par la méthode par calcul, Règles Th-I

I_{nq}	C_m/A_{niv} (kJ/m ² .K)									
	80 à 109	110 à 164	165 à 219	220 à 259	260 à 309	310 à 329	330 à 349	350 à 369	370 à 499	500 et plus
A_m/A_{niv}										
1,0 à 1,4	T. lég.	T. lég.	T. lég.	T. lég.	Légère	Légère	Légère	Légère	Légère	Légère
1,5 à 1,9	T. lég.	T. lég.	Légère	Moy.						
2,0 à 2,4	T. lég.	Légère	Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	Moy.	L	L	L
2,5 à 2,9	T. lég.	Légère	Moy.	Moy.	L	L	L	L	L	L
3,0 à 3,4	T. lég.	Légère	Moy.	L	L	L	L	L	L	TL
3,5 à 3,9	T. lég.	Légère	Moy.	L	L	L	L	L	TL	TL
4,0 à 4,4	T. lég.	Légère	Moy.	L	L	L	L	TL	TL	TL
4,5 à 4,9	T. lég.	Légère	Moy.	L	L	L	TL	TL	TL	TL
5,0 et plus	T. lég.	Légère	Moy.	L	L	TL	TL	TL	TL	TL

Classe d'inertie : T. lég. = très légère ; Moy. = moyenne ; L = lourde ; TL = très lourde.

La norme NF EN ISO 13786 propose le calcul détaillé de la capacité calorifique surfacique d'une paroi à partir de la matrice de transfert thermique du composant. L'annexe A de cette norme donne des méthodes simplifiées pour le calcul de la capacité calorifique surfacique. Dans les Règles Th-I, l'annexe 6 précise que les valeurs issues d'un calcul simplifié peuvent être retenues au même titre que celles issues d'un calcul détaillé. Dans la suite de ce document une étude de la norme NF EN ISO 13786 permet de mettre en évidence la manière dont celle-ci permet de prendre en compte l'inertie apportée par les montants d'ossature.

3.2. Inertie séquentielle

Le paramètre qui permet la prise en compte de l'inertie séquentielle est :

- $C_{ms} \left[\frac{kJ}{K} \right]$: Capacité thermique séquentielle

La détermination de ce paramètre est effectuée selon les Règles Th-I et en particulier l'annexe 4 qui traite de la prise en compte de l'inertie thermique dans la méthode Th-E. La capacité thermique séquentielle dépend d'une classe d'inertie séquentielle et de la surface utile du bâtiment notée $A_{bât}$ comme donné dans le tableau suivant. Une valeur par défaut de C_{ms} peut également être prise mais dans ce cas les gains d'inertie séquentielle ne sont pas valorisés.

Tableau 7 : Détermination du paramètre C_{ms} en fonction de la classe d'inertie séquentielle, Règles Th-I

Classe d'inertie séquentielle	Capacité séquentielle C_{ms} (kJ/K)
Indéterminée (valeur par défaut)	$C_{ms} = C_m$
Très légère	$C_{ms} = C_m$
Légère	$250 \times A_{bât}$
Moyenne	$500 \times A_{bât}$
Lourde	$850 \times A_{bât}$

La classe d'inertie séquentielle est déterminée selon l'annexe 2 des Règles Th-I. Comme pour la classe d'inertie quotidienne, celle-ci peut être déterminée selon une méthode forfaitaire, une méthode par « points d'inertie » ou encore par le calcul de C_{ms} en considérant les capacités calorifiques surfaciques séquentielles des parois χ_s définies selon la norme NF EN ISO 13786. Lorsque que le bâtiment comporte plusieurs niveaux, la classe retenue est celle du niveau où elle s'avère être la plus défavorable.

3.2.1. Méthode forfaitaire

Par le tableau présenté en suivant, la méthode forfaitaire permet de déterminer la classe d'inertie séquentielle en fonction du nombre de parois considérées comme lourdes qui composent le niveau étudié.

Tableau 8 : Détermination de la classe d'inertie séquentielle par la méthode forfaitaire, Règles Th-I

Conditions nécessaires	Classe d'inertie séquentielle
Pas de paroi lourde	Très légère
Une paroi lourde par niveau	Très légère
Deux parois lourdes par niveau	Légère
Trois parois lourdes par niveau	Moyenne

Les parois à ossature n'étant pas considérées comme des parois « Lourdes » n'apportent rien par cette méthode en ce qui concerne l'inertie séquentielle. Les bâtiments à ossature bois se retrouveront donc généralement avec une classe d'inertie séquentielle « Très légère ».

3.2.2. Méthode par « points d'inertie »

Par cette méthode la classe d'inertie thermique séquentielle est déterminée en fonction du nombre de points d'inertie obtenus pour le niveau du bâtiment le plus défavorable. Le nombre de points est obtenu en sommant les points d'inertie quotidienne et les points d'inertie séquentielle. Chaque type de paroi est associé à un nombre de points d'inertie. Dans cette méthode les cloisons et le mobilier ne peuvent contribuer à l'inertie séquentielle au-delà de leur inertie quotidienne. Ils ne possèdent donc

pas de points d'inertie séquentielle. Le tableau suivant donne la classe d'inertie séquentielle en fonction du nombre de points d'inertie

Tableau 9 : Détermination de la classe d'inertie séquentielle par la méthode par « points d'inertie », Règles Th-I

Classe d'inertie séquentielle	Très légère	Légère	Moyenne	Lourde
Points d'inertie totaux y compris les points d'inertie séquentielle	< 15	15 à 22	23 à 34	35 et plus

Les points d'inertie quotidienne sont obtenus de la même manière que lors de la détermination de la classe d'inertie quotidienne. Les points d'inertie séquentielle à ajouter aux points d'inertie quotidienne correspondent à l'écart entre l'inertie séquentielle et l'inertie quotidienne. Ils peuvent être obtenus de deux manières. La première consiste à faire appel à des tableaux de cotation qui tiennent compte des parois courantes. La seconde permet de déterminer les points d'inertie d'une paroi à partir du gain séquentiel surfacique obtenu selon la norme NF EN ISO 13786 et de la surface de la paroi déduction faite des percements. Le gain séquentiel surfacique fait intervenir la capacité calorifique surfacique quotidienne et la capacité calorifique surfacique séquentielle dans l'expression $\chi_s - \chi_j$.

L'utilisation des tableaux de cotation ne permet pas de comptabiliser des points d'inertie séquentielle pour les murs à ossature bois. Seules les parois composées de briques ou de béton peuvent prétendre à l'obtention de ces points d'inertie.

3.2.3. Méthode par calcul

Dans cette dernière méthode, la classe d'inertie séquentielle est déterminée à partir du paramètre C_{ms} calculé en considérant les capacités calorifiques surfaciques des parois et des cloisons χ_s [kJ/m².K] définies selon la norme NF EN ISO 13786, leur surface A [m²] et la surface utile du niveau étudié A_{niv} [m²]. L'apport du mobilier est également pris en compte de manière forfaitaire à 20 kJ/(K.m²) pour les bâtiments d'habitation, d'hébergement, de bureaux et à 0 kJ/(K.m²) pour les bâtiments à usage sportif.

$$C_{ms} = \sum A_i \times \chi_{si} + (20A_{niv} \text{ ou } 0) \text{ [kJ/K]}$$

Il est à noter que la valeur de C_{ms} calculée ici n'est pas directement utilisée pour le calcul de la Tic mais sert uniquement à la détermination de la classe d'inertie séquentielle comme présenté dans le tableau suivant. C'est ensuite à partir de cette classe d'inertie qu'est déterminée la valeur de la capacité thermique séquentielle.

Tableau 10 : Détermination de la classe d'inertie séquentielle par la méthode par calcul, Règles Th-I

Classe d'inertie séquentielle	Très légère	Légère	Moyenne	Lourde
Capacité thermique séquentielle ramenée à la surface au sol : C_{ms}/A_{niv} kJ/K par m ² de surface utile	< 250	250 à 500	500 à 850	> 850

Ce tableau peut facilement être mis en relation avec celui qui permet la détermination du paramètre C_{ms} en fonction de la classe d'inertie séquentielle. Il peut être observé que le fait de ne pas utiliser directement la valeur C_{ms} calculée peut mener à sous-estimer l'apport d'inertie. Par exemple pour un

bâtiment de 3 niveaux de 100 m² chacun avec un rapport C_{ms}/A_{niv} pour le niveau le plus défavorable de 400 kJ/(K.m²), une classe d'inertie « Légère » est obtenue. Le paramètre C_{ms} vaut alors $250 \times A_{bât} = 250 \times 300 = 75000$ kJ/K. Si la valeur de C_{ms} obtenue pour le niveau le plus défavorable avait été considérée et retenue pour l'ensemble des niveaux, la valeur de C_{ms} à utiliser pour le calcul de la Tic aurait été $400 \times A_{bât} = 400 \times 300 = 120000$ kJ/K.

Tableau 11 : Exemple pour lequel le passage par la classe d'inertie séquentielle mène à sous-estimer l'apport d'inertie

C_{ms}/A_{niv} pour le niveau le plus défavorable [kJ/(K.m ²)]		400
	Classe d'inertie séquentielle	Capacité séquentielle C_{ms} Pour un bâtiment de 300 m ² [kJ/K]
Passage par la classe d'inertie	Légère	250 × 300 = 75000
		+45000 kJ/K
Utilisation de la valeur calculée	X	400 × 300 = 120000

De même, cette façon de procéder peut mener à des sauts pour les valeurs de C_{ms} . Pour le même exemple que précédemment, si le rapport C_{ms}/A_{niv} pour le niveau le plus défavorable vaut 499 kJ/(K.m²) alors une classe d'inertie « Légère » est retenue et C_{ms} vaut $250 \times A_{bât} = 250 \times 300 = 75000$ kJ/K. Si le rapport C_{ms}/A_{niv} avait été légèrement plus élevé de manière à obtenir 500 kJ/(K.m²) alors une classe d'inertie « Moyenne » aurait été retenue et la valeur de C_{ms} à considérer aurait été $500 \times A_{bât} = 500 \times 300 = 150000$ kJ/K soit une valeur deux fois plus importante pour une augmentation de seulement 1 kJ/(K.m²) du rapport C_{ms}/A_{niv} pour le niveau le plus défavorable.

Tableau 12 : Exemple de saut pour la valeur de C_{ms}

C_{ms}/A_{niv} Pour le niveau le plus défavorable [kJ/(K.m ²)]	Classe d'inertie séquentielle	Capacité séquentielle C_{ms} Pour un bâtiment de 300 m ² [kJ/K]
499	Légère	250 × 300 = 75000
+1 kJ/(K.m²)		+75000 kJ/K
500	Moyenne	500 × 300 = 150000

4. CONCLUSION

La vérification de l'exigence sur le confort estival ($Tic \leq Tic_{ref}$) nécessite la détermination des paramètres d'inertie quotidienne C_m et A_m et du paramètre d'inertie séquentielle C_{ms} . Le calcul de ces paramètres est défini dans les Règles Th-I et peut être mené suivant une méthode forfaitaire, à « points d'inertie » ou bien par calcul selon la norme NF EN ISO 13786. Ces méthodes permettent de définir des classes d'inertie qui servent ensuite à la détermination des paramètres d'inertie.

La méthode forfaitaire fait appel à un classement des parois. Celles-ci sont considérées soit « Lourdes » soit « Légères ». Quelle que soit leur composition, les parois à ossature bois sont définies comme étant « Légères ». De ce fait un travail sur l'inertie de ces parois ne pourrait être valorisé. Les bâtiments à ossature bois obtiennent fréquemment la classe d'inertie la plus faible.

La méthode par « points d'inertie » est d'application plus complexe et fait appel soit à des tableaux de cotation pour les parois courantes soit à des valeurs de capacité thermique surfacique calculées selon

la norme NF EN ISO 13786. Les systèmes à ossature bois ne figurent pas dans les tableaux de cotation de cette méthode. Lorsque les parois bois se composent d'une plaque de plâtre en revêtement intérieur, il est possible de les assimiler à des parois isolées par l'intérieur et revêtues d'un parement en plâtre. Là aussi la présence des montants n'est pas valorisée. L'utilisation des valeurs calculées de capacité thermique surfacique selon la norme pour la détermination des points d'inertie fait appel à un tableau d'équivalence. Celui-ci amène à retenir pour toute une plage de valeurs de capacité thermique surfacique le nombre de points qui correspond à la valeur basse de cet intervalle de valeurs. Le recours à une équation analytique qui permettrait l'équivalence entre un couple surface de paroi ramenée à la surface du niveau / capacité thermique surfacique serait certainement moins pénalisant.

La méthode par calcul est la plus complexe à utiliser mais aussi la plus précise. Les résultats de la phase 1 de ce projet ont montré pour le cas d'une maison individuelle que la méthode par points d'inertie pénalise systématiquement les constructions tout bois en leur attribuant une capacité thermique toujours inférieure à celle de la méthode par calcul selon l'annexe A de la norme NF EN ISO 13786. Cette norme est étudiée dans la suite de ce document. Cependant, ce ne sont pas les valeurs calculées des paramètres C_m , A_m et C_{ms} qui sont directement utilisées pour la détermination de la T_{ic} . Les valeurs utilisées sont déterminées à partir d'une classe d'inertie qui elle dépend des valeurs calculées. De ce fait, l'application de cette méthode amène fréquemment à retenir des valeurs défavorables. Il est à noter que le logiciel Pléiades+Comfie utilise les valeurs calculées comme données d'entrée de la méthode Th-E ce qui permet une prise en compte plus fine de l'inertie mais qui va à l'encontre des Règles Th-I.

L'étude des Règles Th-I montre que les parois à ossature bois ne sont pas suffisamment caractérisées pour le calcul des paramètres d'inertie. Les méthodes forfaitaire et à « points d'inertie » qui font appel à des parois dites courantes ne font pas explicitement mention de murs à ossature bois. De ce fait, il convient de retenir des valeurs qui peuvent être pénalisantes. La méthode par calcul, plus précise, permettrait alors une meilleure caractérisation des parois bois. Les résultats obtenus lors de la première phase du projet vont dans ce sens. Les paramètres d'inertie de différentes configurations de bâtiments d'habitations collectives et individuelles ont été déterminés selon les méthodes forfaitaire, à « points d'inertie » et par calcul simplifié selon l'annexe A de la norme NF EN ISO 13786. Il apparaît que les valeurs calculées sont plus favorables aux parois bois à conditions qu'elles soient directement utilisées comme données d'entrée de la méthode Th-E. Si ces valeurs sont utilisées pour déterminer une classe d'inertie qui elle-même permet la définition des paramètres d'inertie, la méthode par calcul devient moins favorable. Les gains apportés par la méthode par calcul simplifié s'observent surtout au niveau de l'inertie séquentielle. La norme NF EN ISO 13786 qui est à la base de la méthode par calcul est étudiée dans la suite de cette première partie.

1. INTRODUCTION

La méthode Th-E permet la vérification de l'exigence sur le confort d'été $T_{ic} \leq T_{ic_{ref}}$. Les paramètres d'inertie C_m , A_m et C_{ms} sont des données d'entrée de la méthode Th-E. Ils sont déterminés conformément aux Règles Th-I qui portent sur la caractérisation de l'inertie thermique des bâtiments. Les paramètres C_m et A_m sont relatifs à l'inertie quotidienne qui permet de caractériser l'amortissement de l'onde quotidienne de température et d'ensoleillement en saison chaude. Le paramètre C_{ms} est quant à lui relatif à l'inertie séquentielle qui permet de caractériser l'amortissement de l'onde séquentielle de température en saison chaude.

Les Règles Th-I proposent trois méthodes pour la détermination des paramètres d'inertie : la méthode forfaitaire, la méthode à « points d'inertie » et la méthode par calcul. Cette dernière repose sur la norme NF EN ISO 13786 qui traite des caractéristiques dynamiques des composants de bâtiment. Cette norme est également utilisée dans la méthode à « points d'inertie » si les tableaux de cotation des parois courantes ne sont pas utilisés. Dans les deux cas, la norme NF EN ISO 13786 permet le calcul des capacités calorifiques surfaciques des parois et des cloisons notées χ_j ou bien χ_s suivant si elles permettent de caractériser l'inertie quotidienne ou l'inertie séquentielle. Dans la méthode par calcul ces capacités sont utilisées comme suit pour la détermination des paramètres d'inertie :

$$C_m = \sum A_i \times \chi_{ji} + (20A_{niv} \text{ ou } 0) \text{ [kJ/K]}$$

$$A_m = \left(\sum A_i \times \chi_{ji} \right)^2 / \left(\sum A_i \times \chi_{ji}^2 \right) \text{ [m}^2\text{]}$$

$$C_{ms} = \sum A_i \times \chi_{si} + (20A_{niv} \text{ ou } 0) \text{ [kJ/K]}$$

Où :

A_i [m²] est la surface de la paroi i

A_{niv} [m²] est la surface utile du niveau considéré

χ_{ji} et χ_{si} [kJ/m² . K] sont respectivement les capacité calorifique surfacique de la paroi i pour une période de 24h et un période de 12 jours

L'étude de la norme NF EN ISO 13786 a pour objectif de mettre en évidence la méthode utilisée pour la définition des capacités calorifiques surfaciques et d'en définir les limites quant à son application aux murs à ossature bois. Les conclusions de cette étude serviront de base à la mise en place d'une méthode permettant la caractérisation de l'inertie apportée par la présence des montants d'ossature. Dans un premier temps la méthode sur laquelle repose la norme NF EN ISO 13786 est présentée. Le calcul de la capacité thermique surfacique est ensuite défini puis les méthodes simplifiées permettant des estimations sont présentées. Enfin, l'application de cette norme aux murs à ossature bois est étudiée.

2. METHODE DES QUADRIPOLES

La norme NF EN ISO 13786 permet le calcul des caractéristiques thermiques dynamique d'une paroi soumise à des températures ou des flux thermiques variant de façon sinusoïdale. La température et la densité de flux thermique de la zone n peuvent être décrites par les expressions suivantes :

$$\theta_n(t) = \overline{\theta}_n + |\widehat{\theta}_n| \cos(\omega \times t + \psi)$$

$$q_n(t) = \overline{q}_n + |\widehat{q}_n| \cos(\omega \times t + \psi)$$

Où :

$\overline{\theta}_n$ et \overline{q}_n sont les valeurs moyenne de la température et de la densité de flux thermique

$|\widehat{\theta}_n|$ et $|\widehat{q}|$ sont les amplitudes des variations de la température et de la densité de flux thermique

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ est la fréquence angulaire des variations avec T la période de la sinusoïde

ψ est le déphasage

Cette température et cette densité de flux en notation complexe deviennent :

$$\theta_n(t) = \overline{\theta}_n + \frac{1}{2} [\widehat{\theta}_{+n} e^{j\omega t} + \widehat{\theta}_{-n} e^{-j\omega t}]$$

$$q_n(t) = \overline{q}_n + \frac{1}{2} [\widehat{q}_{+n} e^{j\omega t} + \widehat{q}_{-n} e^{-j\omega t}]$$

Où :

$\widehat{\theta}_{\pm n} = |\widehat{\theta}_n| e^{\pm j\psi}$ et $\widehat{q}_{\pm n} = |\widehat{q}_n| e^{\pm j\psi}$ sont des amplitudes complexes

Le comportement de la paroi face à ces sollicitations dynamiques est modélisé dans la norme NF EN ISO 13786 par la méthode des quadripôles qui à l'origine fut utilisée dans le domaine de l'électricité. Une matrice de transfert thermique est associée à la composition de paroi pour une période des sollicitations T définie. Elle permet de mettre en relation les températures et les densités de flux thermique des zones 1 et 2 de chaque côté du composant :

$$\begin{pmatrix} \widehat{\theta}_2 \\ \widehat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widehat{\theta}_1 \\ \widehat{q}_1 \end{pmatrix}$$

La matrice de la paroi est égale au produit des matrices des couches qui la composent :

$$\begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = Z_N Z_{N-1} \dots Z_3 Z_2 Z_1$$

Par convention, pour les parois donnant sur l'extérieur, la couche 1 est celle située la plus à l'intérieur. Les éléments de la matrice de chaque couche de conductivité thermique λ , de masse volumique ρ et de capacité thermique massique c sont des nombres complexes qui se calculent comme suit :

$$Z_{11} = Z_{12} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi)$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j[\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi)] \}$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j[\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi)] \}$$

Où :

$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}}$ est la profondeur de pénétration périodique

Il est également possible de considérer des couches uniquement résistives comme par exemple pour les résistances superficielles ou les lames d'air et des couches uniquement capacitives :

$$Z_R = \begin{pmatrix} 1 & -R \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ pour une couche résistive}$$

$$Z_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ j\omega Q & 1 \end{pmatrix} \text{ pour une couche capacitive}$$

La paroi peut alors être représentée par le quadripôle suivant :

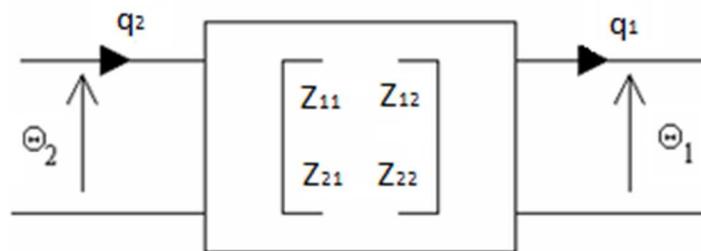


Illustration 3 : Quadripôle représentatif d'un mur, Sambou Vincent

Et ce quadripôle peut être représenté par trois impédances complexes associées en « Π » :

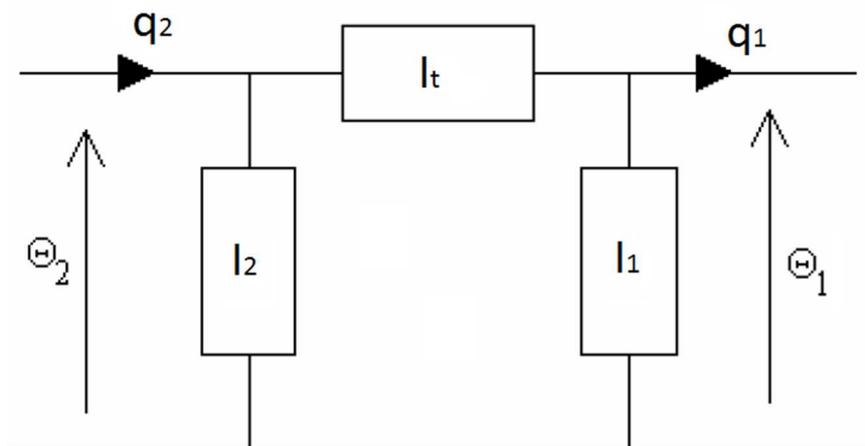


Illustration 4 : Représentation d'un mur par des impédances, Sambou Vincent

I_2 est l'impédance extérieure, I_1 l'impédance intérieure et I_t est l'impédance transversale. Dans la norme NF EN ISO 13786, sont calculées une admittance intérieure Y_{11} , une admittance extérieure Y_{22}

et un transmittance Y_{12} qui sont respectivement les inverses de l'impédance intérieure, de l'impédance extérieure et de l'impédance transversale :

$$Y_{11} = \frac{1}{I_1} = -\frac{Z_{11}}{Z_{12}}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{I_2} = -\frac{Z_{22}}{Z_{12}}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{I_t} = -\frac{1}{Z_{12}}$$

3. CAPACITE THERMIQUE SURFACIQUE

La capacité thermique surfacique est le paramètre utilisé dans les Règles Th-I pour caractériser l'inertie d'une paroi. Elle s'exprime en $[kJ/(m^2 \cdot K)]$ et permet de quantifier la capacité de la paroi à absorber ou restituer de l'énergie sous forme de chaleur. La capacité thermique surfacique est la quantité d'énergie que la paroi est capable de stocker ou restituer sous une sollicitation dynamique de période T et d'amplitude $|\widehat{\theta}_n|$. Sous sollicitations de ce type la capacité thermique d'une paroi dépend de l'agencement des différentes couches. De ce fait, pour une paroi de bâtiment donnant sur l'extérieur le paramètre d'intérêt est la capacité thermique surfacique intérieure. Lorsqu'il s'agit d'étudier un mur intérieur ou une cloison les deux faces du composant sont considérées.

Dans la norme NF EN ISO 13786 la capacité thermique surfacique est notée κ . Son calcul repose sur le modèle des quadripôles présenté précédemment. La partie imaginaire X_c de l'impédance intérieure I_1 et la fréquence angulaire des variations thermiques ω permettent le calcul de la capacité thermique surfacique :

$$\kappa = -\frac{1}{\omega X_c}$$

La formule suivante est utilisée dans la norme. Elle fait intervenir directement le module d'un nombre complexe calculé à partir des éléments de la matrice de transfert thermique du composant :

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right|$$

Lorsqu'un mur intérieur ou une cloison est considéré il convient de prendre en compte la somme des capacités thermiques des deux côtés dans la limite de la capacité thermique à long terme :

$$\kappa = \frac{T}{2\pi} \left[\left| \frac{Z_{11} - 1}{Z_{12}} \right| + \left| \frac{Z_{22} - 1}{Z_{12}} \right| \right] \leq \sum_i \rho_i d_i c_i$$

Où :

$\rho_i [kg/m^3]$ est la masse volumique de la couche i

$d_i [m]$ est l'épaisseur de la couche i

$c_i [kJ/(K \cdot kg)]$ est la chaleur spécifique de la couche i

Les méthodes de calcul présentées précédemment sont valables quelle que soit la période des variations thermiques. Les valeurs à retenir pour les Règles Th-I sont les capacités thermiques surfaciques pour des périodes $T = 24h$ et $T = 12j$ qui sont relatives respectivement à l'inertie quotidienne (χ_j) et l'inertie séquentielle (χ_s).

4. METHODES SIMPLIFIEES

La norme NF EN ISO 13786 propose également dans son annexe A des méthodes simplifiées pour l'approximation de la capacité thermique surfacique. Il est précisé que celles-ci peuvent surestimer la capacité thermique de certains matériaux comme le bois. La démarche consiste à appliquer l'une des méthodes proposées pour déterminer une capacité thermique surfacique ne tenant pas compte de la résistance thermique superficielles. Cette valeur est ensuite corrigée par la prise en compte de cette résistance. Ces méthodes reposent sur la notion de profondeur de pénétration d'une onde thermique qui pour une période T et un matériau de conductivité thermique λ , de masse volumique ρ et de chaleur spécifique c vaut :

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}}$$

La première méthode est l'approximation de la couche mince. Elle est applicable si la première couche de la paroi de masse volumique ρ et de chaleur spécifique c a une épaisseur d inférieure à la moitié de la profondeur de pénétration et si la couche suivante est un matériau isolant. Dans ce cas, la première couche est supposée isotherme et la capacité thermique surfacique du composant est approchée par :

$$\kappa' = d\rho c$$

La seconde méthode est l'approximation du milieu semi-infini. Celle-ci est applicable si la première couche de la paroi a une épaisseur supérieure au double de la profondeur de pénétration. Dans ce cas, cette couche peut être considérée d'épaisseur infinie et la capacité thermique surfacique du composant est approchée par :

$$\kappa' = \frac{\delta \rho c}{\sqrt{2}}$$

Enfin la dernière méthode est celle de l'épaisseur efficace. Elle consiste à définir une épaisseur efficace notée d_t qui est prise comme étant la plus petite des valeurs suivantes :

- La moitié de l'épaisseur totale de la paroi
- L'épaisseur des matériaux compris entre la face considérée et la première couche isolante
- Une épaisseur efficace maximale

Cette dernière dépend de la période des variations thermique considérée. Dans le cadre des Règles Th-I des périodes de 24h et de 12 jours sont à retenir suivant le type d'inertie étudié. L'épaisseur efficace maximale n'étant pas fournie dans la norme pour une période de 12 jours, les Règles Th-I en donnent une valeur. Il est à noter que ces épaisseurs sont très approximatives puisqu'elles sont basées sur une valeur conventionnelle de la diffusivité thermique qui est proche de celle du béton, du plâtre

et du mortier. La capacité thermique surfacique est alors approximée par le produit de l'épaisseur des couches par leur masse volumique et leur chaleur spécifique jusqu'à l'épaisseur efficace :

$$\kappa' = \sum_i \rho_i d_i c_i \text{ avec } \sum_i d_i = d_T$$

Une fois l'une des méthodes appliquée, l'effet de la résistance thermique superficielle R est pris en compte et la capacité thermique surfacique corrigée vaut :

$$\kappa = \sqrt{\frac{\kappa'^2}{1 + \omega^2 \kappa'^2 R^2}}$$

Pour un mur intérieur ou une cloison la capacité thermique surfacique est égale à la somme des capacités calculées pour les deux faces du composant. L'annexe 6 des Règles Th-I précise que lorsque des parois d'épaisseur inférieure à 8 cm sont étudiées pour une période journalière, d'importantes différences sont observées entre l'approche matricielle et les méthodes simplifiées de l'annexe A. Ces écarts sont dus à une divergence sur le calcul détaillé pour les faibles épaisseurs. Plus la période d'étude est longue, plus l'épaisseur de la paroi doit être importante pour obtenir des résultats cohérents avec l'approche matricielle. De ce fait, les Règles Th-I imposent d'utiliser les méthodes simplifiées de l'annexe A qui viennent d'être présentées pour le calcul de l'inertie séquentielle.

5. CAS DES MURS A OSSATURE BOIS

La modélisation de la paroi par un quadripôle retenue dans la norme NF EN ISO 13786 et présentée précédemment s'applique uniquement aux composants constitués de couches planes homogènes. Dans la norme, une couche homogène est définie comme étant une couche de matériau dans laquelle la plus grande taille des inhomogénéités n'excède pas le cinquième de l'épaisseur de la couche. Lorsque cette condition est respectée, les inhomogénéités sont négligées et il est admis qu'elles n'affectent pas les caractéristiques thermiques dynamiques de la paroi. Les murs à ossature bois présentent des inhomogénéités dues aux montants qui sont trop importantes pour être négligées. De ce fait, il est admis que l'ossature affecte les caractéristiques thermiques dynamiques de la paroi. Les murs à ossature bois n'entrent donc pas dans le domaine d'application de la norme NF EN ISO 13786. De manière courante, lorsque cette norme est tout de même utilisée pour la caractérisation des parois à ossature bois, les montants d'ossature ne sont pas considérés de manière à obtenir une composition homogène. Cette simplification ne permet pas de valoriser l'inertie apportée par l'ossature.

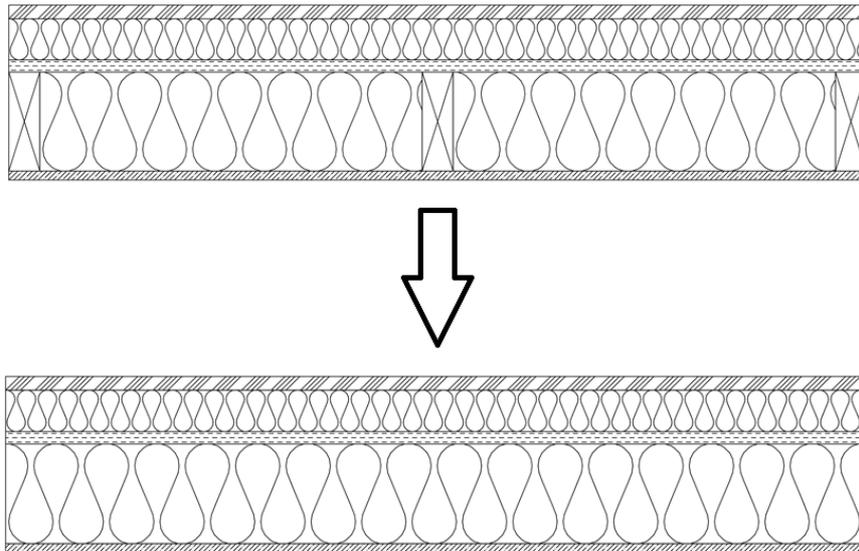


Illustration 5 : Simplification courante des parois à ossature bois pour application de la norme NF EN ISO 13786

La norme NF EN ISO 13786 précise que pour les parois comportant des ponts thermiques importants le calcul des caractéristiques thermiques dynamiques doit être effectué par résolution de l'équation de la chaleur dans des conditions aux limites périodiques. Les règles de modélisation données dans la norme NF EN ISO 10211 doivent être utilisées en combinaison avec des méthodes comme celle des éléments finis. Cette norme traite du calcul détaillé des flux thermiques et des températures superficielles pour les ponts thermiques dans les bâtiments. Elle est généralement utilisée pour déterminer les coefficients de transmission thermique linéiques ou ponctuels dus aux ponts thermiques.

6. CONCLUSION

La norme NF EN ISO 13786 est à la base de la méthode par calcul proposée par les Règles Th-I. Cette méthode définit la détermination des paramètres d'inertie qui sont des données d'entrée de la méthode Th-E permettant la vérification de l'exigence sur le confort d'été selon la RT 2012. Cette norme fait appel à l'analogie entre une paroi de bâtiment soumise à des sollicitations thermiques variables et un quadripôle électrique qui peut être représenté par une association en « Π » de trois impédances. La paroi est alors caractérisée par une matrice de transfert thermique dont les termes sont des nombres complexes. C'est à partir de cette matrice que sont calculées les capacités thermiques surfaciques.

L'annexe A de cette norme donne des méthodes simplifiées permettant une approximation de la capacité thermique surfacique d'une paroi. Les Règles Th-I recommandent de les utiliser pour le calcul du paramètre d'inertie séquentielle ainsi que pour les paramètres d'inertie quotidienne lorsque les parois présentent de faibles épaisseurs. Dans ce cas, des divergences sur le calcul matriciel sont observées.

L'application de la norme NF EN ISO 13786 aux murs à ossature impose une importante simplification. En effet, la méthode proposée par la norme est valable pour les parois homogènes, condition que ne respectent pas ces parois bois. De manière courante, les montants d'ossature ne sont donc pas

considérés lors de l'application du calcul matriciel et leur influence sur les propriétés dynamiques de la paroi sont donc négligées. Lors de la première phase de ce projet, une extrapolation de la norme avait été proposée. La paroi bois avait alors été scindée en deux parties, une partie contenant uniquement l'isolant présent entre les montants d'ossature et une autre composée des montants. Cette extrapolation fut utilisée dans le cadre d'un calcul réglementaire mené sur une maison individuelle et a montré qu'elle permettait de gagner une classe d'inertie lorsque l'entraxe des montants passait de 600 mm à 400 mm. Dans la suite du projet, la pertinence de cette extrapolation sera vérifiée par la mise en place de calculs numériques selon la méthode des éléments finis. D'autres méthodes de prise en compte de l'ossature seront également proposées et leur capacité à représenter les phénomènes réels sera analysée.

1. METHODOLOGIE ADOPTEE

Cette étude comporte deux objectifs distincts. Le premier objectif consiste à comparer la réponse en température dans un local virtuel avec et sans prise en compte des éléments d'ossature bois. Le second est d'évaluer l'impact potentiel de l'inertie des éléments d'ossature sur le calcul de la *Tic*.

Pour répondre à ces objectifs un modèle géométrique simplifié de bâtiment virtuel sera utilisé. L'impact de la prise en compte de l'inertie des montants d'ossature sur la réponse en température en période chaude y sera donc étudié (Illustration 6).

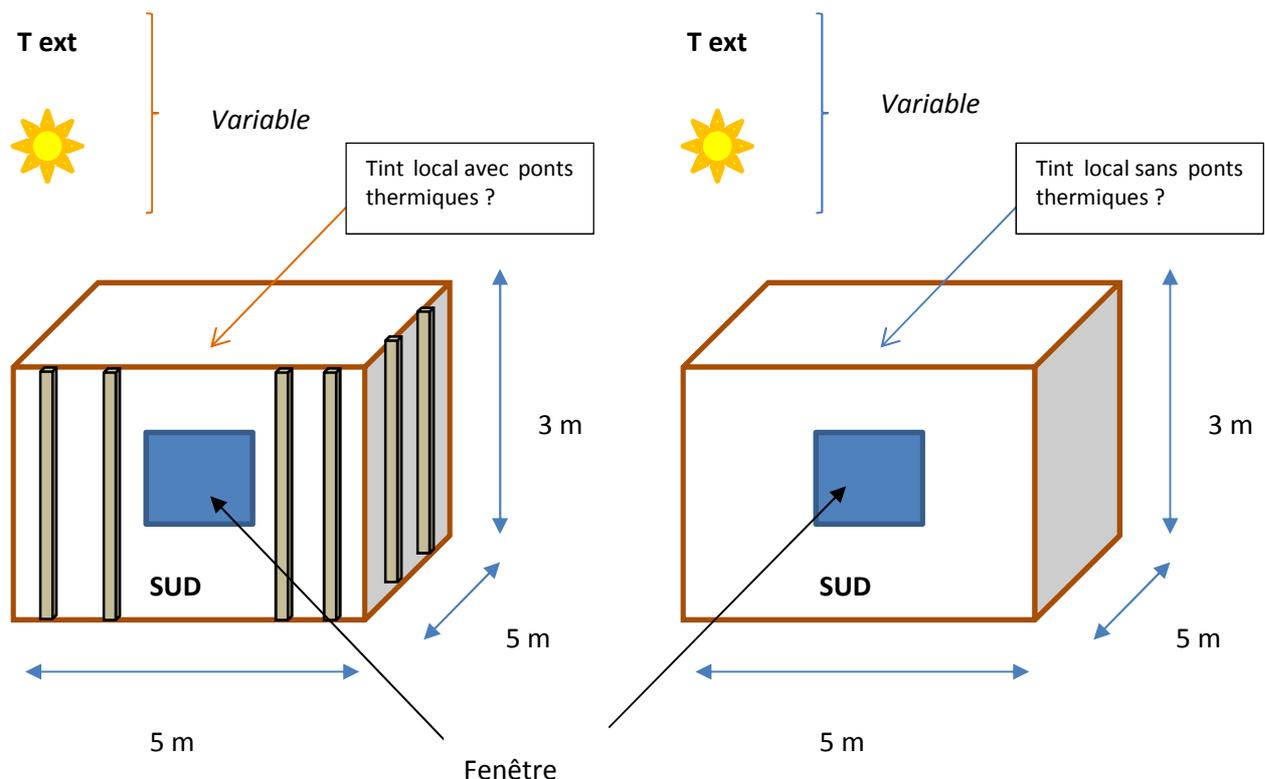


Illustration 6 : Modèle géométrique simplifié de bâtiment virtuel

Pour étudier la différence en température la méthodologie suivante a été adoptée :

- Construction d'un modèle géométrique simplifié de bâtiment virtuel : la dimension et la composition des parois ont été définis de manière à être réaliste.
- Définition des propriétés thermiques des matériaux (ρ , C_p et λ , absorption des composants).
- Définition des sollicitations thermiques extérieures (rayonnement solaire et température en condition d'été).
- Calcul itératif de la réponse en température dans le local.

- Comparaison de la réponse en température obtenue avec et sans ponts thermiques (tout autres paramètres restant inchangés).

Afin de consolider les résultats obtenus, les calculs sont réalisés sous deux logiciels de simulation différents en utilisant les mêmes hypothèses de calcul (composition de paroi, dimension du local, orientation de la baie...) :

- VOLTRA : qui permet la prise en compte 3D, fine et détaillée de l'ossature bois³.
- EnergyPlus : qui prend en compte l'ossature bois en 2D via la création de sous-surfaces⁴.

Les réponses en température des deux modèles VOLTRA et EnergyPlus ne seront pas comparées de manière absolue. En effet, malgré une description précise et identique de la composition du local et des sollicitations, certains paramètres propres à chaque logiciel induisent des écarts. Par exemple, la prise en compte des échanges radiatifs infrarouges avec la température du ciel varie d'un modèle à l'autre. Un calage parfait est donc difficile à obtenir. De plus, l'intérêt d'utiliser deux logiciels différents n'est donc pas de comparer les températures obtenues de manière absolue mais plutôt de consolider la tendance des résultats obtenus.

Les paramètres considérés sont les suivants⁵ :

- Prise en compte détaillée des apports solaires à travers les parois (opaque ou vitrée) via la modélisation de la course du soleil autour du local à chaque instant.
- Prise en compte dynamique des transferts de chaleur par transmission dans les parois et l'ossature couplée à un calcul aux différences finies.
- Prise en compte des échanges thermiques entre les parois intérieures (calcul des facteurs de forme)
- Possibilité de modéliser la course du soleil autour du bâtiment sur une période donnée. Le logiciel calcul le flux solaire incident sur la face extérieure des parois ou pénétrants directement dans le bâtiment à chaque pas de temps.
- Prise en compte de l'inertie des composants
- Prise en compte de renouvellement d'air et d'infiltration

2. DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE

2.1. Description générale

Le local étudié a une section carrée de dimension intérieure 5x5 m, de hauteur sous plafond de 3 m. Le plancher haut et les murs donnent sur l'extérieur. Le local étudié est séparé du sol par un espace tampon non chauffé de même dimension que le local étudié (Illustration 7). Le local étudié dispose d'une fenêtre de dimension totale 1x1 m.

³ Calculs réalisés par le CSTB

⁴ Calculs réalisés par Nobatek

⁵ Les transferts d'humidité dans les parois ne sont pas pris en compte

Les compositions des parois sont détaillées dans l'illustration 8.

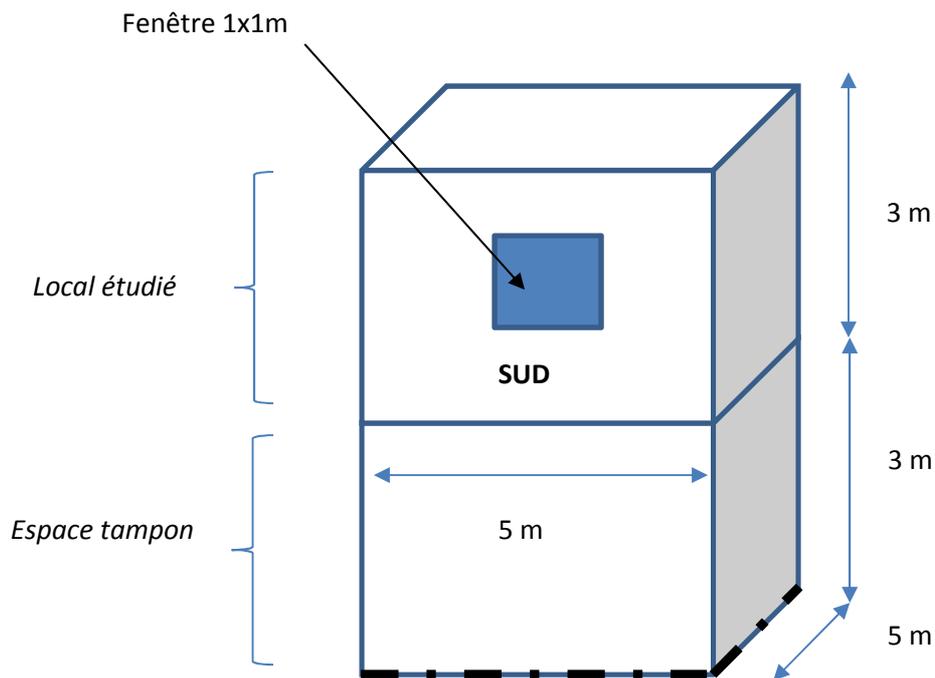
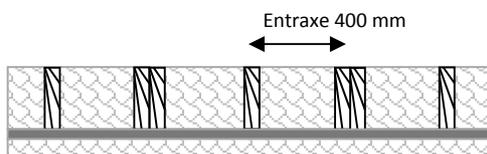


Illustration 7 : Local étudié et contact avec un espace tampon

MURS DU LOCAL ETUDIÉ :

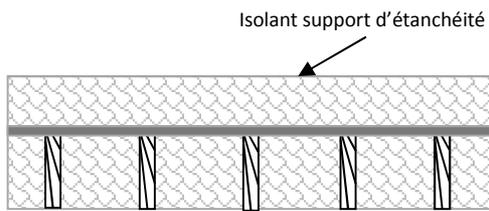


- Section des montants 45x145 mm
- Isolant entre montants 145 mm
- Contreventement OSB 12 mm
- Parement plâtre intérieur 13 mm
- Crépi extérieur 20 mm
- Complément d'isolation extérieur 100 mm

MURS DE L'ESPACE TAMPON (LOCAL NON OCCUPE) :

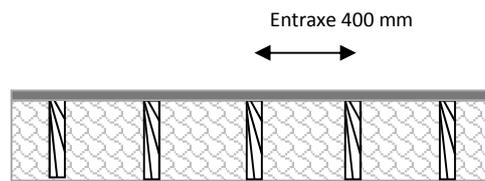
- Mur en béton 200 mm
- Crépi extérieur 20 mm

PLANCHER HAUT (TOITURE TERRASSE) :



- Section des entrails 45x220 mm. Entraxe entre les entrails 400 mm.
- Panneau OSB 12 mm entre les deux couches d'isolant
- Isolant support d'étanchéité 200 mm.
- Etanchéité extérieur bitume 5 mm.
- Parement plâtre intérieur 13 mm.
- Isolant entre entrails 220 mm.

PLANCHER BAS :



- Section des solives 75x250 mm.
- Isolant entre solive 250 mm.
- Plancher bois type OSB 18 mm.
- Linoleum 5 mm

Illustration 8 : Détails des compositions des parois du local et de l'espace tampon

2.2. Caractéristiques thermiques des matériaux et composants

2.2.1. Parois opaques

- Isolant : Conductivité thermique $\lambda=0,04$ W/(m.K), densité $\rho = 40$ kg/m³, Capacité thermique $C_p = 1030$ J/(kg.K).
- Bois ossature : Conductivité thermique $\lambda=0,13$ W/(m.K), densité 500 kg/m³, capacité thermique $C_p=1600$ J/(kg.K).
- OSB : Conductivité thermique $\lambda=0,13$ W/(m.K), densité 650 kg/m³, capacité thermique $C_p=1700$ J/(kg.K).
- Crépi : Conductivité thermique $\lambda=1,3$ W/(m.K), densité 1900 kg/m³, capacité thermique $C_p=1000$ J/(kg.K)

Emissivité	Absorbance solaire	Absorbance visible	Rugosité
0,9	0,6	0,6	Rugueux

- Plâtre : Conductivité thermique $\lambda=0,25$ W/(m.K), densité 825 kg/m³, capacité thermique $C_p=1000$ J/(kg.K).

Emissivité	Absorbance solaire	Absorbance visible	Rugosité
0,9	0,6	0,6	Rugueux

- Etanchéité bitume : Conductivité thermique $\lambda=0,23$ W/(m.K), densité 1050 kg/m³, capacité thermique $C_p=1000$ J/(kg.K).

Emissivité	Absorbance solaire	Absorbance visible	Rugosité
0,9	0,6	0,6	Rugueux

- Linoleum : Conductivité thermique $\lambda=0,17$ W/(m.K), densité 1200 kg/m³, capacité thermique $C_p=1400$ J/(kg.K).

Emissivité	Absorbance solaire	Absorbance visible	Rugosité
0,9	0,6	0,6	Rugueux

- Béton plein: Conductivité thermique $\lambda=2$ W/(m.K), densité 2000 kg/m³, capacité thermique $C_p=1000$ J/(kg.K).

2.2.2. Parois vitrées

- Fenêtre Coefficient $U_w = 1,5$ W/(m².K), facteur solaire $S_w = 0,45$

2.3. Conditions aux limites

2.3.1. Conditions extérieures

Le local virtuel étudié et l'espace tampon sont soumis à des sollicitations climatiques extérieures variables. On utilise les données météo RT au pas de temps horaire correspondant à la commune de Trappes (rayonnement global horizontal, rayonnement diffus horizontal, température extérieure). Le choix de cette localisation est motivé d'une part par la disponibilité des données sous format VOLTRA ce qui facilite le paramétrage du modèle dans le logiciel et d'autre part par le caractère médian de cette localisation (ni très chaud ni très froid). Néanmoins d'autres climats pourront être testés au travers des études de sensibilité (un climat méditerranéen et continental par exemple). Les coordonnées géographiques de la localité sont : latitude 48.77 et longitude 2.01 et le coefficient de réflexion du sol est égal à 0.2

La condition aux limites d'échange extérieure est fixé à $13,5$ W/(m².K).

- Rayonnement global horizontal

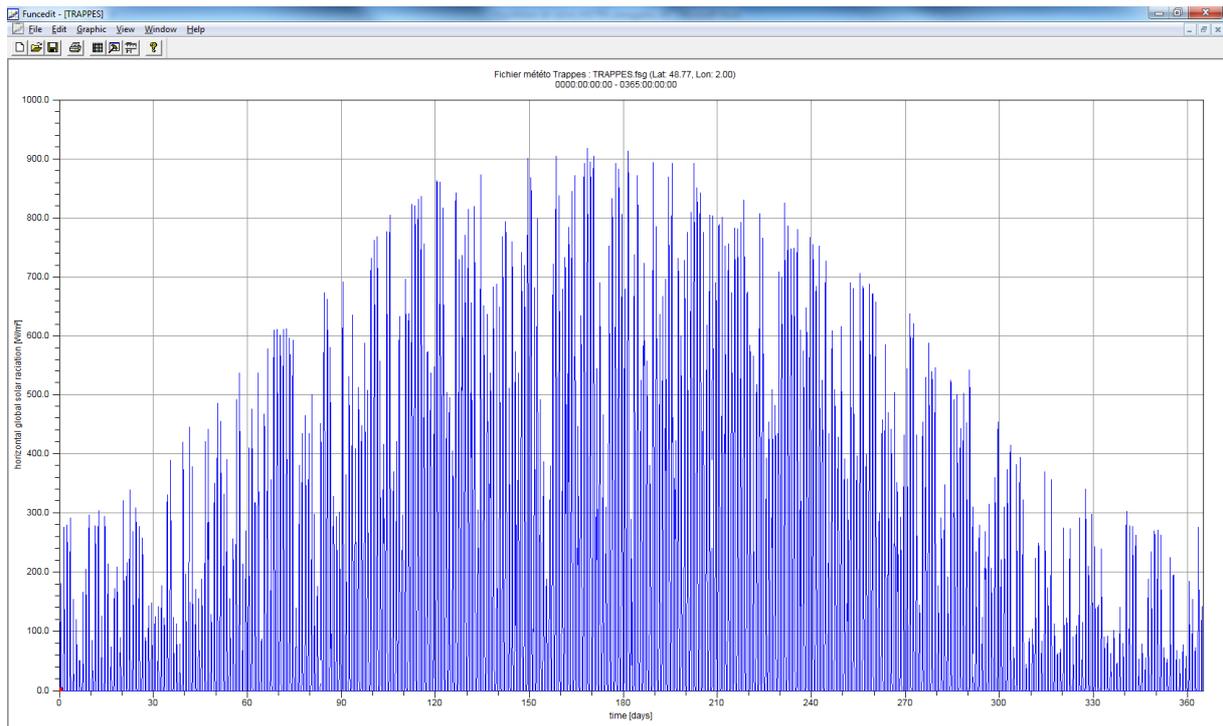


Illustration 9 : Evolution du rayonnement global horizontal

- Rayonnement diffus horizontal

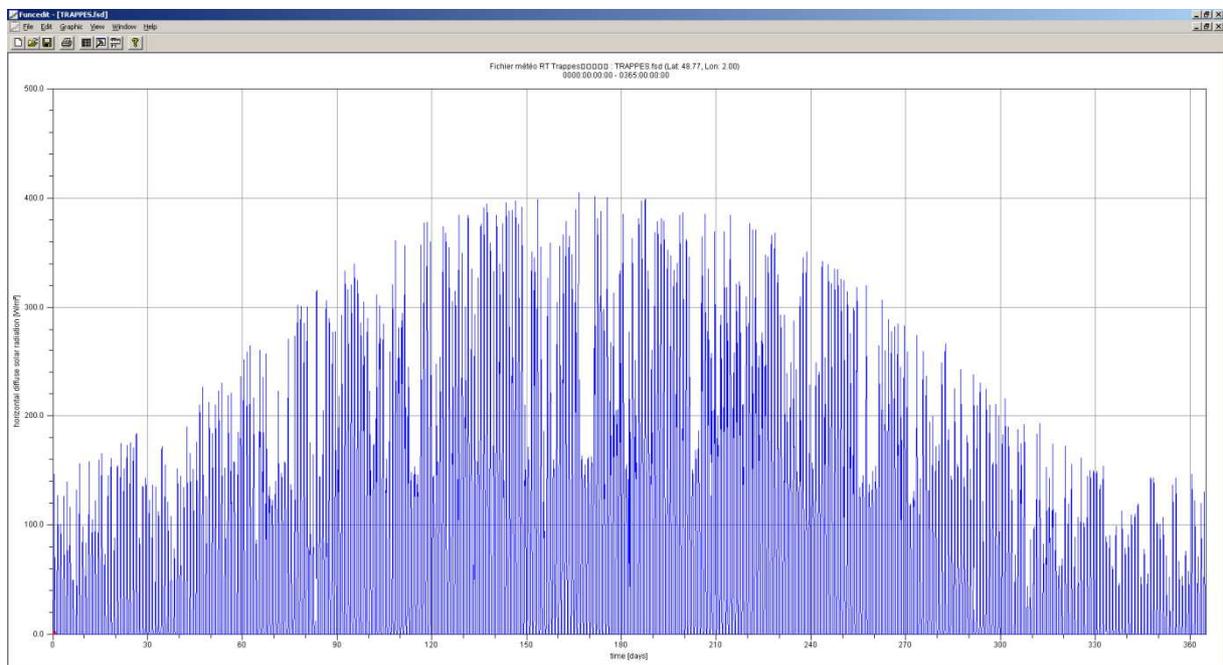


Illustration 10 : Evolution du rayonnement diffus horizontal

- Température extérieure

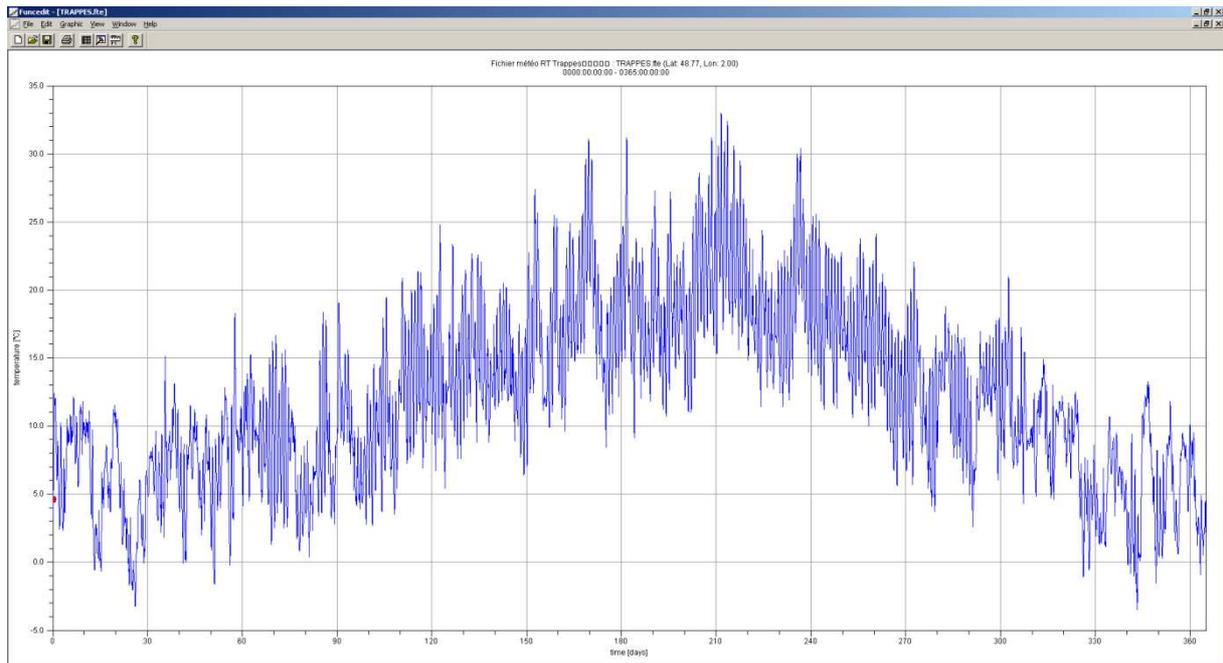


Illustration 11 : Evolution de la température extérieure

2.3.2. Conditions intérieures

La réponse en température intérieure est laissée libre.

- Sous VOLTRA, la condition est BC_FREE (évolution libre) avec un coefficient d'échange convectif moyen $h_c = 3,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Les échanges par rayonnement se font en tenant compte des facteurs de forme à partir des températures calculées de façon itérative.
- Sous EnergyPlus le modèle utilisé est TARP

2.3.3. Conditions dans l'espace tampon

Le local étudié est modélisé en contact avec un espace tampon non chauffé dont la température est laissée libre également. Une condition adiabatique est considérée au niveau du plancher bas de l'espace tampon.

3. ETUDE PARAMETRIQUE

3.1. Scénarios considérés

Afin de mieux cerner l'impact potentiel de l'ossature sur la réponse en température du local, quatre modèles de calculs et cinq scénarios ont été considérés.

Les quatre modèles de calcul sont décrits ci-dessous :

- Modèle 1 : Cellule avec ossature bois
- Modèle 2 : Cellule avec ossature à faible inertie : la chaleur spécifique du bois de l'ossature est considérée égale à celle de l'isolant.
- Modèle 3 : Cellule sans ossature: L'ossature bois n'est pas considérée et aucune correction n'est apportée.
- Modèle 4 : Cellule sans ossature bois avec prise en compte des ponts thermiques : Les ponts thermiques intégrés et de liaisons dus à la présence de l'ossature sont pris en compte en modifiant la conductivité thermique des isolants du mur, plancher bas et plancher haut. Les ponts thermiques de liaisons : Mur/Mur, Mur/Plancher sont affectés aux murs.

Pour le modèle 4, les corrections de conductivité thermique apportées à l'isolant sont données dans le tableau ci-après :

Paroi	ΔU PTs intégrés [W/(m ² .K)]	ΔU PTs de liaisons [W/(m ² .K)]	λ_{eq} isolant [W/(m.K)]	Ep isolant [mm]
Mur	0.05	0.05	0.066	245
Plancher haut	0.01	-	0.044	420
Plancher bas	0.05	-	0.062	250

Le tableau suivant résume les différents modèles envisagés en termes de prise en compte de l'inertie du bois et des ponts thermiques :

	Prise en compte de l'inertie du bois de l'ossature	Prise en compte 2D/3D des ponts thermiques de l'ossature	Prise en compte simplifiée des ponts thermiques de l'ossature dans les parois
Modèle 1	X	X	
Modèle 2		X	
Modèle 3			
Modèle 4			X

Les scénarios tiennent comptes de différentes situations. Le scénario A ne considère aucune ventilation ni puissance dissipé. Le bâtiment est orienté sud. Le scénario B est le même mais considère une ventilation de base continue à 0,5vol/h. Le scénario C considère en plus une surventilation nocturne de 22h à 6h de 2 vol/h. Le scénario E considère en plus une puissance dissipée de 5W/m² le jour et de 1,4 W/m² la nuit. Enfin, le scénario D est le même que le scénario A, avec une orientation Ouest.

Le tableau suivant résume les différents scénarios envisagés en termes d'orientation et de ventilation

Scénario	Orientation fenêtre	Ventilation
A	SUD	SANS
B	SUD	0,5 Vol/h
C	SUD	0,5 Vol/h + la nuit de 22h à 6h 2 Vol/h
D	OUEST	SANS
E	SUD	0,5 Vol/h + la nuit de 22h à 6h 2 Vol/h + Puissance dissipée de 5 W/m ² de 6h à 22h et de 1,4 W/m ² de 22h à 6h.

3.2. Indicateurs mesurés

Plusieurs indicateurs ont été mesurés :

- La réponse en température moyenne de l'air dans le local étudié sur la période de calcul pour chacun des modèles et scénarios envisagés sur la période du mois de Juin.
- Les températures d'air maximales obtenues sur le mois de Juin
- Les degrés-heures supérieurs à 24, 26 et 28 °C sur le mois de Juin

3.3. Résultats EnergyPlus

La réponse en température varie beaucoup selon le scénario considéré. Comme il peut être constaté dans l'illustration 12 les scénarii A et D sont ceux qui comportent le moins d'amplitude hebdomadaire. Cela est dû à l'absence de ventilation. Au contraire les scénarii C et E sont ceux qui possèdent la plus grande variation hebdomadaire en raison de la surventilation nocturne. Enfin, le scénario E est celui qui monte le plus en température en raison des apports internes (puissance dissipée).

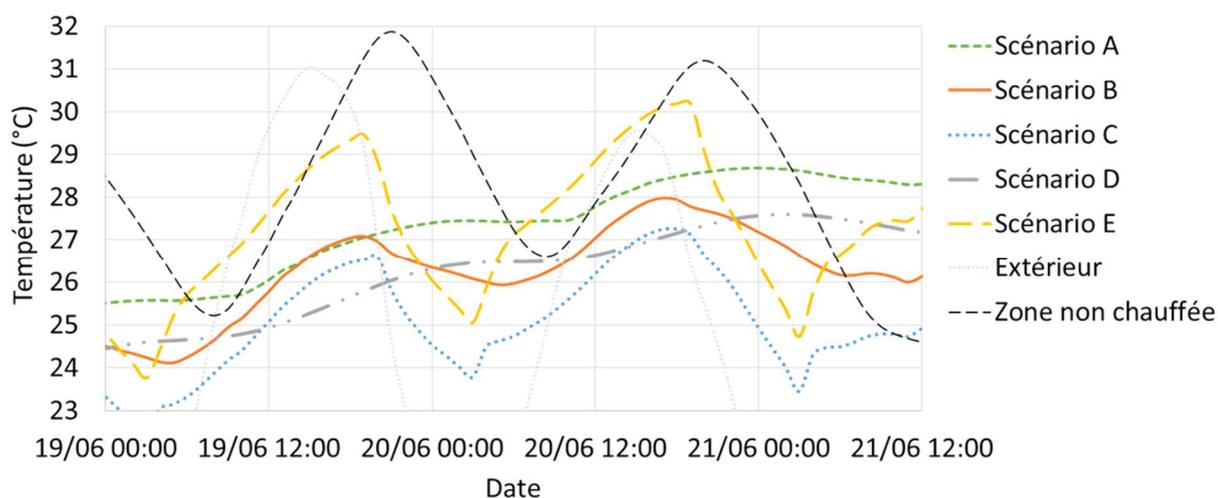


Illustration 12 : Réponse en température du modèle 1 pour les différents scénarios

Par la suite les différents modèles sont comparés sur la base d'un seul scénario (Illustration 13, Illustration 14, Illustration 15, Illustration 16 et Illustration 17). Quel que soit le scénario considéré, le

modèle 1 qui tient compte de l'inertie de l'ossature possède une température toujours plus favorable que les autres modèles.

Il est à noter que la prise en compte des ponts thermiques sans inertie de manière détaillée en 2D (modèle 2) ou simplifiée (modèle 4) induit une température plus importante que de ne pas du tout considérer les montants d'ossature (modèle 3). Cela peut s'expliquer par le fait que les échanges thermiques additionnels avec l'extérieur ne sont pas compensés par le déphasage induit par l'inertie de l'ossature contrairement au modèle 1.

Ainsi, durant la journée la plus chaude, l'écart de température maximum entre le modèle 1 et les modèles 2 ou 4 varie de 0,9°C à 1,7°C selon le scénario considéré.

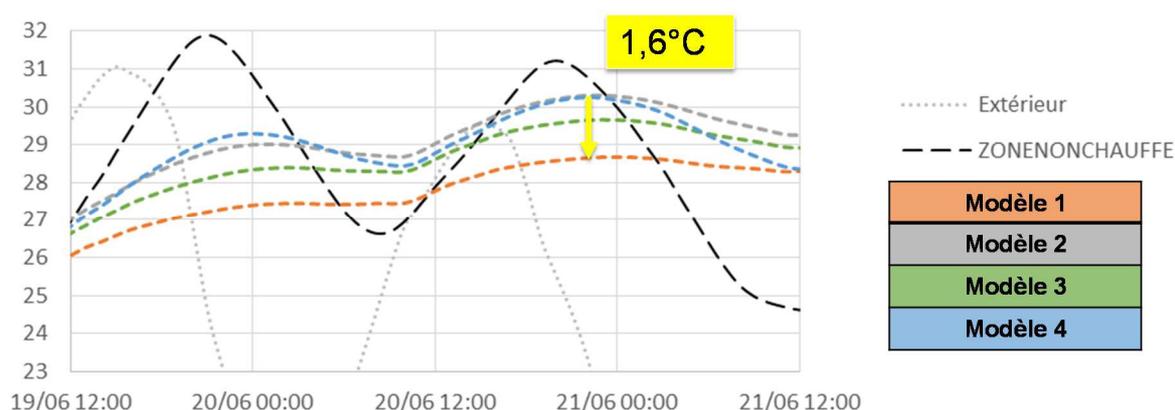


Illustration 13 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario A (sans ventilation / sans apports internes / SUD)

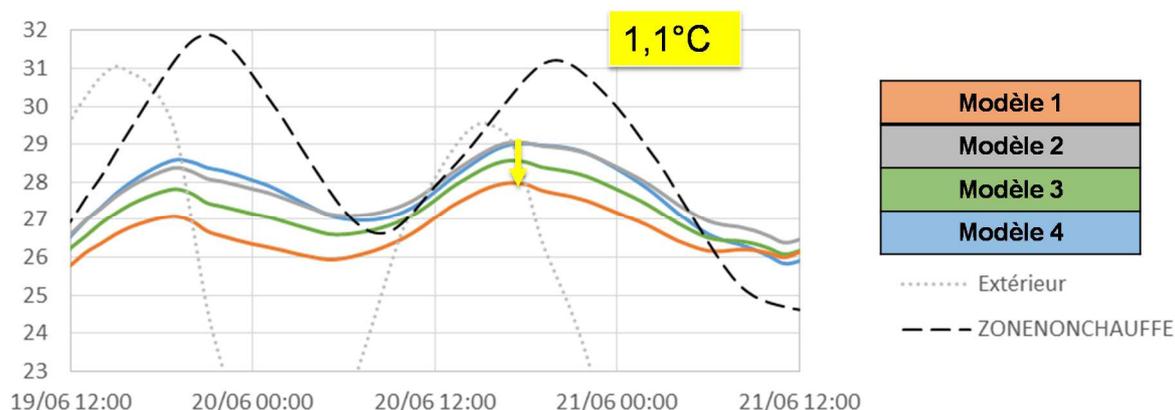


Illustration 14 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario B (ventilation base / sans apports internes / SUD)

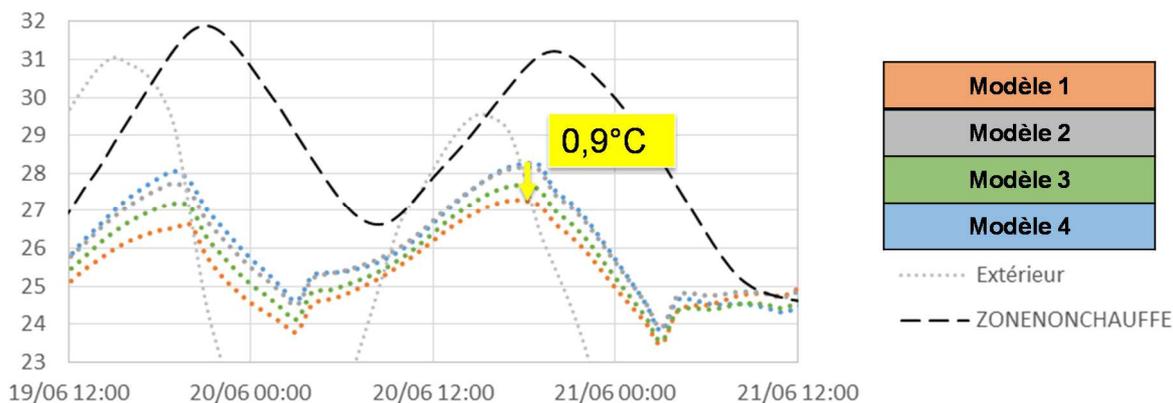


Illustration 15 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario C (ventilation base et naturelle / sans apports internes / SUD)

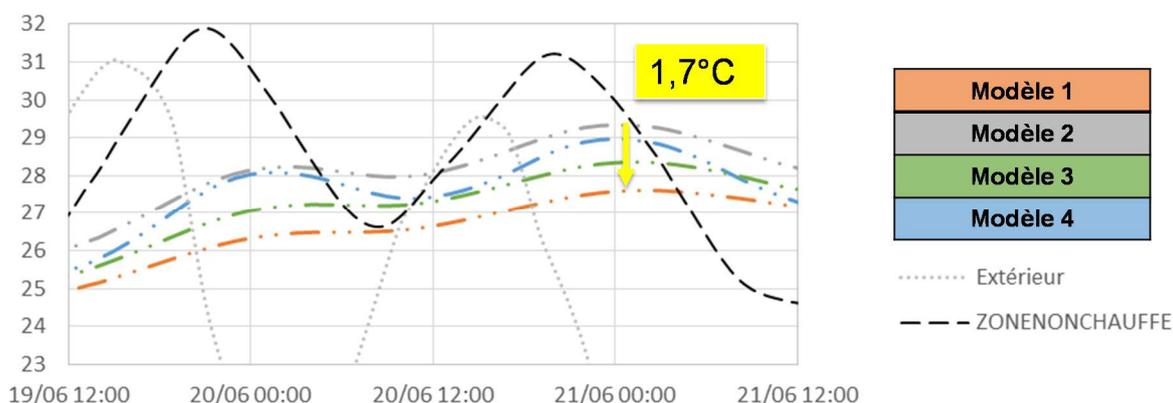


Illustration 16 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario D (sans ventilation / sans apports internes / OUEST)

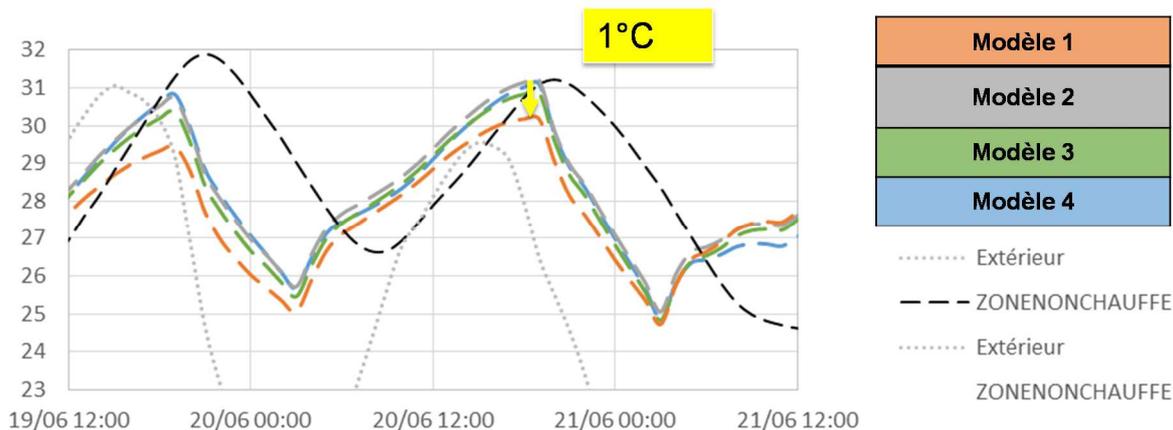


Illustration 17 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario E (ventilation base et naturelle / apports internes / SUD)

Les températures d'air maximales obtenues pour les quatre modèles sur les différents scénarii sont regroupées dans l'illustration 18.

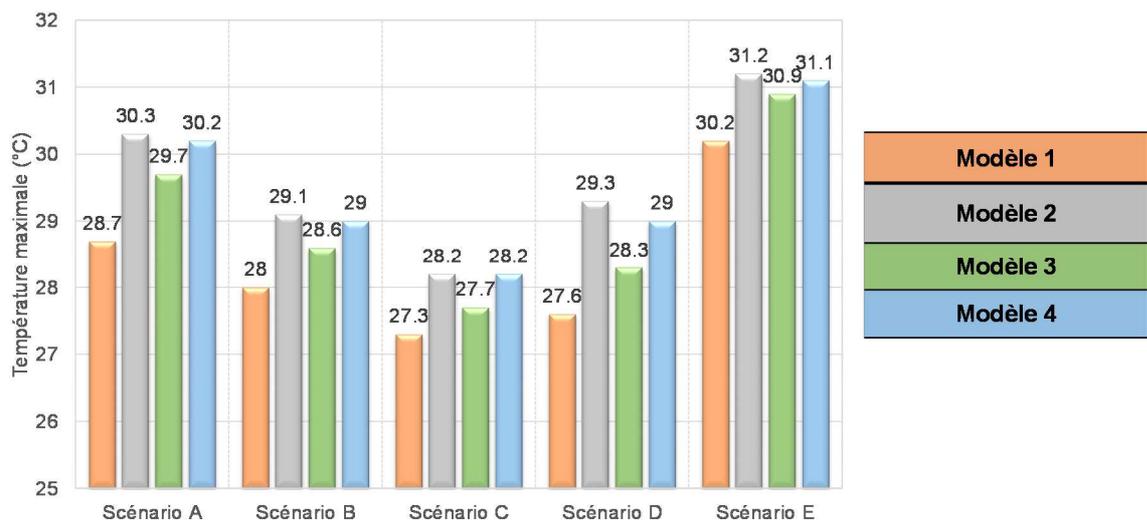


Illustration 18 : Températures maximales obtenues pour les différentes configurations calculées

Les degrés-heure au-dessus de 24°C, 26°C et 28°C calculés pour chaque modèle et pour chacun des scénarios (Illustration 19, Illustration 20, Illustration 21, Illustration 22 et Illustration 23) confortent les résultats obtenus en analysant les profils de température et les températures maximales. En effet quel que soit le scénario considéré, le modèle 1 qui considère l’inertie des montants d’ossature et celui qui possède le moins de degrés-heures.

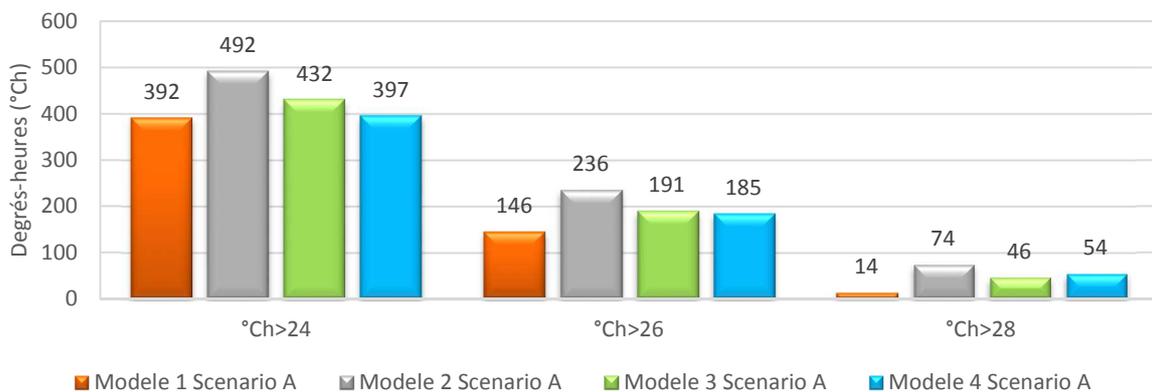


Illustration 19: Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario A

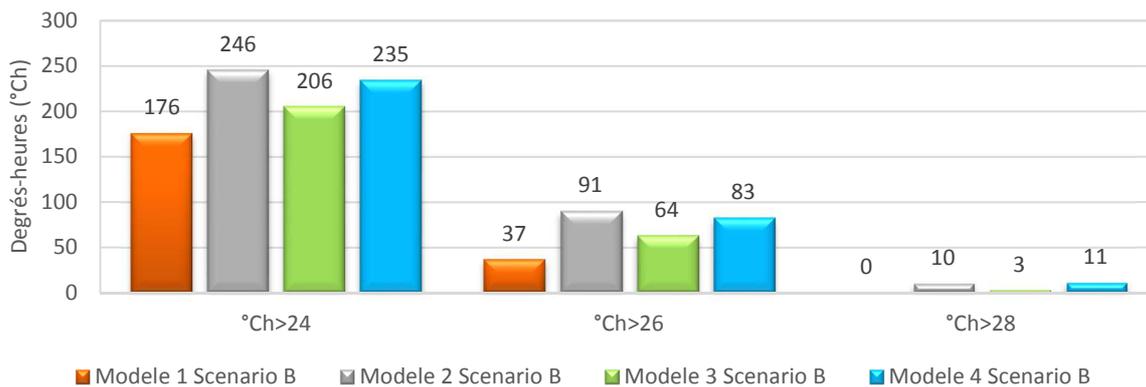


Illustration 20 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario B

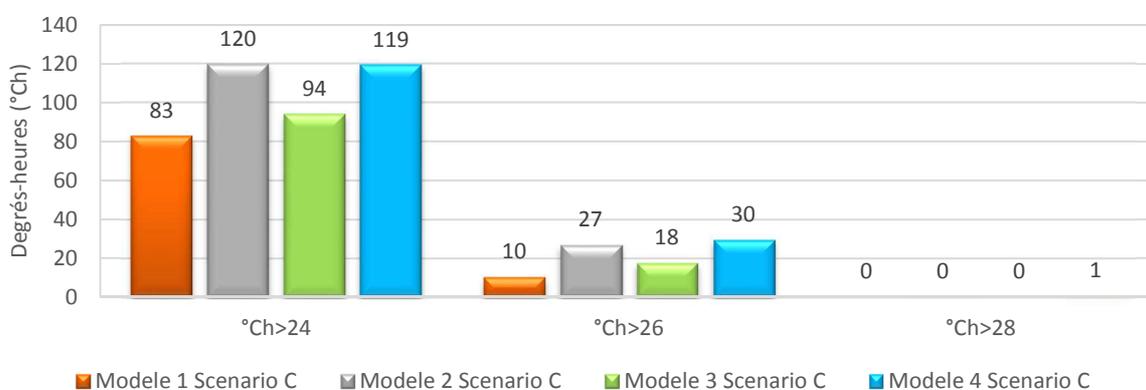


Illustration 21 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario C

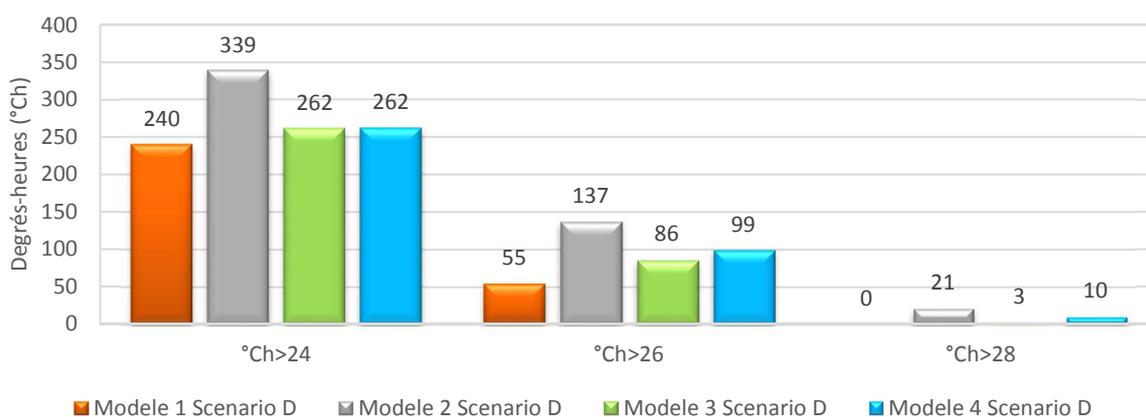


Illustration 22 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario D

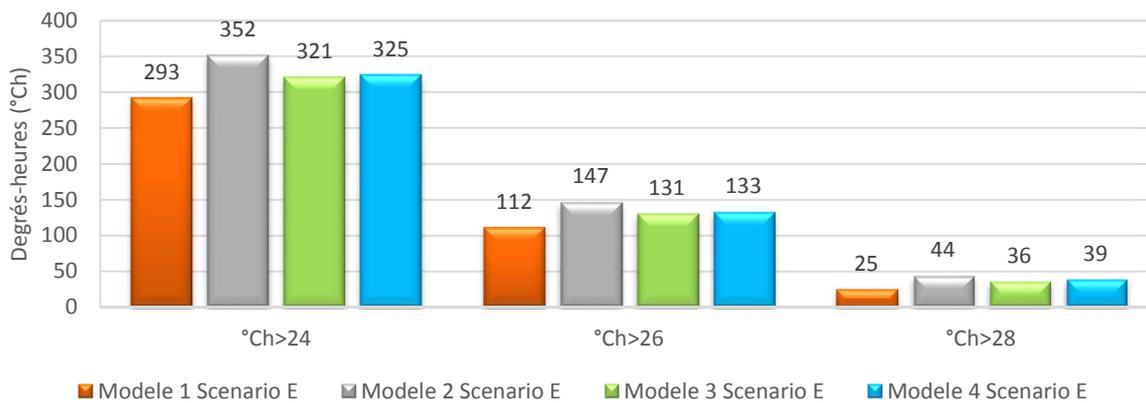


Illustration 23 : Comparaison des degrés-heures cumulés au-dessus de 24, 26 et 28 °C pour les quatre modèles considérés et le scénario D

3.4. Résultats VOLTRA

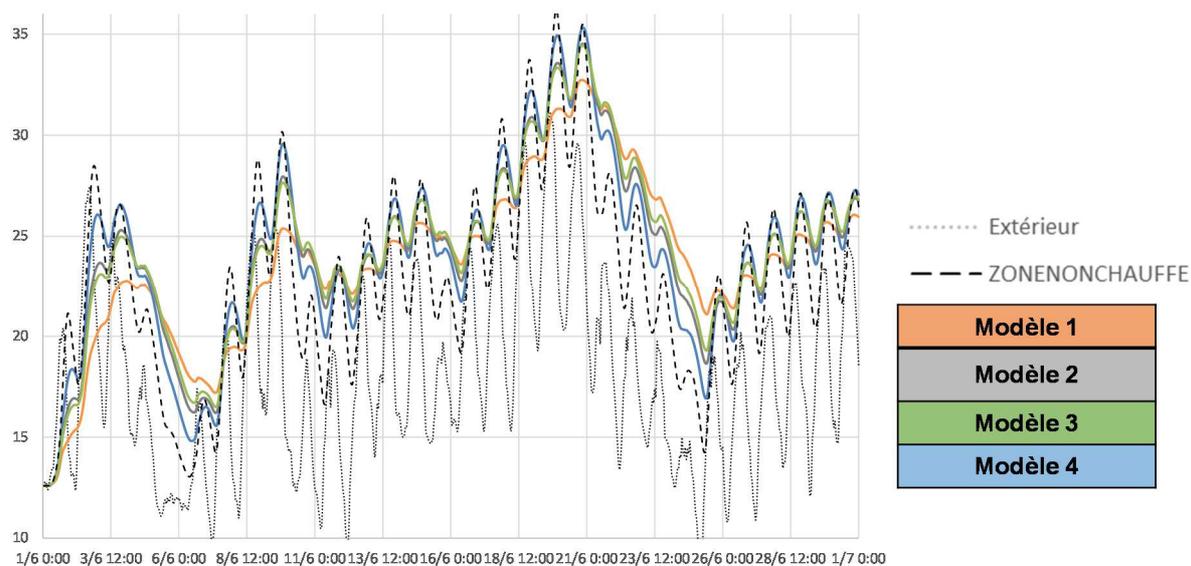


Illustration 24 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario A (sans ventilation / sans apports internes / SUD)

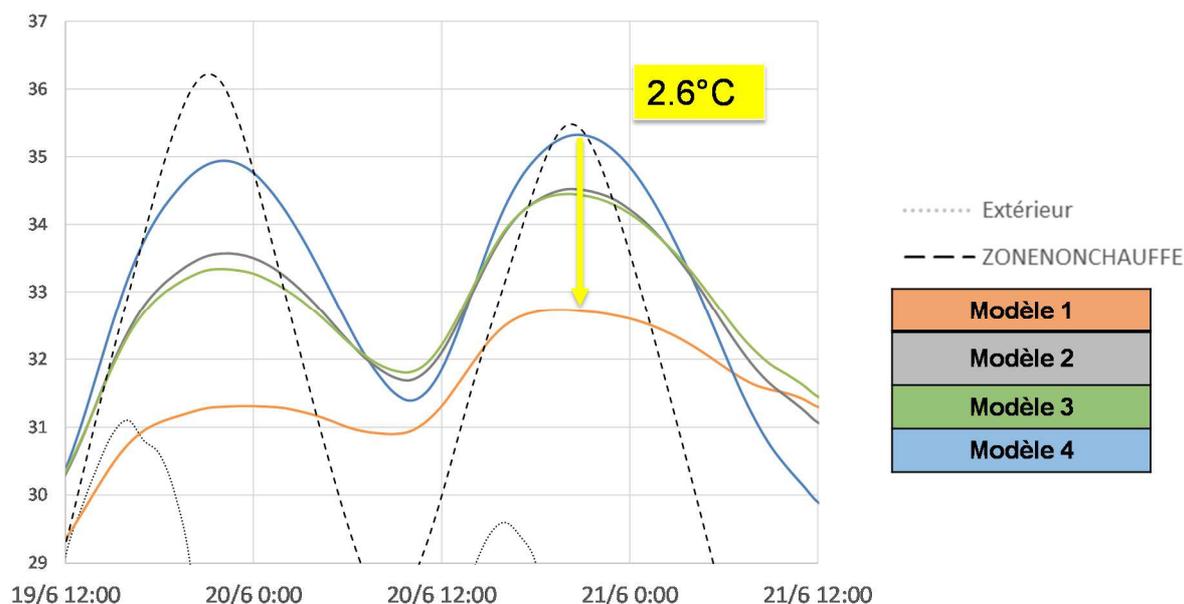


Illustration 25 : Réponse en température des quatre modèles pour le scénario A (sans ventilation / sans apports internes / SUD)- Zoom 20 et 21 juin

L'impact de l'inertie des montants observé avec EnergyPlus est confirmé par le résultat obtenu sous VOLTRA (Illustration 24 et Illustration 25). Le modèle 1 est celui qui conduit aux réponses en température les plus basses lors de pics de chaleur avec un écart de 2,6°C durant la journée la plus chaude.

3.5. Conclusions

Les résultats de l'étude paramétrique réalisée montre que la prise en compte de l'inertie des montants bois doit être effectuée dans les modèles de simulation thermique dynamique. Des écarts de température allant jusqu'à 1,7°C avec EnergyPlus et 2,6°C avec VOLTRA ont été constatés entre le modèle tenant compte de l'inertie des montants d'ossature et le modèle tenant compte uniquement des ponts thermiques des montants à partir des tables de calcul de la RT 2012. Rappelons que l'étude paramétrique a ici été réalisée dans des conditions favorisant l'apport d'inertie des montants bois. Ainsi il n'y a pas de lame d'air ni de surépaisseur d'isolant entre les montants et les revêtements intérieurs, le panneau OSB est situé côté extérieur et l'entraxe des montants est faible (400mm).

Afin d'aller plus loin dans l'analyse de la sensibilité de l'inertie des montants sur les réponses en températures des analyses de sensibilité doivent être réalisées. C'est l'objet de la section suivante.

4. ANALYSE DE SENSIBILITE

Prendre en compte l'inertie semble avoir un impact conséquent. Afin de déterminer les gains potentiels maximums, d'identifier les paramètres qui influencent ces gains et de comprendre quelles sont les décisions qui peuvent être impactées par la prise en compte de l'inertie, il est proposé ici de passer par une analyse de sensibilité. Pour cela le logiciel d'analyse de sensibilité ASPIC® issu des travaux du projet précompétitif amont AST+ d'INEF4 sera utilisé.

4.1. Les méthodes d'analyse de sensibilité

Selon Iooss (2011): « l'analyse de sensibilité (AS) permet notamment de déterminer quelles sont les variables d'entrée du modèle qui contribuent le plus à une quantité d'intérêt donnée en sortie du modèle, quelles sont celles qui n'ont pas d'influence et quelles sont celles qui interagissent au sein du modèle ».

4.1.1. Méthodes d'analyse de sensibilité globales

Contrairement aux méthodes d'analyse de sensibilité « locales », les méthodes d'analyse de sensibilité « globales » sont appliquées à l'ensemble du domaine de variation des variables d'entrées considérées. Il existe de nombreuses méthodes d'analyse de sensibilité globale dont une partie est représentée et classée dans l'illustration 26 selon la complexité/régularité du modèle et le coût nombre d'évaluations du modèle (Iooss 2011). Cette figure permet de sélectionner un type d'AS adapté au modèle traité, tout en minimisant le nombre d'évaluations nécessaires. Deux grandes catégories de méthodes se distinguent : les méthodes de criblage et les méthodes de décomposition de la variance.

Les méthodes de criblage sont adaptées pour des modèles numériques de dimensions élevées avec plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de variables d'entrée et dont les simulations sont chronophages. Ces méthodes permettent notamment de classer les variables de conception par ordre d'influence. Ainsi pour des modèles au comportement linéaire, des méthodes de criblage de type OAT (*One At a Time*) ou un plan supersaturé suffisent à caractériser l'influence des entrées du système. Cependant, il est difficile de qualifier a priori la complexité/régularité d'un modèle numérique de bâtiment, étant donné le nombre considérable de variables en entrée, la nature de leur action sur une variable d'intérêt, ainsi que le niveau d'interaction entre elles. La méthode de Morris (Morris 1991) se révèle être la moins coûteuse en nombre d'évaluation pour l'analyse de systèmes non monotone et discontinu. C'est la méthode de criblage la plus utilisée pour l'analyse énergétique des bâtiments (Tian 2013).

Les méthodes basées sur la décomposition de la variance consistent à déterminer la responsabilité de chaque variable et groupe de variables en interactions sur la variance totale de la sortie d'intérêt du modèle numérique. Par exemple, la méthode de calcul des indices de Sobol (Sobol 1993) est adaptée à l'analyse de sensibilité globale de modèles non monotones et discontinus et est donc adaptée à l'utilisation d'un modèle numérique en boîte noire. L'inconvénient principal de cette méthode est le nombre élevé d'évaluations du modèle requis (Iooss 2011). Par exemple la technique de Monte Carlo nécessite un nombre d'évaluations du modèle de l'ordre de 2^n (Sudret 2008; Crestaux et al. 2009), ce qui pour un modèle comportant 20 variables nécessite une évaluation de plus d'un million de solutions. Une alternative consiste à utiliser la construction d'un métamodèle pour calculer les indices de Sobol de manière plus efficace (Iooss 2011).

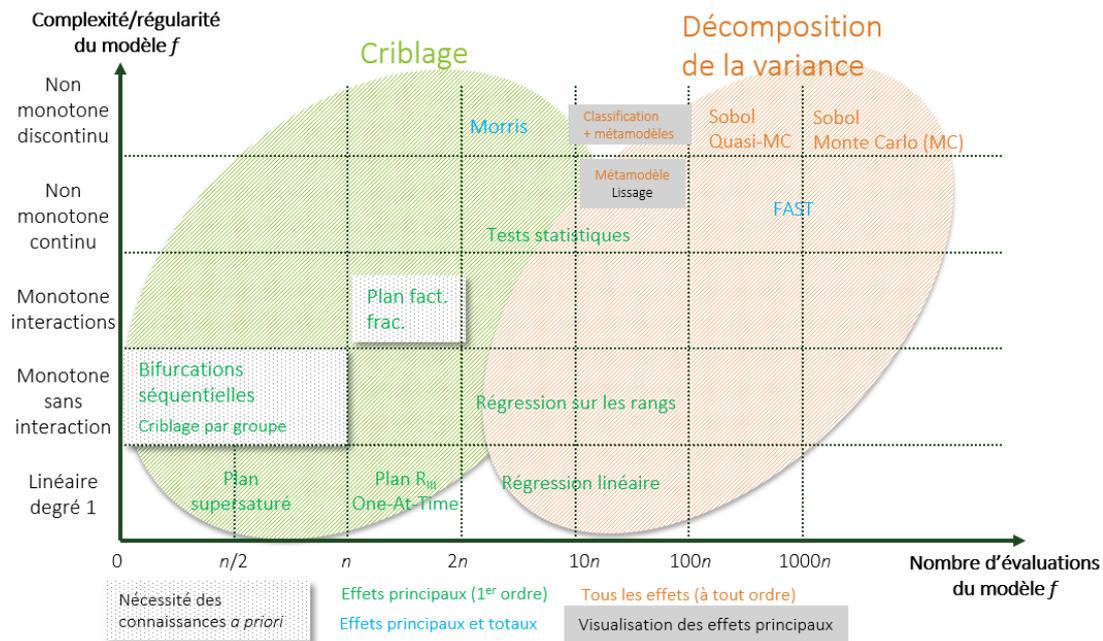


Illustration 26 : Classement des méthodes d'analyse de sensibilité (d'après Iooss 2011)

D'après cette illustration, les méthodes Morris et Sobol permettent de caractériser des systèmes complexes, à l'aide d'un nombre plus ou moins important de simulations. Si l'hypothèse que les bâtiments fonctionnent comme des systèmes au comportement non linéaire monotone est faite, les indices de régression linéaire et linéaire sur les rangs sont des alternatives intéressantes. C'est en partie la conclusion proposée par (Tian 2013) qui recommande l'utilisation des indices SRC et PRCC. En outre, ces méthodes possèdent l'avantage d'employer des tirages aléatoires de type Monte-Carlo. Pour un échantillon suffisamment grand, il est donc possible de traiter les résultats pour obtenir des informations statistiques intéressantes : moyenne, densité de probabilité, incertitude, etc.

Dans ce travail les méthodes d'analyse de sensibilité suivantes seront ainsi utilisées : Méthode des indices de Sobol et PRCC.

4.1.2. La méthode des indices de Sobol

Les coefficients de Sobol nommés « mesures d'importance basées sur la variance » ou indices de Sobol sont compris entre 0 et 1 et leur somme vaut 1. Ils sont particulièrement faciles à interpréter en termes de pourcentage de la variance de la réponse. Leur calcul repose sur l'hypothèse qu'un modèle non linéaire et non monotone peut être décomposé en une somme de fonctions élémentaires orthogonales.

Sudret (2008) et Crestaux et al. (2009) ont montré que les indices de Sobol du premier ordre et d'ordre total se déduisent directement depuis les coefficients de métamodèles obtenus par décomposition en polynômes de chaos. Dans cette étude les indices de Sobol ont été obtenus par décomposition en polynômes du chaos. L'avantage est ainsi de réduire la taille de l'échantillon nécessaire à l'obtention des indices de Sobol.

4.1.3. La méthode du coefficient de corrélation partielle sur les rangs (PRCC)

Elle appartient à la catégorie des méthodes de régression linéaire. La méthode PRCC transforme les matrices d'entrée (paramètres) et de sortie (résultats de simulation) en les classant selon les valeurs de leurs paramètres. Cette méthode permet de s'affranchir des non-linéarités éventuelles du système. La méthode Coefficient de Corrélation est ensuite appliquée aux résidus obtenus en soustrayant aux entrées (X et Y) classées leur approximation obtenue par régression linéaire. Le processus de calcul s'appuie sur les travaux de (Marino et al. 2008). Les indices obtenus varient de -1 à 1 en fonction de l'importance et de la « direction » de l'action des paramètres et peuvent être représentés graphiquement de la manière suivante :

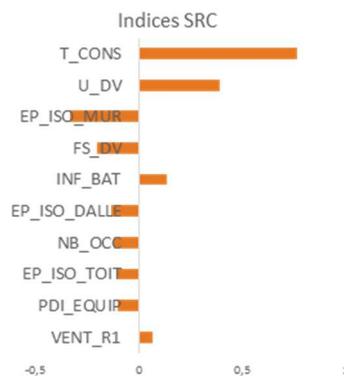


Illustration 27 : Indices PRCC des paramètres d'un logement appliqués aux besoins de chauffage

Le schéma se lit de la manière suivante :

- les paramètres les plus hauts ont le plus d'influence sur les besoins de chauffage
- lorsque la barre est orientée à droite, l'augmentation du paramètre entraîne l'augmentation de l'indicateur observé (ici le besoin de chauffage). Par exemple l'augmentation de la température de consigne entraîne une augmentation des besoins.

4.1.4. Traitement statistique des résultats

Un des intérêts des tirages Monte-Carlo et des simulations réalisées pour la détermination des indices PRCC et la génération des métamodèles nécessaire à l'estimation des indices de Sobol est la possibilité de mettre en œuvre un traitement statistique des résultats. Le logiciel ASPIC® développé dans le cadre du projet STD+ permet d'associer une courbe normale asymétrique à l'histogramme obtenu. Une méthode d'optimisation est employée pour calibrer les paramètres de la fonction :

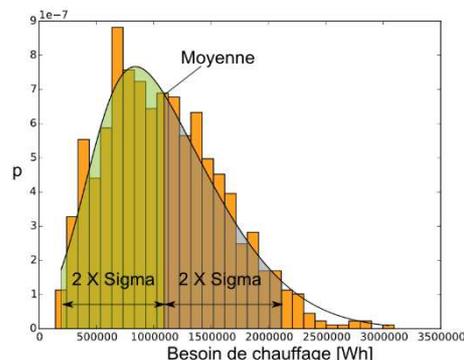


Illustration 28 : Courbe normale asymétrique calibrée sur des besoins de chauffage

Dans l'hypothèse où l'on considère que la répartition des résultats obtenus par simulation est semblable à une loi normale asymétrique, il est possible de déterminer la probabilité que possède un indicateur d'atteindre une valeur cible.

4.2. Choix de l'indicateur et des paramètres étudiés

L'indicateur choisi pour cette analyse de sensibilité correspond à l'écart des températures maximales (ΔT) atteintes le 21 juin entre le modèle 1 ($Tmax_1$) qui considère l'inertie des ponts thermiques et le modèle 2 ($Tmax_2$) qui considère que la chaleur spécifique du bois de l'ossature est considérée égale à celle de l'isolant. Il s'agit donc de déterminer quels sont les paramètres qui vont avoir la plus grande influence sur l'écart entre les deux modèles et dans quelle proportion.

$$\Delta T = (Tmax_2 - Tmax_1)_{21\text{juin}}$$

Le scénario E qui considère la ventilation naturelle, mécanique et les apports internes sera utilisé pour l'étude. C'est celui qui est le plus proche des conditions considérées dans la réglementation thermique.

L'analyse de sensibilité a été réalisée sous EnergyPlus qui nécessite des temps de calculs inférieurs à ceux de VOLTRA.

Les paramètres et leurs plages de variation (min, max) ont été déterminés selon l'étude de configurations de base concernant les parois envisagées pour le local (Illustration 29). Ainsi 17 paramètres ont été sélectionnés (Illustration 30). Ces paramètres concernent les matériaux utilisés, la dimension du local ou de ses menuiseries, l'épaisseur des éléments ou encore l'orientation du local.

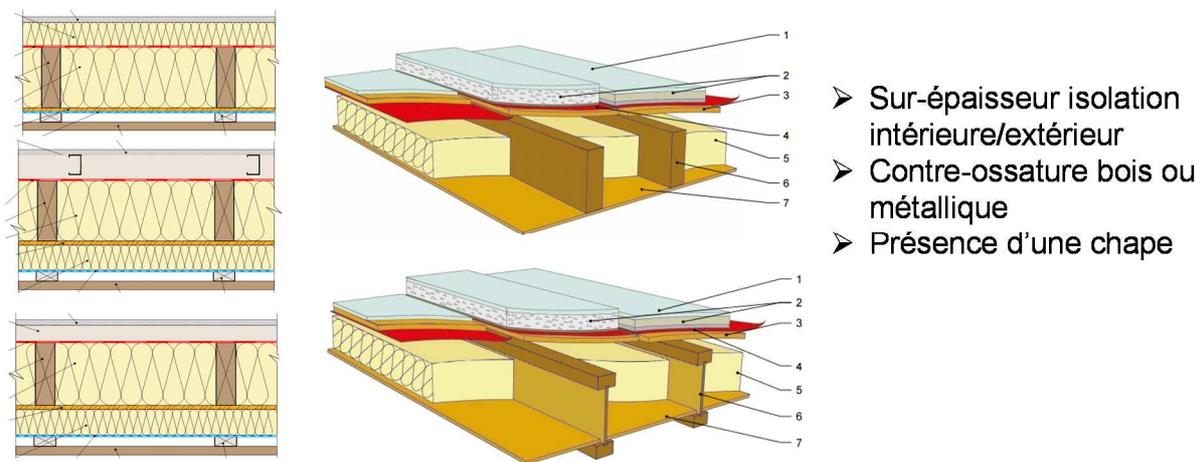


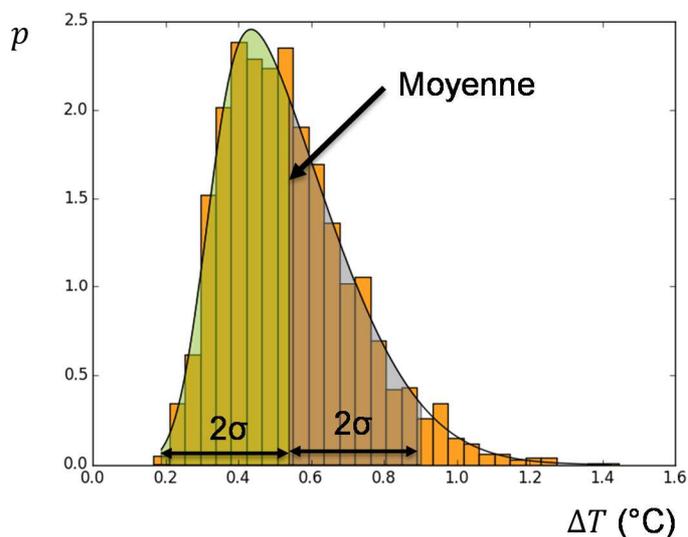
Illustration 29 : Configurations de base permettant de déterminer les paramètres à étudier

Numéro	Paramètre	Unité	Min	Max	Nom variable
1	Orientation	°	-90	90	ORIENT
2	Surface vitrée (hauteur 1m constante)	m ²	0.5	2	L_FEN
3	Taille parois bâti	m	3	7	L_MUR
4	Entraxe ossature mur et planchers	m	0.4	0.6	ENTRAXE
5	Epaisseur montant et solives	m	0.045	0.09 (double)	EP_OSS
6	Epaisseur isolant entre montant	m	0.12	0.16	EP_ISOL_M
7	Epaisseur isolant intérieur (mur)	m	0	0.06	EP_ISOL_INT
8	Epaisseur isolant extérieur (mur)	m	0	0.06	EP_ISOL_EXT
9	Epaisseur lame d'air (mur)	m	0	0.04	EP_AIR
10	Largeur contre-ossature lame d'air (mur)	m	0	0.04	EP_COSSV
11	Chape béton	m	0	0.2	EP_CHAPE
12	Epaisseur placo (mur et toiture)	m	0.013	0.026	EP_REV
13	Masse volumique isolant	kg/m ³	10	150	RHO_ISOL
14	Masse volumique placo	kg/m ³	750	1500	RHO_REV
15	Facteur solaire	-	0.3	0.5	FS_FEN
16	Epaisseur panneau contreventement intérieur	m	0	0.012	EP_OSB_INT
17	Epaisseur panneau contreventement extérieur	m	0	0.012	EP_OSB_EXT

Illustration 30 : Détail des 17 paramètres choisis et de leur plage de variation.

4.3. Résultats de l'analyse de sensibilité

Pour le calcul des indices de sensibilités, 3000 simulations ont été réalisées en $\approx 1h30$. Les indices PRCC et de Sobol ont été calculés pour l'indicateur ΔT . Les résultats obtenus ont dans un premier temps été traités statistiquement sous forme d'histogramme :



OBSERVATIONS :

- ECART MAX = 1,4°C
- ECART MIN = 0,2°C
- ECART MOYEN = 0,5°C

Illustration 31 : Courbe normale asymétrique calibrée sur l'écart de température maximale observé entre les deux modèles

Pour cette première approche, il est intéressant de constater que sur l'ensemble des solutions obtenues, la dispersion des résultats est très forte avec un écart de température entre les deux modèles variant de 0,2°C à 1,4°C. D'autre part, l'écart moyen de 0,5°C montre que la prise en compte de l'inertie des montants d'ossature peut être déterminante sur les décisions basées sur le *Tic*.

Le classement des paramètres à partir des indices PRCC et des indices de Sobol a été comparé en normalisant les indices PRCC pour que leurs sommes valent 1. L'illustration suivante montre une parfaite concordance entre les deux classements ce qui conforte les résultats de l'analyse de sensibilité.

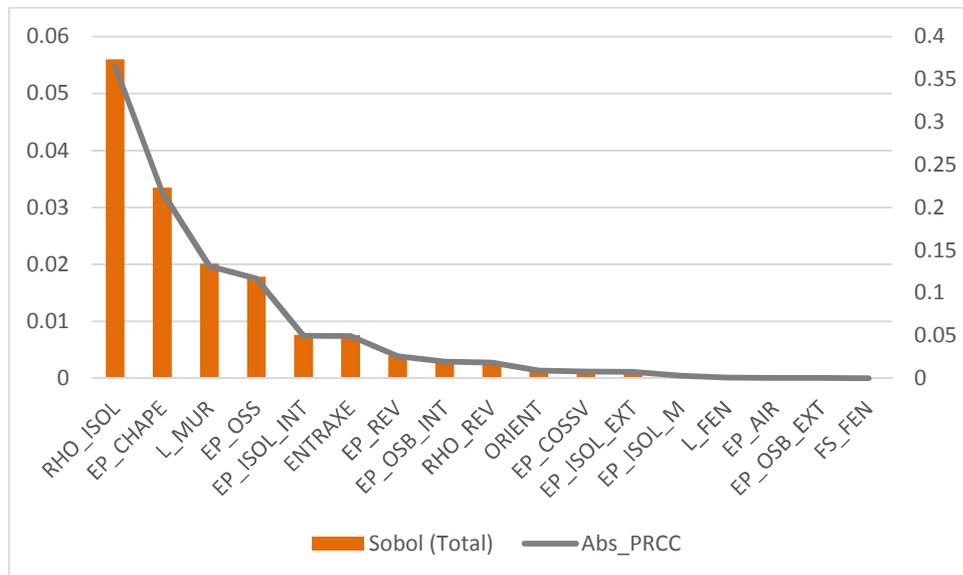


Illustration 32 : Comparaison classement des indices de Sobol avec les indices PRCC

De manière à obtenir une vision de l'impact des paramètres de conception et de connaître l'influence de l'augmentation ou de la diminution sur l'indicateur ΔT , la représentation graphique PRCC suivante est proposée :

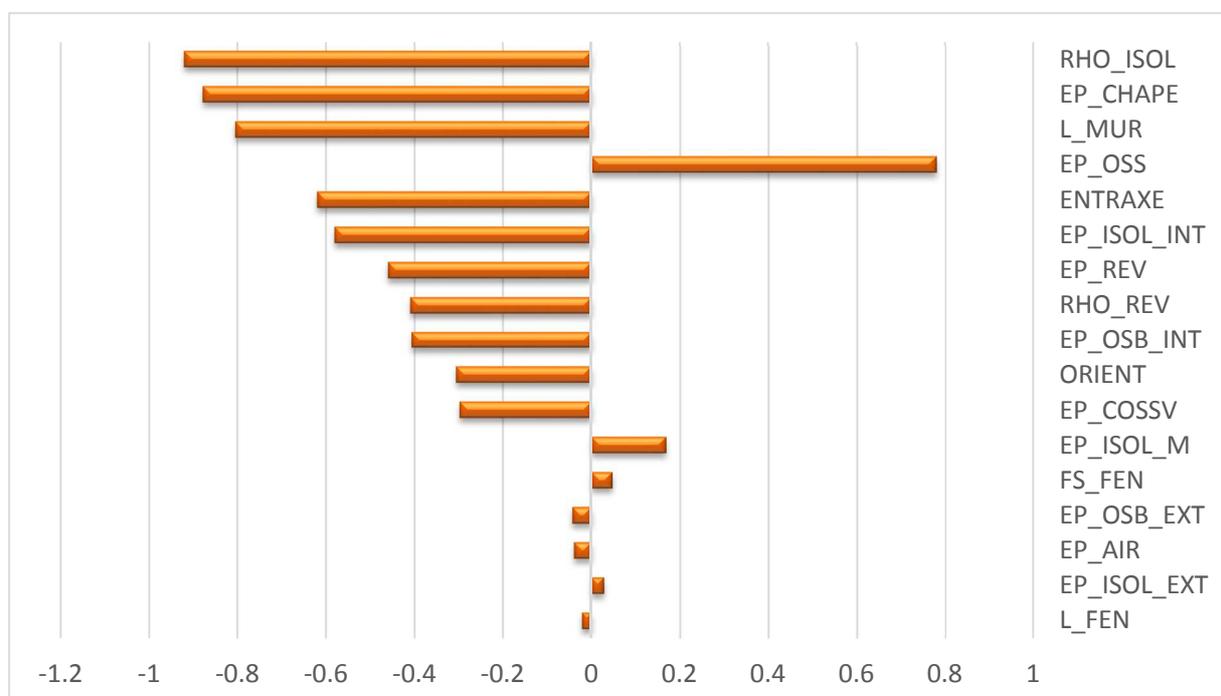


Illustration 33 : Visualisation des indices PRCC pour les 17 paramètres

A partir de cette représentation il est possible de relever les aspects suivants :

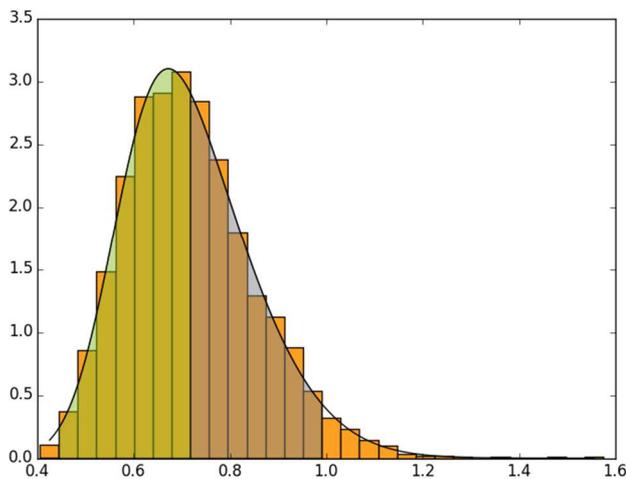
- Les paramètres qui influencent le plus la différence de température maximale entre les deux modèles sont la masse volumique de l'isolant (RHO_ISOL), suivi de l'épaisseur de chape (EP_CHAPE), de la longueur du mur (L_MUR), de l'épaisseur des montants d'ossatures (EP_OSS), et de l'entraxe (ENTRAXE).
- Plus la masse volumique de l'isolant est importante, moins la différence entre les deux modèles est significative au regard de la température maximale. La prise en compte de l'inertie des montants peut donc avoir un impact significatif sur le choix de l'isolant. Ainsi lorsque l'inertie des montants n'est pas considérée les isolants à forte inertie seront favorisés dans la méthode par calcul par rapport aux autres isolants. C'est un inconvénient en défaveur du choix des isolants à faible inertie. Le même constat peut être fait avec l'épaisseur et la masse volumique du revêtement intérieur.
- Avec ou sans chape, la conception est différente. Sans chape, chaque apport d'inertie compte. Avec chape, c'est elle qui prend le dessus. Avec chape la méthode de calcul RT actuelle peut être considérée comme étant suffisante.
- La présence d'une surépaisseur d'isolant intérieure atténue l'intérêt de prise en compte des montants d'ossature et diminue donc l'écart entre les deux modèles.
- L'augmentation de la longueur du mur qui implique une meilleure compacité va dans le sens d'une diminution de l'écart entre les deux modèles. En effet, le ratio de la surface de paroi sur le volume de la cellule diminue avec l'augmentation de la longueur des murs. Ainsi la proportion de montants d'ossature diminue également, ce qui amoindrit l'écart de température maximale entre les deux modèles.
- D'autres constats plus évidents peuvent être réalisés comme le fait que l'augmentation de l'épaisseur ou la diminution de l'entraxe des montants d'ossature qui augmentent la quantité de bois dans les parois accentuent également la différence de température entre les deux modèles.

Une autre analyse de sensibilité a été réalisée en éliminant certains paramètres. Ces paramètres ont été grisés dans le tableau ci-dessous. Il s'agit des paramètres ayant une influence sur l'indicateur étudié mais également de paramètres très influents qui ont été volontairement écartés. Par exemple le paramètre de l'épaisseur de chape a été supprimé afin d'étudier un cas où il n'y a pas d'inertie apporté par une dalle. De même la masse volumique des isolants a été fixée avec un isolant à faible inertie de type laine de verre. Enfin la longueur du mur n'a pas non plus été retenue pour garder une géométrie constante.

Numéro	Paramètre	Unité	Min	Max	Nom variable
1	Orientation	°	-90	90	ORIENT
2	Surface vitrée (hauteur 1m constante)	m ²	0.5	2	L_FEN
3	Taille parois bâti	m	3	7	L_MUR
4	Entraxe ossature mur et planchers	m	0.4	0.6	ENTRAXE
5	Epaisseur montant et solives	m	0.045	0.09 (double)	EP_OSS
6	Epaisseur isolant entre montant	m	0.12	0.16	EP_ISOL_M
7	Epaisseur isolant intérieur (mur)	m	0	0.06	EP_ISOL_INT
8	Epaisseur isolant extérieur (mur)	m	0	0.06	EP_ISOL_EXT
9	Epaisseur lame d'air (mur)	m	0	0.04	EP_AIR
10	Largeur contre-ossature lame d'air (mur)	m	0	0.04	EP_COSSV
11	Chape béton	m	0	0.2	EP_CHAPE
12	Epaisseur placo (mur et toiture)	m	0.013	0.026	EP_REV
13	Masse volumique isolant	kg/m ³	10	150	RHO_ISOL
14	Masse volumique placo	kg/m ³	750	1500	RHO_REV
15	Facteur solaire	-	0.3	0.5	FS_FEN
16	Epaisseur panneau contreventement intérieur	m	0	0.012	EP_OS_B_INT
17	Epaisseur panneau contreventement extérieur	m	0	0.012	EP_OS_B_EXT

Illustration 34 : Sélection de 10 paramètres parmi les 17 paramètres préalablement étudiés.

La dispersion des résultats est similaire avec 10 paramètres avec un écart de température entre les deux modèles variant de 0,4°C à 1,6°C. L'écart moyen est quant à lui bien plus élevé de 0.7°C ce qui montre que la prise en compte de l'inertie des montants d'ossature est bien plus importante pour des cas sans apports d'inertie.



OBSERVATIONS :

- **ECART MAX = 1,6°C**
- **ECART MIN = 0.4°C**
- **ECART MOYEN = 0.7°C**

Illustration 35 : Courbe normale asymétrique calibrée sur l'écart de température maximale observé entre les deux modèles

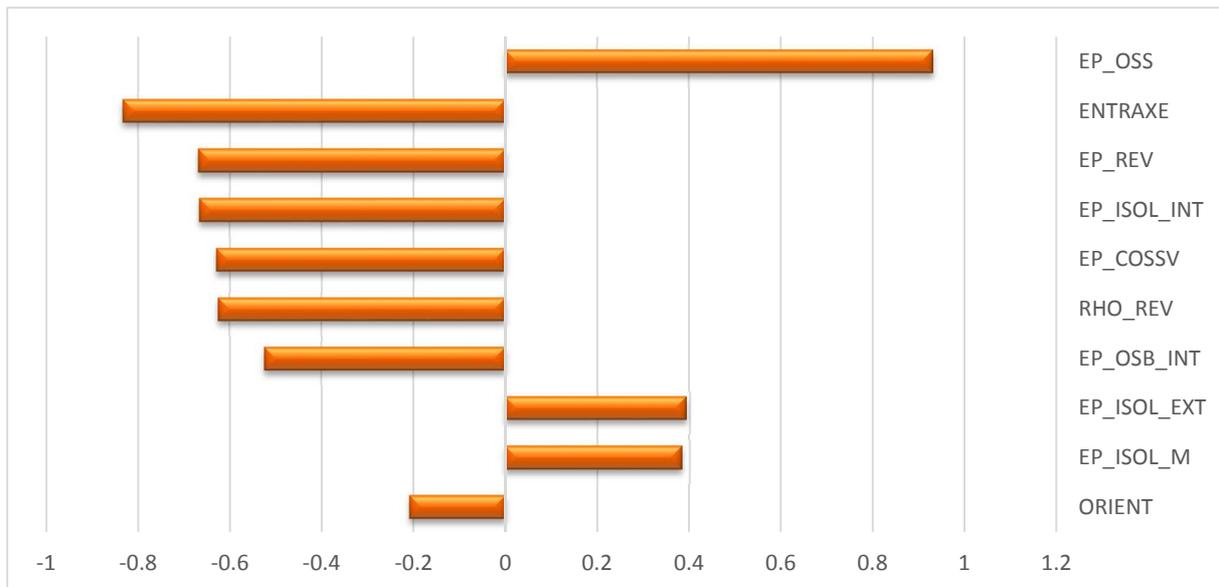


Illustration 36 : Visualisation des indices PRCC pour les 10 paramètres

Les résultats réalisés sur 10 paramètres montrent une disparité moins importante entre l'influence des paramètres sur l'indicateur étudié.

4.4. Conclusions

Cette étude de sensibilité a permis de mettre en avant que dans les cas favorables (entraxe faible, revêtement de faible épaisseur, OSB ext etc.) la prise en compte des montants a un fort impact sur le ΔT pouvant aller au moins jusqu'à 1,6°C. Il est donc préconisé de considérer l'inertie apportée par les montants pour ces cas. Dans les autres cas, la méthode actuelle peut être conservée étant donné que l'inertie apportée par une dalle ou un isolant dense peuvent être suffisantes pour compenser l'inertie des montants d'ossature.

En synthèse, les choix pouvant être impactés par la prise en compte de l'inertie des montants sont les suivants :

- Choix de l'isolant
- Choix entre isolant intérieur / extérieur
- Epaisseur de revêtement
- Type de revêtement
- Emplacement OSB intérieur ou extérieur

Et les paramètres pouvant diminuer l'importance de ces choix :

- Présence d'une chape
- Compacité et volume important
- Entraxe élevé

- Epaisseur ossature faible

CONCLUSION ET SYNTHÈSE SUR LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

D'après le travail préparatoire qui a été mené, il apparaît que les parois à ossature bois manquent de caractérisation dans les Règles Th-I. Le cas des parois à ossature bois n'est pas traité dans ces règles. Cela conduit dans la majorité des cas à l'obtention de classes d'inertie faibles qui ne favorisent pas le bâtiment vis-à-vis du confort estival. De plus, un travail sur la composition d'une paroi à ossature bois en vue d'améliorer son inertie est difficilement valorisable par l'application des méthodes proposées. Même la méthode par calcul des Règles Th-I, basée sur la norme NF EN ISO 13786, ne permet que partiellement une telle valorisation puisqu'elle ne permet pas la prise en compte de l'inertie apportée par les ossatures.

La nécessité de disposer de méthodes complémentaires qui permettent une meilleure caractérisation de l'inertie des parois à ossature bois est appuyée par les résultats numériques obtenus sous VOLTRA et EnergyPlus. Les simulations effectuées montrent que dans le cas de bâtiments à faible inertie la prise en compte de l'inertie des ossatures bois permet une amélioration notable du confort thermique en période chaude. Cette inertie s'avère toutefois moins impactant lorsque les bâtiments présentent déjà un niveau d'inertie relativement important dû par exemple à la présence d'une chape béton au niveau des planchers.

A la suite de ce travail préparatoire, l'objectif est de proposer une méthode permettant de prendre en compte l'inertie apportée par les montants d'ossature bois dans le cadre d'un calcul réglementaire. Cette méthode pourrait être basée sur la méthode par calcul des Règles Th-I qui repose sur la norme NF EN ISO 13786. Celle-ci est applicable aux parois composées de couches homogènes. La suite du travail portera en partie sur l'étude de l'application de cette norme à des parois hétérogènes telles que les parois à ossature bois. L'application de la méthode proposée permettra d'évaluer l'impact de la prise en compte de l'inertie des ossatures sur l'indicateur réglementaire T_{ic} relatif au confort estival. Il sera également possible de s'interroger sur la caractérisation des parois à ossature dans les Règles Th-I vis-à-vis des méthodes forfaitaire et à points d'inertie.

CHAPITRE 2 : PROPOSITION DE PRISE EN COMPTE DE L'OSSATURE

INTRODUCTION

La tâche 2.2 du projet THERMIQUE ETE BOIS vise la prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature des parois bois lors d'un calcul réglementaire RT 2012. Un travail préparatoire a été réalisé afin d'analyser la manière dont cette ossature est actuellement prise en compte. Les *Règles Th-I* relatives à la caractérisation de l'inertie thermique des bâtiments ainsi que la norme *NF EN ISO 13786* qui donne des méthodes de calcul pour la capacité thermique périodique d'une paroi ont également été étudiées. Il apparaît que l'ossature est uniquement considérée lors du calcul du coefficient de transmission thermique de la paroi $U_{paroi} [W/(K.m^2)]$ au travers des ponts thermiques intégrés. Aussi la norme *NF EN ISO 13786* ne permet pas le calcul de la capacité thermique périodique d'une paroi à couches hétérogènes (cas des parois à ossature bois). Lors de ce travail préparatoire, des simulations numériques sur un local ont également appuyé la nécessité de définir une méthodologie permettant la prise en compte de l'inertie apportée par les ossatures.

Cette seconde partie débute par la présentation des méthodes proposées pour la prise en compte de l'inertie apportée par les ossatures des parois bois lors d'un calcul réglementaire RT 2012. La justesse de ces méthodes est également évaluée. Les propositions faites s'appuient sur les *Règles Th-I*, la norme *NF EN ISO 13786* ainsi que sur des vérifications faites par simulation par éléments finis.

Ensuite, cette partie s'attache à évaluer l'impact des méthodes proposées sur les indicateurs réglementaires *Tic* et *Bbio*. Il s'agit de montrer dans quelle mesure la prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature peut être avantageuse. Pour ce faire différentes configurations de maisons individuelles sont définies et des calculs RT sont menés avec et sans prise en compte des ossatures.

1. INTRODUCTION

Les méthodes actuellement employées pour la définition de l'inertie apportée par les parois ne considèrent que des composants sans hétérogénéités. Les parois sont alors modélisées comme étant une succession de couches homogènes qui séparent deux ambiances. Cette modélisation convient particulièrement bien pour les parois maçonnées ou béton mais devient pénalisante lorsqu'il s'agit d'étudier des parois à ossature bois. En effet, la présence de montants à intervalle régulier fait de ces parois des composants hétérogènes pour lesquels les méthodes employées ne sont pas adaptées. Il est alors d'usage, lorsqu'il s'agit de définir l'inertie apportée par une paroi à ossature bois, d'adopter une simplification qui consiste à ne pas modéliser les montants afin d'obtenir une paroi homogène comme présenté sur l'illustration 37. De la sorte, l'inertie qu'ils apportent n'est pas valorisée.

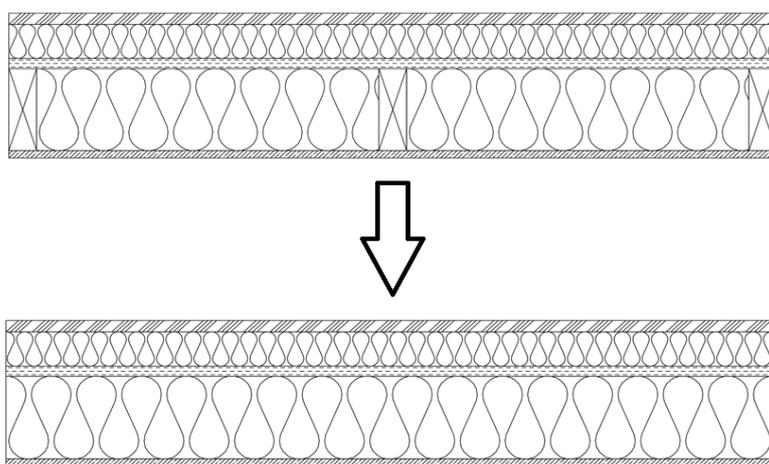


Illustration 37 : Simplification courante des parois à ossature bois

La notion d'inertie est employée lors d'un calcul réglementaire RT 2012 sous deux aspects. L'inertie quotidienne caractérise l'amortissement de l'onde quotidienne (période de 24 heures) de température et d'ensoleillement alors que l'inertie séquentielle caractérise l'effet de la variation de la température extérieure sur une période de 12 jours. L'inertie est une donnée déterminante lorsqu'il s'agit de vérifier le critère de confort d'été. Plus de détails à ce sujet ont été donnés dans la partie 1 du livrable « *Travail préparatoire* ». Un manque d'inertie est notamment reproché aux constructions à ossature bois qui sont le plus souvent catégorisées par la RT 2012 comme possédant une inertie très légère. Celle-ci n'étant pas favorable au respect de l'exigence réglementaire sur le confort estival.

L'étude menée a alors pour objectif de permettre la prise en compte de l'inertie apportée par les montants d'ossature. Pour ce faire, des méthodes basées sur le calcul de la capacité thermique périodique des parois sont proposées. La réglementation thermique propose le calcul des capacités quotidienne et séquentielle conformément à la norme *NF EN ISO 13786 : Performance thermiques des composants de bâtiment – Caractéristiques thermiques dynamiques – Méthode de calcul pour la définition des paramètres d'inertie C_m , A_m et C_{ms}* . L'utilisation de ceux-ci pour la vérification du critère sur le confort estival est précisée dans la partie 1 du livrable « *Travail préparatoire* ». Dans cette première partie du document, la justesse des méthodes proposées est également justifiée. Les notions d'inertie quotidienne et séquentielle sont successivement abordées. La RT 2012 permet également la définition des paramètres d'inertie à partir de points d'inertie attribués aux parois. Dans cette étude,

une méthode est proposée pour définir des points d'inertie pour différentes configurations de parois à ossature bois.

2. INERTIE QUOTIDIENNE

Dans la réglementation thermique, l'inertie quotidienne est caractérisée par les paramètres C_m et A_m . Leur valeur va dépendre de la classe d'inertie quotidienne du bâtiment. Cette dernière peut être définie en fonction de valeurs de C_m et A_m calculées à partir des capacités thermiques quotidiennes χ_j de chaque paroi. La capacité thermique d'un composant est calculée conformément à la norme *NF EN ISO 13786*. Les *Règles Th-I* précisent en annexe 4 que ce sont les valeurs des paramètres C_m et A_m définies en fonction de la classe d'inertie quotidienne du bâtiment qui doivent être utilisées et non celles calculées à partir des capacités thermiques qui servent à déterminer la classe d'inertie quotidienne. Dans la pratique, notamment lorsque le logiciel Pléiades+Comfie est utilisé, ce sont les paramètres d'inertie directement calculés à partir des capacités thermiques qui sont utilisés. La partie 3 du livrable « *Travail préparatoire* » s'attache à présenter les méthodes de détermination des paramètres d'inertie.

Dans cette étude, il est proposé d'utiliser la modélisation par éléments finis (MEF) pour valider la justesse des méthodes proposées pour la prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature. Le recours à ce type de modélisation est dans un premier temps validé pour le calcul de la capacité thermique d'une paroi. La MEF est ensuite utilisée pour calculer la capacité thermique quotidienne d'une paroi à ossature bois. L'inertie réellement apportée par les montants d'ossature peut alors être évaluée. Des méthodes simplifiées pour sa prise en compte sont présentées et leur justesse vérifiée.

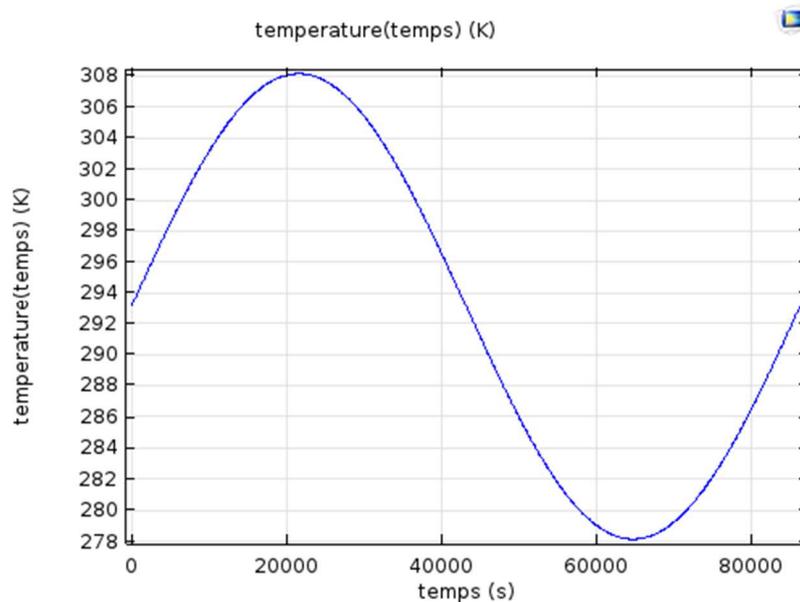
2.1. Modélisation par éléments finis pour le calcul de la capacité thermique périodique

2.1.1. Description du modèle

Pour cette étude, le logiciel COMSOL Multiphysics est utilisé pour conduire les simulations par éléments finis. Lorsqu'il s'agit d'étudier une paroi composée de couches homogènes, une modélisation 1D est suffisante. Pour des parois comportant des hétérogénéités comme les murs ossature bois, il est nécessaire de faire appel à une modélisation 2D.

Pour la définition de la capacité thermique périodique du composant, une étude temporelle des transferts de chaleur dans les solides est menée. La grandeur χ [$\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$], qui caractérise l'inertie d'une paroi, définit son aptitude à accumuler de l'énergie lorsque la température varie de façon périodique. La capacité thermique est définie pour chaque face de la paroi. Lorsque celle-ci donne sur l'extérieur c'est la capacité thermique de la face intérieure qui est utile. Pour une paroi intérieure les deux faces sont considérées puisqu'elles participent toutes deux à l'inertie du bâtiment.

La face de la paroi pour laquelle la capacité thermique doit être déterminée est soumise à une sollicitation en température de période T et d'amplitude A . Lorsqu'il s'agit de définir la capacité thermique quotidienne χ_j la période de la sollicitation est égale à 24 heures soit $T = 86400$ s. Pour la capacité thermique séquentielle χ_s , elle est égale à 12 jours soit $T = 1036800$ s. L'amplitude de la sollicitation n'a d'importance qu'au moment du calcul de la capacité thermique. Le Graphique 1 donne la sollicitation en température pour la détermination de la capacité thermique quotidienne.

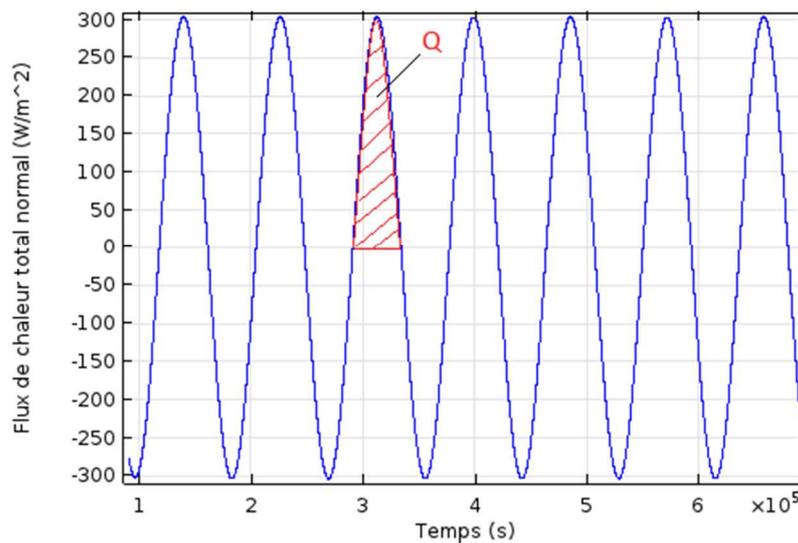


Graphique 1 : Sollicitation en température pour la détermination de la capacité thermique quotidienne

Au temps $t = 0$ s, la température de la paroi est égale à la température moyenne de la sollicitation en température. La paroi étudiée est considérée de longueur infinie (pas d'échange de chaleur aux extrémités). La face opposée à celle sollicitée par une température variable est soumise à une température constante égale à la température initiale du composant.

Les propriétés des matériaux considérées sont la conductivité thermique λ [$W/(m.K)$], la masse volumique ρ [kg/m^3] et la capacité thermique massique C [$J/(kg.K)$]. Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par MEF à ceux fournis par application de la norme *NF EN ISO 13786*, la capacité thermique et la masse volumique des lames d'air sont négligées. Ces couches sont considérées comme uniquement résistives comme préconisé dans la norme. Les résistances thermiques superficielles des faces du composant peuvent être considérées lors de la simulation par éléments finis.

La simulation est menée sur plusieurs périodes T afin d'atteindre un régime établi. La capacité thermique de la paroi est alors calculée à partir du flux de chaleur φ [W/m^2] relevé au niveau de la face considérée. Le graphique suivant présente le flux relevé pour une sollicitation en température de période 24 heures.



Graphique 2 : Flux de chaleur observée au niveau de la face soumise à une sollicitation en température

L'intégrale sur une demi-période $T/2$ de la courbe présentée sur le Graphique 2 donne, suivant le signe, la quantité d'énergie Q [J/m^2] effectivement stockée ou restituée par la paroi. Afin d'obtenir la capacité thermique périodique pour la face sollicitée en température il convient de diviser cette quantité d'énergie par l'amplitude crête à crête du signal de température $\chi = Q/(2 \times A)$ [$J/(m^2.K)$].

2.1.2. Exemple 1 de la norme NF EN ISO 13786

Le recours à la MEF peut être validé par le biais des exemples fournis dans l'annexe D de la norme *NF EN ISO 13786*. Le premier concerne un mur homogène de 200 mm en béton. Les caractéristiques du matériau sont données dans le tableau suivant.

Tableau 13 : Caractéristiques de l'exemple 1 de la norme NF EN ISO 13786

	Epaisseur [m]	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m³]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]
Béton	0.2	1.8	2400	1000

Dans la norme, la méthode par calcul matriciel est utilisée pour calculer la capacité thermique du composant pour une période de 24 heures. Puisqu'il s'agit d'une paroi composée d'une unique couche, la capacité thermique est identique pour les deux faces du composant. Une valeur de la capacité thermique pour la face intérieure est également donnée lorsque les résistances superficielles intérieure $R_{si} = 0.13 m^2.K/W$ et extérieure $R_{se} = 0.04 m^2.K/W$ sont considérées. Le tableau suivant présente une comparaison des résultats fournis dans la norme avec ceux obtenus par MEF.

Tableau 14 : Comparaison résultats NF EN ISO 13786 et MEF pour l'exemple 1

	Capacité thermique intérieure pour une période de 24 heures [kJ/(m ² .K)]		
	Norme NF EN ISO 13786	MEF	Ecart
Sans résistance superficielle	224.28	224.68	+ 0.2 %
Avec résistances superficielles	86.17	79.52	- 7.7 %

La comparaison montre que lorsque les résistances superficielles ne sont pas considérées la capacité thermique périodique obtenue par MEF est très proche de celle donnée dans la norme et calculée à partir de la méthode par calcul matriciel. En revanche, un écart important est observé lorsque les résistances superficielles sont considérées. Cet écart est difficilement justifiable autrement que par une imprécision du calcul par éléments finis.

2.1.3. Exemple 2 de la norme NF EN ISO 13786

L'exemple 2 fourni dans l'annexe D de la norme NF EN ISO 13786 concerne une paroi multicouche composée de l'intérieur vers l'extérieur d'un voile béton, d'une couche d'isolant et d'un crépi. Le tableau suivant présente les caractéristiques des matériaux.

Tableau 15 : Caractéristiques de l'exemple 2 de la norme NF EN ISO 13786

	Epaisseur [m]	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]
Béton (intérieur)	0.2	1.8	2400	1000
Isolant	0.1	0.04	30	1400
Crépi (extérieur)	0.005	1	1200	1500

La méthode par calcul matriciel est utilisée dans la norme pour déterminer la capacité thermique de la face intérieure pour une période de 24 heures en considérant des résistances thermiques superficielles intérieure et extérieure respectivement $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ et $R_{se} = 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Pour cet exemple, puisque le composant est un multicouche ne présentant pas de symétrie, la valeur de la capacité thermique périodique dépend de la face considérée. La valeur sans prise en compte des résistances superficielles n'étant pas spécifiée dans l'annexe D, un calcul matriciel tel que défini dans la norme a été mené pour déterminer cette capacité. Le tableau suivant donne une comparaison entre les résultats fournis par la norme et ceux issus d'une simulation par éléments finis.

Tableau 16 : Comparaison résultats NF EN ISO 1386 et MEF pour l'exemple 2

	Capacité thermique intérieure pour une période de 24 heures [kJ/(m ² .K)]		
	Norme NF EN ISO 13786	MEF	Ecart
Sans résistance superficielle	274.03	278.53	+ 1.6 %
Avec résistances superficielles	82.29	81.26	- 1.3 %

Pour ce second exemple, que ce soit avec ou sans prise en compte des résistances superficielles, les valeurs des capacités thermiques périodiques obtenues par simulation par éléments finis sont proches de celles issues de l'application de la méthode par calcul matriciel. Il n'y a pas d'écart notable comme cela est le cas avec le premier exemple.

2.1.4. Conclusion sur le calcul de la capacité thermique quotidienne par MEF

Les simulations par éléments finis menées sur les deux exemples de paroi fournis dans la norme NF EN ISO 13786 permettent de retrouver avec plus ou moins de précision les valeurs théoriques des capacités thermiques des composants pour une période de 24 heures.

Lorsque les résistances thermiques superficielles ne sont pas considérées un écart maximum de 1.6 % est obtenu pour l'exemple 2 entre la valeur théorique et celle issue de la simulation par éléments finis. Cet écart est assez faible pour attester de la justesse de la MEF. En revanche, lorsque ces résistances sont considérées, des observations différentes sont faites suivant l'exemple considéré. Pour le premier, l'écart entre la valeur théorique et celle issue de la modélisation par éléments finis est de 7.7 %. Pour le second exemple l'écart est beaucoup plus réduit. Il est de seulement 1.3 %. La différence pour le premier exemple doit être due à une imprécision de la simulation par éléments finis menée. Celle-ci est menée avec un pas de discrétisation de 60 secondes. Réduire celui-ci peut augmenter la précision des résultats mais augmente considérablement le temps et la puissance de calcul nécessaires. Aussi la détermination de la quantité d'énergie stockée se fait de manière approchée en déterminant l'aire sous une courbe comme présenté sur le Graphique 2.

Le calcul par éléments finis est retenu dans la suite de cette étude pour vérifier l'exactitude des méthodes proposées pour la prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature bois.

2.2. Application sur un mur à ossature bois

L'exemple d'un mur à ossature bois est retenu pour appliquer plusieurs méthodes de prise en compte de l'ossature. Celles-ci permettent de considérer l'inertie apportée par les montants lors du calcul de la capacité thermique périodique d'un mur bois. La configuration retenue correspond au « Mur extérieur type 6 : Isolant en âme et en doublage extérieur » proposée dans le *Catalogue Construction Bois*. Cette composition est présentée sur l'illustration suivante.

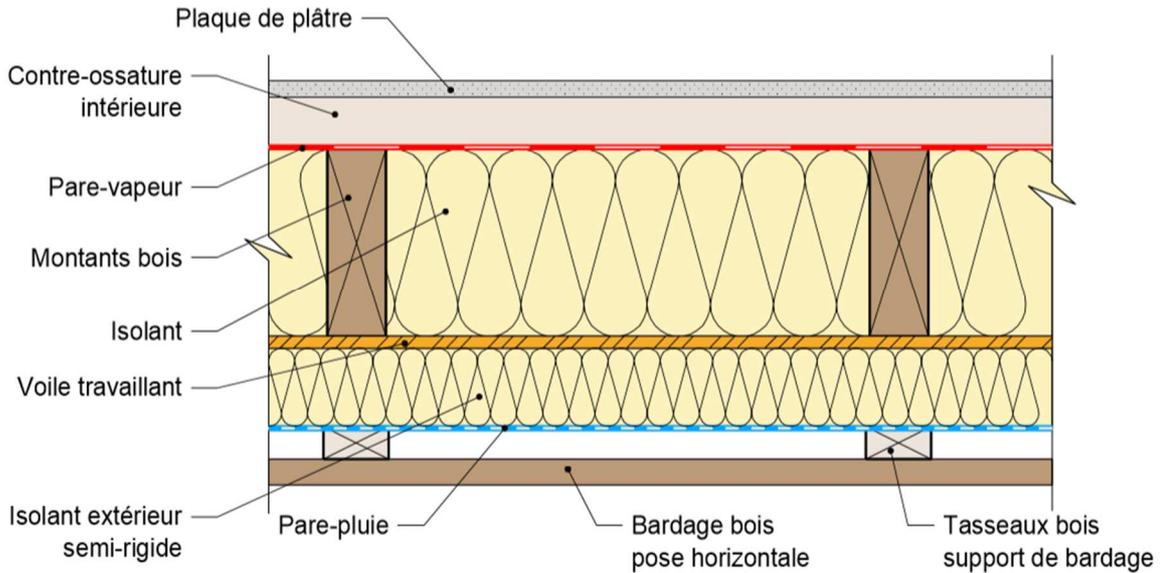


Illustration 38 : Type de mur retenu pour application de la méthodologie proposée, catalogue-construction-bois.fr

A priori, ce type de mur représente la configuration permettant d'apporter le plus d'inertie puisqu'aucune couche d'isolant ne prend place entre les montants et l'ambiance intérieure. Le tableau suivant présente la configuration retenue.

Tableau 17 : Caractéristiques de la composition de mur retenu pour application des méthodes proposées

	Epaisseur [m]	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]	Résistance thermique [m ² .K/W]
Plâtre (intérieur)	0.013	0.25	800	1000	0.05
Lame d'air	0.025	-	-	-	0.18
Isolant / ossature	0.145	0.038	60	1030	3.82
OSB	0.012	0.13	650	1700	0.09
Isolant extérieur (extérieur)	0.06	0.038	60	1030	1.58

Comme préconisé dans la norme *NF EN ISO 13786*, la lame d'air est considérée comme une couche uniquement résistive. Sa capacité thermique n'est pas prise en compte. Dans la suite de cette étude les résistances thermiques superficielles sont considérées telles que $R_{si} = R_{se} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Les caractéristiques du bois constituant l'ossature du mur sont données dans le tableau suivant.

Tableau 18 : Caractéristiques du bois d'ossature

	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]
Ossature bois	0.15	450	1600

A partir de simulations par éléments finis, le gain en inertie dû à la présence des montants est dans un premier temps évalué. Ensuite deux méthodes s'appuyant sur le calcul matriciel sont proposées et leur justesse évaluée.

2.2.1. Gain dû à la prise en compte des montants

La capacité thermique quotidienne de la paroi (période de 24 heures) peut être déterminée par application de la méthode par calcul matriciel. Aussi la simulation par éléments finis doit permettre de retrouver un résultat similaire. Le tableau suivant présente les résultats obtenus selon ces deux méthodes lorsque les montants ne sont pas considérés.

Tableau 19 : Comparaison résultats NF EN ISO 1386 et MEF pour le MOB sans ossature

	Capacité thermique intérieure pour une période de 24 heures [kJ/(m ² .K)]		
	Norme NF EN ISO 13786	MEF	Ecart
MOB sans ossature	14.37	14.04	- 2.3 %

Les résultats obtenus par calcul matriciel et simulation par éléments finis sont similaires. Afin d'évaluer l'inertie apportée par les montants, une simulation par éléments finis est menée en considérant ceux-ci d'une largeur de 45 mm avec un entraxe de 400 mm. L'illustration suivante présente la modélisation retenue.

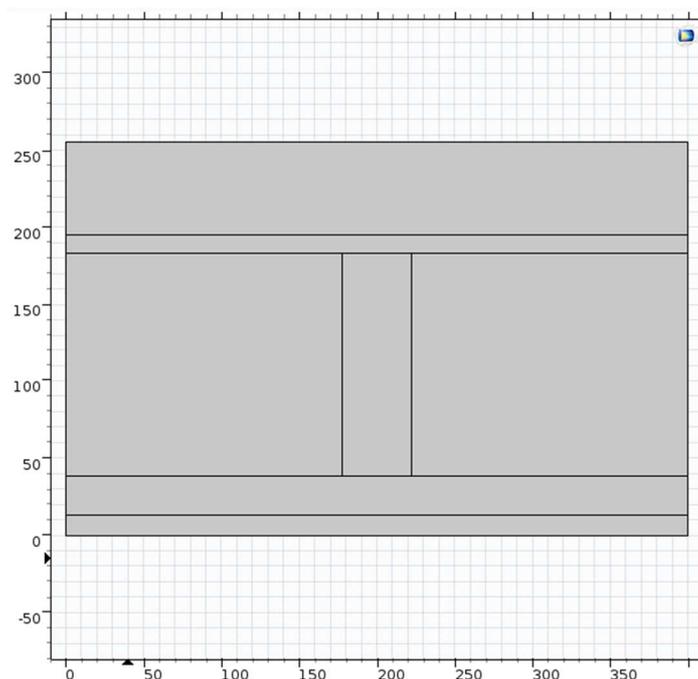


Illustration 39 : Modélisation sous COMSOL du MOB avec ossature

Le tableau suivant présente une comparaison des résultats obtenus à partir de la modélisation par éléments finis avec et sans prise en compte des montants d'ossature.

Tableau 20 : Comparaison résultats MEF pour le MOB sans et avec ossature

	Capacité thermique intérieure pour une période de 24 heures [kJ/(m ² .K)]		
	Sans ossature	Avec ossature	Ecart
MOB	14.04	15.76	+ 12.3 %

Les calculs par éléments finis menés montrent que la prise en compte des montants d'ossature entraîne une augmentation de la capacité thermique périodique de 12.3 %. Celle-ci apparaît comme n'étant pas négligeable. Dans la suite de cette étude, l'impact sur les indicateurs réglementaires de la prise en compte de l'ossature sera mis en évidence. Ici, seule l'ossature principale est prise en compte. Les doubles montants au droit des menuiseries ou encore les lisses hautes et basses qui comptabilisent une quantité de bois importante représentent un potentiel qui n'est pas valorisé dans cette étude. Dans le cas où la méthode proposée pour la seule prise en compte des montants s'avère efficace, il pourra être envisagé de l'étendre à la prise en compte de cette quantité de bois supplémentaire.

2.2.2. Simplification par décomposition

La question de la valorisation de l'inertie apportée par les montants d'ossature a été soulevée lors de la tâche 1 du projet THERMIQUE ETE BOIS. Sans en avoir préalablement vérifié la justesse, une extrapolation de la norme *NF EN ISO 13786* a été effectuée. Celle-ci consiste à décomposer la paroi ossature bois hétérogène en deux parois homogènes. La première représente la partie de la paroi entre deux montants (partie « isolant ») et la seconde la partie au droit des montants (partie « ossature »). Chaque paroi est alors représentée en fonction du rapport de la surface qu'elle occupe par la surface totale de la paroi. L'illustration suivante présente cette décomposition.

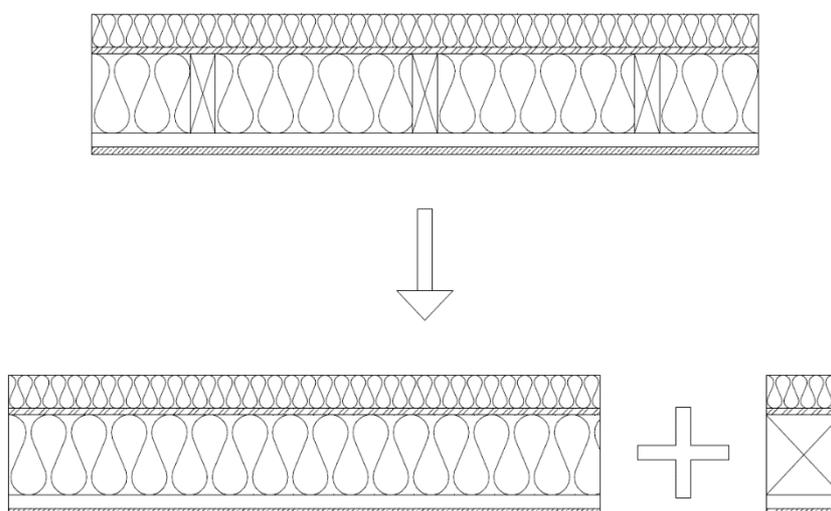


Illustration 40 : Simplification par décomposition d'une paroi à ossature bois

Lors de la première tâche du projet « Application des méthodes existantes », une configuration de maison individuelle ainsi qu'une d'un bâtiment de logements collectifs ont fait l'objet d'une analyse vis-à-vis de la RT 2012 (calcul du Bbio et Tic). Celle-ci, en considérant plusieurs variantes d'orientation, de localisation, de composition de mur et de géométrie pour la maison individuelle, avait pour objectif de mettre en évidence les points faibles des bâtiments à ossature bois vis-à-vis de la réglementation thermique. Pour le cas de la maison individuelle, il a été montré dans la partie 2.2 du livrable

« Thermique d'été bois – Phase 1 – Rapport final » que la prise en compte des montants par décomposition de la paroi avec un entraxe de 400 mm permet de passer d'une classe d'inertie quotidienne très légère à légère. Le calcul des paramètres d'inertie avait alors été mené à partir de la méthode de l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786*.

Afin d'appliquer la simplification par décomposition à la paroi ossature bois retenue, les capacités thermiques périodiques des parties « isolant » et « ossature » sont calculées de manière indépendante. La capacité thermique de la paroi totale obtenue par combinaison de celles calculées pour chaque partie est alors comparée à la valeur issue du calcul par éléments finis. Le tableau suivant présente les valeurs de ces capacités pour chaque partie calculées à partir d'une MEF et d'un calcul matriciel selon la *NF EN ISO 13786*.

Tableau 21 : Capacités thermiques périodiques pour les parties « isolant » et « ossature » de la paroi bois

	Capacité thermique intérieure pour une période de 24 heures [kJ/(m ² .K)]		
	Norme <i>NF EN ISO 13786</i>	MEF	Ecart
Partie « Isolant »	14.37	14.04	- 2.3 %
Partie « Ossature »	26.10	25.87	- 0.9 %

Pour chaque partie du mur à ossature bois, le calcul matriciel ou à partir de la MEF donnent des valeurs similaires de la capacité thermique pour une période de 24 heures. La partie « ossature » possède pour sa face intérieure une capacité 1.8 fois plus importante que celle de la partie « isolant ».

Pour des montants de largeur 45 mm et un entraxe de 400 mm, la partie « ossature » représente 11.25 % de la paroi totale. La partie « isolant » représente alors les 88.75 % restant. La simplification par décomposition permet alors d'obtenir la capacité thermique de la paroi complète à partir de l'équation suivante.

$$\chi_j = 0.1125 \times \chi_{j,ossature} + 0.8875 \times \chi_{j,isolant} \text{ [kJ/(K.m}^2\text{)]}$$

Où :

$\chi_{j,ossature}$ [kJ/(K.m²)] est la capacité thermique de la partie « ossature » pour une période de 24 heures

$\chi_{j,isolant}$ [kJ/(K.m²)] est la capacité thermique de la partie « isolant » pour une période de 24 heures

Afin de vérifier la justesse de la méthode proposée, le tableau suivant s'attache à comparer les résultats obtenus par décomposition (calcul matriciel et MEF) à celui obtenu pour la paroi complète (calcul MEF).

Tableau 22 : Vérification de la justesse de la méthode par décomposition

	Capacité thermique intérieure pour une période de 24 heures [kJ/(m ² .K)]		
	Paroi complète par MEF	Décomposition	Ecart
Norme <i>NF EN ISO 13786</i>	15.76	15.40	- 2.3 %
MEF		15.66	- 0.6 %

Les capacités thermiques obtenues par décomposition sont proches de celle issue d'un calcul par MEF pour la paroi complète. L'écart entre les valeurs issues de la simulation par éléments finis n'est que de 0.6 %. Un écart plus important est observé lorsque le résultat obtenu par décomposition à partir du calcul matriciel et comparé à celui issu de la MEF pour la paroi complète. Toutefois, la méthode proposée ne vient pas surestimer la capacité thermique de la paroi. Celle-ci, que ce soit par calcul matriciel ou à par simulation par éléments finis, reste inférieure à la valeur obtenue pour la paroi complète. Dans le cadre d'une application réglementaire, c'est la méthode par décomposition à partir des capacités thermiques périodiques calculées selon la méthode matricielle qui serait appliquée. Dans le cas du présent exemple, l'emploi de cette méthode permettant la prise en compte des montants entraîne une augmentation de la capacité thermique de la paroi de 7.2 %.

2.2.3. Simplification par couche équivalente

La simplification par couche équivalente proposée consiste à considérer les couches hétérogènes comme des couches homogènes avec des propriétés capacitatives équivalentes (masse volumique et capacité thermique massique). Celles-ci sont alors calculées en fonction des propriétés de chaque partie formant la couche hétérogène et du rapport de la surface qu'elles occupent par la surface totale de la paroi. La conductivité thermique de la couche équivalente est prise égale à celle du matériau qui occupe la surface la plus grande.

Dans le cas du mur à ossature bois retenu, la couche formée par les montants et l'isolant principal est modélisée par une couche homogène équivalente. Pour des montants de largeur 45 mm et un entraxe de 400 mm, la partie « ossature » représente 11.25 % de la paroi totale. La partie « isolant » représente alors les 88.75 % restant. Les propriétés de la couche équivalente se calcul alors à partir de l'équation donnée en suivant.

$$X_{eq} = 0.1125 \times X_{ossature} + 0.8875 \times X_{isolant}$$

Où :

$X_{ossature}$ est la valeur pour la propriété X de la partie « ossature »

$X_{isolant}$ est la valeur pour la propriété X de la partie « isolant »

Le tableau suivant présente les propriétés de la couche équivalente dans le cas de l'exemple retenu.

Tableau 23 : Propriétés des parties « ossature » et « isolant » et de la couche équivalente

	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]
Partie « Ossature »	0.15	450	1600
Partie « Isolant »	0.038	60	1030
Couche équivalente	0.038	104	1094

La capacité thermique de la paroi équivalente pour une période de 24 heures est alors calculée à partir de la méthode matricielle selon la norme NF EN ISO 13786 et par simulation par éléments finis. Les résultats obtenus sont comparés à la valeur de la capacité thermique pour la paroi complète définie à partir de la MEF. Le tableau suivant synthétise ces résultats.

Tableau 24 : Vérification de la justesse de la méthode de la couche équivalente

		Capacité thermique intérieure pour une période de 24 heures [kJ/(m ² .K)]		
		Paroi complète par MEF	Par couche équivalente	Ecart
Norme NF EN ISO 13786		15.76	15.59	- 1.1 %
	MEF		15.42	- 2.2 %

Les capacités thermiques obtenues par la simplification de la couche équivalente sont proches de celle issue d'un calcul par MEF pour la paroi complète. Contrairement à ce qui a été observé pour la simplification par décomposition, l'écart est plus important lorsque la capacité de la paroi équivalente est calculée via la MEF que lorsque le calcul matriciel est utilisé. Le tableau précédent montre que la méthode simplificatrice proposée ne vient pas surestimer la capacité thermique périodique de la paroi. Dans le cadre d'une application réglementaire, la capacité de la paroi équivalente serait calculée à partir de la méthode matricielle définie dans la norme *NF EN ISO 13786*. Dans le cas du présent exemple, l'emploi de cette méthode qui permet la prise en compte des montants entraîne une augmentation de la capacité thermique de la paroi de 8.5 %.

2.3. Méthode retenue

Dans la suite de cette étude, la méthode par décomposition est retenue pour la prise en compte de l'inertie apportée par les montants. Il a été montré sur le cas d'étude précédent que la méthode de la couche équivalente donne une capacité thermique de la paroi complète pour une période de 24 heures (inertie quotidienne) qui est plus importante que celle donnée par la méthode par décomposition (+ 8.5 % contre + 7.2 %). Cependant il a également été remarqué que lorsque les calculs sont conduits via une MEF, l'écart entre la valeur de la capacité pour la paroi complète et celle issue de l'application de la méthode simplifiée est plus faible lorsque la simplification par décomposition est utilisée. La simplification par décomposition semble de ce fait être celle qui donne la meilleure approximation de la capacité thermique périodique d'une paroi hétérogène.

Sur le cas d'étude précédent, la vérification de la justesse de la méthode par décomposition est satisfaisante. L'écart entre la valeur de la capacité thermique pour une paroi complète calculée par MEF et celle obtenue par combinaison des valeurs calculées pour chaque partie également par MEF est de seulement 0.6 %. Aussi les valeurs résultant de l'application de la méthode simplifiée ne viennent pas surestimer la capacité thermique de la paroi ossature bois.

Il est donc proposé lors d'un calcul réglementaire d'utiliser la méthode par décomposition pour le calcul des paramètres d'inertie quotidienne. A partir d'un calcul matriciel comme défini dans la norme *NF EN ISO 13786*, la capacité thermique de chaque partie (« isolant » et « ossature ») est calculée. La capacité thermique de la paroi est prise égale à la somme des capacités thermiques de chaque partie en pondérant celles-ci par la surface de chaque partie ramenée à la surface totale de la paroi. L'équation suivante est utilisée.

$$\chi_j = R_{\text{ossature}} \times \chi_{j,\text{ossature}} + R_{\text{isolant}} \times \chi_{j,\text{isolant}} \text{ [kJ/(K.m}^2\text{)]}$$

Où :

$\chi_{j,\text{ossature}}$ [kJ/(K.m²)] est la capacité thermique de la partie « ossature » pour une période de 24 heures

$\chi_{j,isolant}$ [$\text{kJ}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$] est la capacité thermique de la partie « isolant » pour une période de 24 heures

$R_{ossature}$ [1] est la surface de la partie « ossature » ramenée à la surface totale de la paroi

$R_{isolant}$ [1] est la surface de la partie « isolant » ramenée à la surface totale de la paroi

La valeur de la capacité thermique périodique obtenue ainsi que celles des autres parois sont utilisées conformément aux *Règles Th-I* pour le calcul des paramètres C_m et A_m .

3. INERTIE SEQUENTIELLE

Dans la réglementation thermique RT 2012, l'inertie séquentielle est caractérisée par le paramètre C_{ms} . Sa valeur va dépendre de la classe d'inertie séquentielle du bâtiment. Cette dernière peut être définie en fonction de la valeur de C_{ms} calculée à partir des capacités thermiques séquentielles χ_s de chaque paroi. La capacité thermique d'un composant est calculée conformément à la norme *NF EN ISO 13786*. Comme pour l'inertie quotidienne, il est entendu dans l'annexe 4 des *Règles Th-I* que c'est la valeur du paramètre C_{ms} définie en fonction de la classe d'inertie séquentielle qui doit être utilisée et non celle calculée à partir de la capacité thermique périodique qui sert seulement à déterminer la classe d'inertie séquentielle. Dans la pratique, notamment lorsque le logiciel Pléiades+Comfie est utilisé, c'est le paramètres d'inertie séquentielle directement calculé qui est retenu. La partie 3 du livrable « *Travail préparatoire* » s'attache à présenter les méthodes de détermination des paramètres d'inertie.

Dans cette partie du document, la méthode de l'épaisseur efficace telle que définie dans l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786* est décrite et ses limites présentées. La validité de la méthode de prise en compte des montants d'ossature par décomposition de la paroi est ensuite vérifiée pour une période d'étude de 12 jours (inertie séquentielle). La méthode retenue est présentée et finalement appliquée sur le cas d'une paroi à ossature bois.

3.1. Méthode de l'épaisseur efficace (Annexe A de la NF EN ISO 13786)

Dans l'annexe 6 des *Règles Th-I* il est spécifié qu'il est nécessaire d'adopter l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786* pour le calcul de l'inertie séquentielle plutôt que la méthode par calcul matriciel. Cette annexe présente plusieurs méthodes simplifiées pour le calcul de la capacité thermique périodique de parois à couches homogènes. Le recours à ces méthodes simplifiées est justifié par le problème concernant les « faibles épaisseurs » qui entraîne l'obtention de valeurs erronées lorsque l'approche par calcul matriciel est utilisée. Pour des couches de « faible épaisseur », le calcul matriciel n'est pas approprié. Plus la période d'étude est longue plus l'épaisseur à partir de laquelle les valeurs ne sont plus erronées est grande. De ce fait, puisque pour l'inertie séquentielle la période d'étude est de 12 jours, l'épaisseur pour laquelle la méthode matricielle devient appropriée est importante. Pour exemple, dans l'annexe 6 des *Règles Th-I* il est spécifié que pour du béton plein, un résultat équivalent entre l'annexe A et la méthode matricielle est obtenu seulement pour des épaisseurs supérieures à 50 cm.

3.1.1. Description

Les méthodes proposées dans l'annexe A sont détaillées dans la partie du livrable « *Travail préparatoire* ». La plus utilisée est celle qui fait intervenir la notion d'épaisseur efficace d_T . Il s'agit de l'épaisseur de la paroi considérée comme participant à l'inertie. Celle-ci est prise égale à la plus petite des valeurs données en suivant. Pour chacune d'elle une interprétation de leur intérêt est renseignée.

- La moitié de l'épaisseur totale du composant

Dans le cas d'une paroi intérieure, la somme des capacités thermiques obtenues pour les deux faces est retenue. Si l'épaisseur efficace est supérieure à la moitié de l'épaisseur totale du composant l'apport d'inertie sera surestimé.

- L'épaisseur des matériaux compris entre la face considérée et la première couche isolante⁶

La couche isolante est considérée comme stoppant la propagation de l'onde thermique. Les couches situées après celle-ci ne peuvent donc apporter de l'inertie.

- Une épaisseur efficace maximale, fonction de la période des variations

Il s'agit de l'épaisseur efficace correspondant à la profondeur de pénétration périodique définie pour une valeur conventionnelle de la diffusivité thermique.

La profondeur de pénétration périodique d'une paroi correspond à la profondeur à laquelle l'amplitude des variations de température est réduite dans le rapport « e » (base des logarithmes naturels $e = 2.718 \dots$) dans un matériau homogène d'épaisseur infinie, soumis en surface à une variation de température harmonique. Cette valeur dépend des propriétés du matériau mais également de la période de la sollicitation en température. La profondeur de pénétration périodique se calcul à partir de l'équation suivante.

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \times T}{\pi \times \rho \times C}} [m]$$

Où :

$\lambda [W/(m.K)]$ est la conductivité thermique du matériau

$\rho [kg/m^3]$ est la masse volumique du matériau

$C [J/(kg.K)]$ est la capacité thermique massique du matériau

$T [s]$ est la période des variations

Avec la valeur α de la diffusivité thermique du matériau l'équation précédente devient :

$$\delta = \sqrt{\frac{\alpha \times T}{\pi}} [m]$$

Avec :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \times C} [m^2/s]$$

L'épaisseur efficace est calculée à partir de la profondeur de pénétration périodique en utilisant l'équation suivante.

⁶ D'après l'annexe 6 des *Règles Th-I*, une couche est dite isolante si sa conductivité thermique est inférieure à 0.065 W/(m.K) et si sa résistance thermique est supérieure à 0.5 m².K/W

$$d_T = \frac{\delta}{\sqrt{2}}$$

Dans la norme *NF EN ISO 13786* il est renseigné plusieurs valeurs de cette épaisseur efficace maximale en fonction de la période de la sollicitation. Celles-ci sont données dans le tableau suivant.

Tableau 25 : Epaisseur efficace maximale en fonction de la période des variations, NF EN ISO 13786

Période des variations, T	1 heure	1 jour	1 semaine
Épaisseur efficace maximale, d_T	20 mm	100 mm	250 mm

Pour le calcul de ces épaisseurs efficaces, une valeur conventionnelle de la diffusivité thermique est retenue. Dans la norme *NF EN ISO 13786*, il est spécifiée que celle-ci est prise égale à $\alpha = 0.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Il s'agit d'une valeur proche de la diffusivité thermique du béton, du plâtre et du mortier. Dans le document normatif il est indiqué que les valeurs données pour l'épaisseur efficace maximale sont très approximatives à cause de la valeur de la diffusivité thermique retenue. L'épaisseur efficace réelle pouvant aller de 40 % à 120 % de la valeur conventionnelle.

Dans l'annexe 6 des Règles *Th-1 « Hypothèses complémentaires à la norme NF EN ISO 13786 »* est également donnée la valeur de l'épaisseur efficace maximale pour une période de 12 jours. Celle-ci est fixée à 34 cm.

La valeur de la diffusivité thermique utilisée ($\alpha = 0.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) se trouve entre celle obtenue pour le béton et celle obtenue pour le mortier. Le tableau suivant donne la diffusivité thermique des plaques de plâtre à parement de carton, du béton, du mortier et du résineux léger.

Tableau 26 : Valeurs de la diffusivité thermique pour plusieurs matériaux

	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]	Diffusivité thermique [m ² /s]
Plaque de plâtre à parement de carton	0.25	800	1000	0.31*10 ⁻⁶
Béton	2.3	2300	1000	1.00*10 ⁻⁶
Mortier	0.28	500	1200	0.47*10 ⁻⁶
Résineux léger	0.13	500	1600	0.16*10 ⁻⁶

L'épaisseur efficace est utilisée pour calculer la capacité thermique période de la paroi sans prendre en compte la résistance superficielle. L'équation suivante est utilisée.

$$\chi' = \sum_i \rho_i d_i C_i \text{ [J/(K.m}^2\text{)] avec } \sum_i d_i = d_T$$

Où :

ρ_i [kg/m³] est la masse volumique de la couche i

d_T [m] est l'épaisseur efficace

C_i [J/(kg.K)] est la capacité thermique massique de la couche i

La capacité thermique périodique du composant en tenant compte de la résistance superficielle de la face sollicitée en température est finalement calculée à partir de l'équation donnée en suivant.

$$\chi = \sqrt{\frac{\chi'^2}{1 + \frac{2\pi}{T} \times \chi'^2 R_s^2}} \quad [J/(K \cdot m^2)]$$

Où :

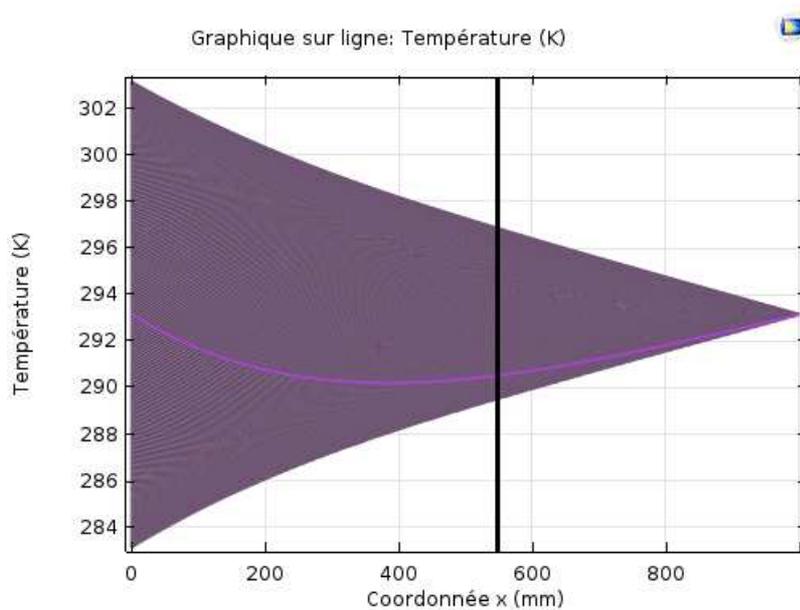
T [s] est la période des variations

R_s [(K.m²)/W] est la résistance thermique superficielle de la face sollicitée en température

3.1.2. Limites

La méthode de l'épaisseur efficace qui vient d'être décrite présente certaines limites. Il s'agit d'une méthode simplifiée qui peut s'avérer pénalisante pour les parois isolées par l'intérieur. Seuls les matériaux situés avant la première couche isolante peuvent contribuer à l'inertie de la paroi. De ce fait, seul le revêtement intérieur (le plus souvent une plaque de plâtre de 13 mm) est considéré apporter de l'inertie. La capacité thermique des lames d'air (faible de toute façon) étant négligée conformément à la norme *NF EN ISO 13786*. Ce constat est valable pour la quasi-totalité des parois à ossature bois qui, même si elles ne possèdent pas une épaisseur d'isolant intérieure, sont modélisées sans prendre en compte les montants bois. C'est donc dans ce cas aussi une couche isolante qui se trouve directement derrière le revêtement intérieur. De ce fait, cette simplification peut donner une capacité thermique séquentielle pour une paroi à ossature bois qui est plus faible que celle obtenue pour une période quotidienne. En réalité, la capacité thermique pour une période de 12 jours est au moins égale à celle pour une période de 24 heures. L'égalité étant uniquement observée si la plus faible des périodes permet à la paroi de stocker de l'énergie à la hauteur de sa capacité maximale.

Une autre limite de cette méthode repose sur l'interprétation de la profondeur de pénétration périodique. L'équation qui permet le calcul de la capacité thermique induit que l'amplitude des variations en température est la même sur toute l'épaisseur efficace de la paroi ($d_T = \frac{\delta}{\sqrt{2}}$) et qu'elle est nulle au-delà de cette épaisseur. En réalité, comme le montre le graphique suivant pour une couche homogène d'isolant de 1 m d'épaisseur, l'amplitude des variations en température décroît dans l'épaisseur de la paroi. La ligne verticale noire matérialise la profondeur de pénétration de la couche homogène pour une période de 12 jours.



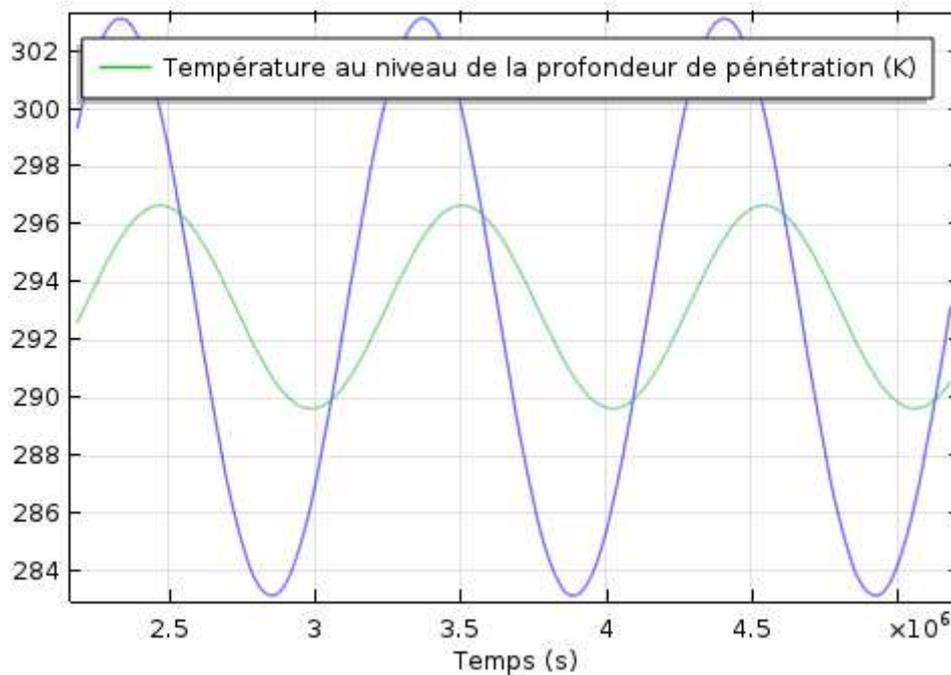
Graphique 3 : Amplitude des variations en température définie par MEF pour une couche homogène d'isolant soumise en surface à une variation de température harmonique de période 12 jours

D'après la définition de la profondeur de pénétration périodique, à cette profondeur l'amplitude des variations en température est réduite dans le rapport « e » (base des logarithmes naturels $e = 2.718 \dots$) pour une couche homogène d'épaisseur infinie. Cette définition a pu être vérifiée par MEF dans le cas d'une couche d'isolant de 1 m d'épaisseur (épaisseur suffisamment grande pour le matériau pour l'assimiler à une épaisseur infinie). Les propriétés retenues pour le matériau sont données dans le tableau suivant.

Tableau 27 : Propriétés retenue pour la couche d'isolant d'épaisseur considérée infinie

	Conductivité thermique [W/(m.K)]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique massique [J/(kg.K)]
Isolant	0.04	30	1400

La diffusivité thermique de ce matériau vaut $\alpha = 0.95 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Sa profondeur de pénétration pour une période de 12 jours est donc égale à $\delta = 0.560 \text{ m}$ et son épaisseur efficace est égale à $d_T = \delta/\sqrt{2} = 0.396 \text{ m}$. Le graphique suivant présente les variations en température au niveau de la face sollicitée (courbe bleue) ainsi qu'au niveau de la profondeur de pénétration périodique (courbe verte).



Graphique 4 : Variation de la température définie par MEF pour une couche homogène d'isolant soumise en surface à une variation de température harmonique de période 12 jours

Pour une amplitude de sollicitation crête à crête de 20 K, celle attendue au niveau de la profondeur de pénétration périodique est $A_{\delta,th} = 20/e = 7.36 \text{ K}$. La valeur obtenue par simulation par éléments finis est $A_{\delta,MEF} = 7.04 \text{ K}$. Ces deux valeurs sont proches l'une de l'autre confirmant l'interprétation physique de la notion de profondeur de pénétration périodique. A priori il n'est pas évident de savoir si l'utilisation qui est faite de la profondeur de pénétration périodique dans la méthode simplifiée de l'annexe A, via le calcul d'une épaisseur efficace, sous-estime ou au contraire surestime la valeur de la capacité thermique périodique. Une réponse peut certainement être trouvée dans l'analyse de l'équation permettant le calcul de l'épaisseur efficace. Dans le cadre de cette étude, il n'a pas été trouvé d'explication à l'usage du dénominateur $\sqrt{2}$ dans cette équation. L'amplitude de la variation en température n'est toutefois pas constante jusqu'au niveau de l'épaisseur efficace (tendance à surestimer la capacité thermique) mais n'est pas non plus nulle au-delà de celle-ci (tendance à sous-estimer la capacité thermique).

3.2. Validité de la simplification par décomposition

L'objectif de cette partie de l'étude est de vérifier que la simplification par décomposition proposée pour la détermination de la capacité thermique quotidienne reste valable pour une période de 12 jours. Pour ce faire, la possibilité de recourir à la modélisation par éléments finis est évaluée. En fonction des observations faite une configuration de paroi est retenue pour valider l'emploi de la simplification par décomposition dans le cas où la capacité thermique séquentielle est définie. La méthode retenue pour le calcul de cette capacité est finalement présentée.

3.2.1. Modélisation par éléments finis pour le calcul de la capacité thermique séquentielle

Dans le paragraphe 2.1 de ce chapitre il a été montré que la méthode de calcul par éléments finis permet de déterminer la capacité thermique quotidienne d'un composant. Lorsqu'il s'agit d'une période de 12 jours le recours à la modélisation ne s'avère plus être fiable. Cette méthode semble présenter le même problème concernant les « faibles épaisseurs » que celle par calcul matriciel définie dans la norme *NF EN ISO 13786*. Ce phénomène peut être illustré au travers de l'exemple 1 de l'annexe D de la norme. Celui-ci a été étudié précédemment dans le paragraphe 2.1.2 de ce chapitre dans le cas de l'inertie quotidienne.

Cet exemple concerne un mur homogène de 200 mm en béton. Les propriétés du matériau sont définies dans le Tableau 13. Puisque cette configuration est considérée comme étant de « faible épaisseur » lorsqu'il s'agit d'une période de 12 jours, la méthode par calcul matriciel ne peut être utilisée de manière fiable pour obtenir sa capacité thermique périodique. Les *Règles Th-I* recommandent l'emploi d'une méthode simplifiée telle que définie dans l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786*. Le Tableau 28 donne des valeurs de la capacité thermique pour une période de 12 jours du mur en béton suivant plusieurs méthodes.

Tableau 28 : Valeurs de la capacité thermique séquentielle obtenues selon plusieurs méthodes pour l'exemple 1 de la NF EN ISO 13786

	Capacité thermique intérieure pour une période de 12 jours [kJ/(m².K)]		
	Méthode de l'épaisseur efficace	Méthode de l'épaisseur efficace $\alpha = 0.75 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	MEF
Mur béton 200 mm	240	480	1500

Dans le tableau précédent trois méthodes sont appliquées pour le calcul de la capacité thermique séquentielle. La première est la méthode de l'épaisseur efficace telle que définie dans l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786*. Dans ce cas l'épaisseur efficace retenue est égale à la moitié de l'épaisseur totale du composant. La seconde méthode est une extrapolation de la première. La diffusivité thermique réelle du béton ($\alpha = 0.75 \text{ m}^2/\text{s}$) est utilisée pour déterminer la profondeur de pénétration correspondant à une période de 12 jours et qui est égale à $\delta = 498 \text{ mm}$. Ce qui donne une épaisseur efficace de $d_T = \delta/\sqrt{2} = 352 \text{ mm}$. Cette valeur étant plus importante que l'épaisseur de la paroi, l'épaisseur efficace est prise égale à l'épaisseur totale du composant. Enfin, la dernière méthode consiste à procéder à un calcul par éléments finis comme cela a été fait précédemment dans le cas d'une période de 24 heures. Les résultats sont différents les uns des autres. La valeur obtenue par la méthode de l'épaisseur efficace extrapolée correspond à la capacité thermique à long terme du composant puisque que l'épaisseur efficace est prise égale à l'épaisseur totale du composant. Il n'est dans tous les cas pas possible, quelle que soit la période considérée, d'obtenir une valeur supérieure à celle-ci. La simulation par éléments finis donne pourtant une valeur qui dépasse de beaucoup cette capacité thermique à long terme. Cet exemple illustre le problème pour les « faibles épaisseurs » rencontré lors de l'application de la méthode par calcul matriciel et qui s'observe également dans le cas de la méthode de calcul par éléments finis.

Toutefois, lorsque des parois de fortes épaisseurs sont étudiées il est possible d'utiliser le calcul par éléments finis sans craindre d'obtenir des résultats erronés. A titre de démonstration, l'exemple du mur en béton précédent mais cette fois-ci d'épaisseur égale à 2 m est considéré. Avec une telle épaisseur, la méthode par calcul matriciel peut être utilisée de manière fiable. Le tableau suivant

donne la valeur de la capacité thermique séquentielle pour cette paroi obtenue par calcul matriciel et par simulation par éléments finis.

Tableau 29 : Valeurs de la capacité thermique séquentielle obtenues par calcul matriciel et MEF pour un mur béton de 2 m d'épaisseur

	Capacité thermique intérieure pour une période de 12 jours [kJ/(m ² .K)]		
	Calcul matriciel	MEF	Ecart
Mur béton 200 mm	863.88	874.62	+ 1.2 %

La méthode par calcul matriciel est considérée fiable pour des épaisseurs importantes. Puisque la valeur que celle-ci donne pour la capacité thermique séquentielle d'un mur béton d'épaisseur égale à 2 m est similaire à la valeur obtenue par MEF, il est possible de considérer cette dernière fiable dans ce cas-ci.

De la même manière, si l'on reprend le cas de la paroi en béton d'épaisseur 200 mm mais cette fois-ci avec une couche d'isolant de forte épaisseur côté extérieur, il est possible de montrer que le manque de fiabilité des résultats issus de la MEF s'observe uniquement pour les « faibles épaisseur ». Placer une couche d'isolant côté extérieur n'impacte que faiblement la capacité thermique séquentielle d'une paroi, surtout si celle-ci est constituée d'un matériau à forte inertie d'épaisseur 200 mm. Le calcul de la capacité thermique séquentielle d'une telle paroi par MEF donne une valeur de 515 kJ/(K.m²). Cette valeur s'avère être bien plus faible que celle présentée dans le Tableau 28 (1500 kJ/(K.m²)) et calculée par MEF pour la paroi composée uniquement de béton sur 200 mm. Ces deux parois présentent une inertie similaire due à la présence des 200 mm de béton. Cependant, le résultat obtenu avec la mise en place d'une couche d'isolant de forte épaisseur côté extérieur s'avère plus cohérent et se trouve être proche de la capacité thermique à long terme de la couche de béton de 200 mm (480 kJ/(K.m²)).

Il est alors possible de déterminer la capacité thermique séquentielle d'une paroi de forte épaisseur à partir d'un calcul par éléments finis. Le manque de fiabilité s'observe uniquement pour des parois de « faibles épaisseurs » de la même manière que pour la méthode par calcul matriciel.

3.2.2. Paroi de forte épaisseur

Vu les conclusions précédentes, il est proposé de vérifier la validité pour une période de 12 jours de la simplification par décomposition au travers d'une paroi de forte épaisseur. Celle-ci est composée d'un montant bois placé dans une couche d'isolant. La largeur de l'élément bois est de 45 mm. La largeur totale de la paroi est de 400 mm. Afin de considérer une paroi de forte épaisseur celle-ci est prise égale à 2 m. Les propriétés retenues pour les deux matériaux sont données dans les Tableau 17 et Tableau 18.

Les capacités thermiques séquentielles de chaque composant homogène de la paroi (partie « isolant » et partie « ossature ») sont déterminées par calcul par éléments finis ainsi qu'à partir de la méthode matricielle de la norme *NF EN ISO 13786*. Le tableau suivant présente les résultats obtenus.

Tableau 30 : Capacités thermiques séquentielles des parties homogènes de la paroi de forte épaisseur

Capacité thermique intérieure pour une période de 12 jours [kJ/(m ² .K)]
--

	Norme NF EN ISO 13786	MEF	Ecart
Partie « Isolant »	19.81	20.40	+ 3.0 %
Partie « Ossature »	133.47	138.49	+ 3.8 %

Comme le montre le tableau précédent, les écarts entre les valeurs obtenues à partir de la méthode par calcul matriciel et par simulation par éléments finis sont plus importants que lorsqu'il s'agit d'étudier l'inertie quotidienne. Pour une période de 24 heures, le Tableau 21 qui s'intéresse à la capacité thermique périodique des parties « isolant » et « ossature » d'une paroi à ossature bois donne des écarts entre les deux méthodes respectivement de 2.3 % et 0.9 %. Malgré ces écarts plus importants les valeurs obtenues suivant les deux méthodes restent similaires. Un calcul par éléments finis est mené de manière à définir la capacité thermique séquentielle de la paroi complète composée des parties « isolant » et « ossature ». Le résultat obtenu est comparé dans le tableau suivant à la valeur obtenue par combinaison des capacités de chaque partie obtenues par MEF.

Tableau 31 : Comparaison des capacités thermiques séquentielles obtenues pour la paroi complète par MEF et par décomposition

	Capacité thermique intérieure pour une période de 12 jours [kJ/(m².K)]		
	MEF	Décomposition	Ecart
Paroi complète	34.83	33.69	- 3.27 %

La capacité thermique séquentielle de la paroi obtenue en la décomposant en parties homogènes et proche de celle obtenue pour la paroi complète via un calcul par éléments finis. Même si l'écart entre les deux valeurs est d'environ 3 %, la valeur donnée par la méthode simplifiée de décomposition est inférieure à celle calculée par MEF pour la paroi complète. La méthode proposée ne vient donc pas surestimer la capacité thermique séquentielle de la paroi. Au vu des résultats précédents, il est admis que la méthode de détermination de la capacité thermique périodique d'une paroi hétérogène par décomposition est également valable dans le cas d'une période de 12 jours (inertie séquentielle).

3.2.3. Méthode retenue

Dans le cadre d'une application réglementaire, puisque les parois étudiées sont généralement de « faible épaisseur » au regard d'une période de 12 jours, les méthodes de l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786* doivent être utilisées. Puisque la justesse de la simplification par décomposition a pu être validée pour une période de 12 jours, il est proposé d'utiliser celle-ci lors de l'application de la méthode de l'épaisseur efficace définie dans l'annexe A de la *NF EN ISO 13786*.

Pour le calcul de la capacité thermique séquentielle d'une paroi ossature bois il est alors proposé de décomposer celle-ci en deux parties (« isolant » et « ossature ») comme présenté sur l'illustration 40. La capacité thermique périodique de chacune des parties est alors calculée à partir de la méthode de l'épaisseur efficace. La valeur conventionnelle de la diffusivité thermique utilisée dans cette méthode est égale à $\alpha = 0.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette dernière est proche de la valeur obtenue pour le béton. Le matériau bois, suivant ses caractéristiques, présente des valeurs plus faibles pour la diffusivité thermique. Utiliser cette valeur conventionnelle pour la partie « ossature » peut ainsi avoir pour conséquence de surestimer sa capacité thermique périodique. Il est d'ailleurs spécifié dans l'annexe A de la *NF EN ISO 13786* que « cette méthode simplifiée peut surestimer la capacité thermique de certains matériaux, tels que le bois ou le béton cellulaire ». Ainsi, il est proposé d'utiliser une diffusivité thermique qui est différente de la valeur conventionnelle utilisée pour la méthode de l'épaisseur efficace. Les montants d'ossature peuvent être assimilés à du résineux léger dont les propriétés sont

indiquées dans le Tableau 26. La diffusivité thermique de ce matériau soit $\alpha = 0.16 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ peut être utilisée lors de l'application de la méthode de l'épaisseur efficace pour le calcul de la capacité thermique de la partie « ossature ». L'utilisation de cette valeur se traduit par une épaisseur efficace maximale pour une période de 12 jours égale à $d_T = 16 \text{ cm}$ contre $d_T = 34 \text{ cm}$ pour la valeur conventionnelle. L'illustration suivante synthétise la méthode pour le calcul des capacités thermiques séquentielles des parties « isolant » et « ossature ».

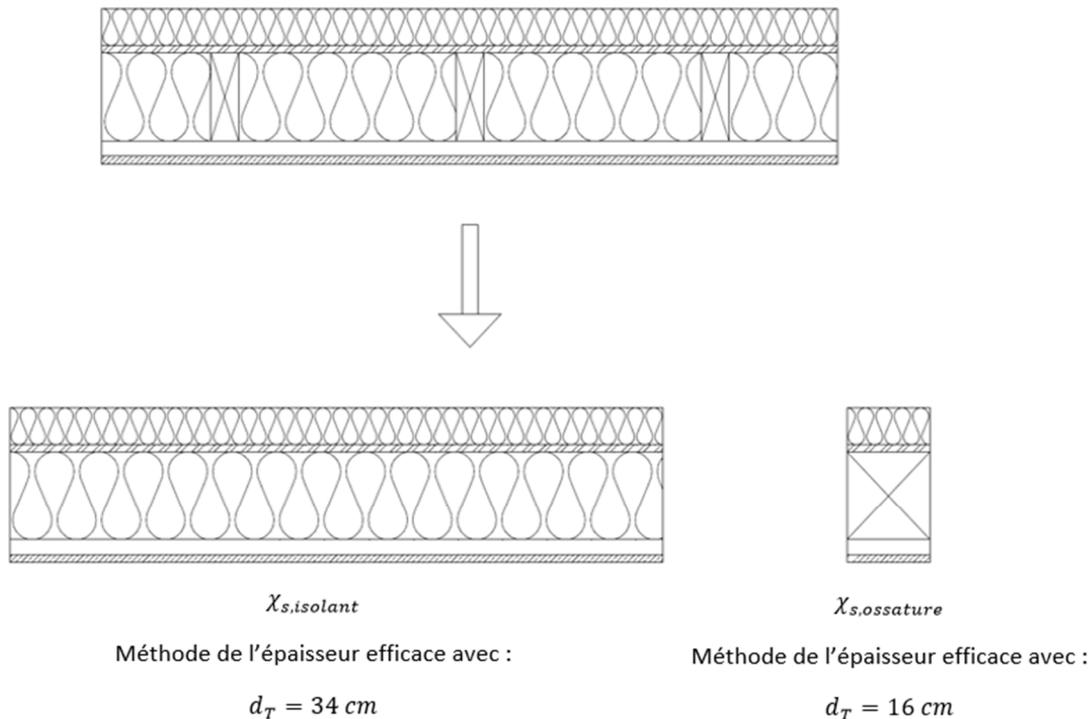


Illustration 41 : Calcul des capacités thermiques séquentielles des parties « isolant » et « ossature »

Une fois les capacités thermiques séquentielle de chaque partie connue, l'équation suivante est utilisée pour calculer celle de la paroi complète.

$$\chi_s = R_{ossature} \times \chi_{s,ossature} + R_{isolant} \times \chi_{s,isolant} \text{ [kJ/(K.m}^2\text{)]}$$

Où :

$\chi_{s,ossature}$ [kJ/(K.m²)] est la capacité thermique de la partie « ossature » pour une période de 12 jours

$\chi_{s,isolant}$ [kJ/(K.m²)] est la capacité thermique de la partie « isolant » pour une période de 12 jours

$R_{ossature}$ [1] est la surface de la partie « ossature » ramenée à la surface totale de la paroi

$R_{isolant}$ [1] est la surface de la partie « isolant » ramenée à la surface totale de la paroi

La valeur de la capacité thermique périodique obtenue ainsi que celles des autres parois sont utilisées conformément aux Règles Th-I pour le calcul du paramètre C_{ms} .

3.3. Application sur un mur à ossature bois

Afin d'évaluer le gain en inertie dû à l'application de la méthode proposée, l'exemple de paroi à ossature déjà étudié dans le paragraphe 2.2 de cette première partie du chapitre 2 de ce document est repris. Sa composition ainsi que les propriétés des différents matériaux sont précisées dans les Tableau 17 et Tableau 18. La largeur des montants est de 45 mm et leur entraxe de 400 mm. La résistance thermique superficielle intérieure est prise égale à $R_{si} = 0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

Le tableau suivant donne une comparaison entre application de la méthode normative et recours à la méthode par décomposition proposée.

Tableau 32 : Gain en inertie dû à l'application de la méthode par décomposition proposée

	Capacité thermique intérieure pour une période de 12 jours [kJ/(m ² .K)]			
	Partie « isolant »	Partie « ossature »	Paroi complète	Ecart
Annexe A NF EN ISO 13786	10.4	-	10.4	+ 77.5 %
Méthode proposée	10.4	82.05	18.46	

Les résultats présentés dans le tableau précédent montrent l'intérêt de la méthode par décomposition proposée. Celle-ci donne une capacité thermique séquentielle de la paroi étudiée environ 1.8 fois supérieure à la valeur issue de l'application de la méthode de l'épaisseur efficace telle que décrite dans l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786*. Toutefois, la capacité thermique séquentielle de cette paroi étant faible, ce résultat est à relativiser puisque l'augmentation n'est que de 8 kJ/(m².K). Aussi il est possible d'observer que l'application de la *NF EN ISO 13786* donne une capacité thermique séquentielle plus faible que celle obtenue pour une période de 24 heures ($\chi_j = 15.76 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). En réalité, plus la période de la sollicitation en température augmente, plus la valeur de la capacité thermique périodique s'accroît jusqu'à atteindre la valeur de la capacité thermique à long terme. La méthode par décomposition proposée, permet quant à elle d'obtenir un résultat plus cohérent. Dans le cas de la paroi à ossature bois étudiée, la méthode de l'épaisseur efficace proposée dans l'annexe A sous-estime la capacité thermique puisque seules les couches situées devant la première couche isolante sont considérées apporter de l'inertie.

4. CALCUL DE POINTS D'INERTIE

Les méthodes présentées dans les parties précédentes de ce document permettent la prise en compte des montants des parois à ossature bois lors de la détermination des paramètres d'inertie quotidienne et séquentielle. Il s'agit de méthodes dites « par calcul » qui ne sont pas utilisées par tous. Les *Règles Th-I* proposent également des méthodes « forfaitaire » et par « points d'inertie » qui sont plus simples et plus rapides à utiliser. La méthode par « points d'inertie » permet notamment une prise en compte plus fine de l'inertie apportée par les parois que la méthode « forfaitaire ».

4.1. Méthode par points d'inertie

Cette méthode peut être utilisée pour déterminer les paramètres d'inertie quotidienne et séquentielle. Pour ces deux périodes (24 heures et 12 jours) la démarche est identique. Des tableaux de cotation donnent pour différents types de parois les points d'inertie qui y sont associés. Pour chaque niveau du bâtiment, les points obtenus pour les parois sont sommés. Le niveau qui présente le nombre de points d'inertie minimum sert de référence pour le calcul des classes d'inertie quotidienne et séquentielle. C'est ensuite à partir de celles-ci que sont calculés les paramètres C_m , A_m et C_{ms} . D'après les *Règles Th-I*, les points d'inertie « correspondent au rapport entre le flux échangé ramené à la surface au sol et à la sollicitation en température intérieure. Un point d'inertie s'exprime en W/K par m² de surface utile ». Le livrable « *Travail préparatoire* » donne une description plus précise de cette méthode.

Les tableaux de cotation qui donnent les points d'inertie pour différentes parois ne font pas mention des murs à ossature bois. Il est alors proposé d'y intégrer ce type de paroi tout en permettant la prise en compte de l'inertie apportée par les montants bois.

4.2. Points d'inertie pour les parois à ossature bois

Le tableau 8 des *Règles Th-I* et le tableau 7 de l'annexe 2 de ces règles permettent de définir le nombre de points d'inertie, respectivement quotidienne et séquentielle, d'une paroi selon sa capacité thermique périodique. Il est alors envisageable, en utilisant les méthodes définies dans la première partie de ce chapitre, de calculer des plages de valeurs de la capacité thermique périodique (quotidienne et séquentielle) pour différentes configurations semblables de parois à ossature bois. Ces dernières peuvent concerner la présence ou non d'une couche d'isolant intérieure, la position du panneau de contreventement ou encore le type de revêtement intérieur. Ces plages de valeurs ainsi définies permettront d'affecter à chaque configuration un nombre de points d'inertie. Les résultats obtenus pourront alors être intégrés aux tableaux de cotation existants. Puisque ce sont les méthodes définies dans la première partie de ce chapitre qu'il est proposé d'utiliser, l'inertie apportée par les montants serait prise en compte.

PARTIE 2 : ETUDE DE L'IMPACT SUR LES INDICATEURS RÉGLEMENTAIRES

1. INTRODUCTION

Dans la première partie de ce chapitre deux méthodes ont été présentées pour, lors d'un calcul RT 2012, permettre la prise en compte de l'inertie apportée par les montants d'ossature bois au travers des paramètres χ_j et χ_s . Par le biais de la méthode par calcul proposée dans les *Règles Th-I*, ces paramètres sont utilisés pour déterminer les valeurs des paramètres C_m et A_m caractérisant l'inertie quotidienne et la valeur du paramètre C_{ms} relatif à l'inertie séquentielle. Ceux-ci sont directement utilisés par le moteur de calcul RT. La première méthode proposée concerne l'inertie quotidienne (χ_j) et la seconde l'inertie séquentielle (χ_s). Toutes deux sont des méthodes dites par décomposition. Il s'agit alors de décomposer la paroi à couches hétérogènes en deux parties : la partie « isolant » et la partie « ossature ». Pour l'inertie quotidienne, la capacité thermique périodique χ_j de chaque partie est calculée via la méthode par calcul matriciel proposée dans la norme *NF EN ISO 13786*. La capacité thermique quotidienne de la paroi complète est alors prise égale à la somme des capacités de chaque partie pondérées au prorata de leur présence. Pour l'inertie séquentielle, la capacité thermique périodique χ_s de la partie « isolant » est calculée via la méthode de l'épaisseur efficace décrite dans l'annexe A de la *NF EN ISO 13786*. Cette même méthode est utilisée pour le calcul de la capacité de la partie « ossature » mais en retenant une valeur différente de l'épaisseur efficace maximale. Comme pour l'inertie quotidienne, la capacité thermique séquentielle de la paroi complète est prise égale à la somme des capacités de chaque partie pondérées au prorata de leur présence.

Dans cette seconde partie, il est proposé d'évaluer l'impact de la prise en compte de l'inertie apportée par les montants lors d'un calcul RT 2012. Il s'agit de montrer dans quelle mesure les valeurs des indicateurs réglementaires *Bbio* et *Tic* sont impactées. Pour ce faire, le cas d'étude de la maison individuelle déjà utilisé dans la première phase du projet THERMIQUE ETE BOIS est retenu. Une étude RT est alors menée sur différentes configurations de cette maison individuelle avec et sans prise en compte de l'inertie apportée par l'ossature bois.

Le cas d'étude retenu est ses différentes variantes sont dans un premier présentés. Les capacités thermiques périodiques des différentes parois (χ_j et χ_s) sont alors calculées avec et sans prise en compte des montants afin de quantifier le gain d'inertie dû à l'ossature à l'échelle paroi. Pour les différentes variantes de la maison individuelle, les paramètres d'inertie (C_m , A_m et C_{ms}) sont ensuite calculés à partir des capacités thermiques périodiques obtenues (avec et sans prise en compte de l'ossature). La comparaison des résultats permet de quantifier le gain d'inertie à l'échelle bâtiment. Enfin, les indicateurs réglementaires (*Bbio* et *Tic*) sont calculés pour les différentes variantes du bâtiment à partir des paramètres d'inertie obtenus. La comparaison des résultats permet alors de quantifier l'impact de la prise en compte de l'inertie apportée par les montants d'ossature sur les indicateurs réglementaires.

2. CAS D'ETUDE

2.1. Description générale

Le cas d'étude déjà utilisé dans la première phase du projet est retenu. Il s'agit de la maison individuelle présentée dans le Catalogue Construction Bois. Une représentation en est donnée sur l'illustration suivante.

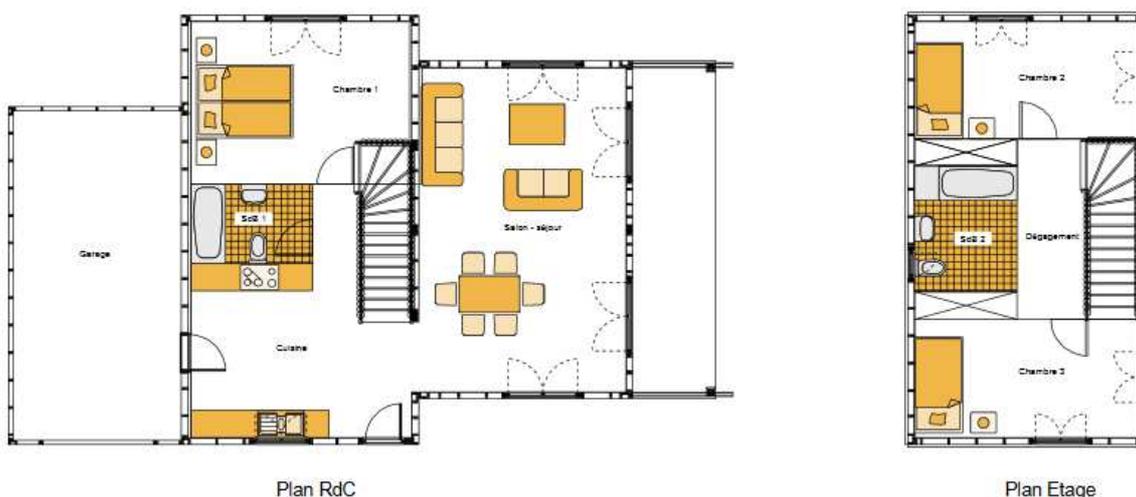


Illustration 42 : Cas d'étude « maison individuelle », catalogue-construction-bois.fr

Le bâtiment est composé d'une partie habitation sur deux niveaux et d'une partie garage (local non chauffé). Pour cette étude, le climat et l'orientation sont retenus de manière à obtenir une situation défavorable vis-à-vis de confort estival. La maison est alors située à Nice (Alpes-Maritimes zone H3d) et orientée Nord-Sud. Le garage étant au Nord et la terrasse au Sud. Pour les différentes configurations analysées, le bâtiment peut être composé d'un ou deux niveaux.

2.2. Caractéristiques des portes et fenêtres

Les caractéristiques des portes et fenêtres retenues sont données en suivant.

Hauteur	2.04 m	Largeur	0.83 m	Nb de vitrages	0																											
Sans protection																																
Jw vertical	3.5 W/(m ² .K)	Jw horizontal	3.5 W/(m ² .K)																													
<input type="checkbox"/> STD Coefficient solaire (Sw) 0.14																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Sw-C</th> <th>Sw1-C</th> <th>Sw2-C</th> <th>Sw3-C</th> <th>Sw-E</th> <th>Sw1-E</th> <th>Sw2-E</th> <th>Sw3-E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hiver</td> <td>0.04</td> <td>0</td> <td>0.04</td> <td>0</td> <td>0.14</td> <td>0</td> <td>0.14</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Eté</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	Hiver	0.04	0	0.04	0	0.14	0	0.14	0	Eté								
	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E																								
Hiver	0.04	0	0.04	0	0.14	0	0.14	0																								
Eté																																

Illustration 43 : Caractéristiques de la porte d'entrée, Pléiades

Hauteur	2.04 m	Largeur	0.83 m	Nb de vitrages	0																											
Sans protection																																
Jw vertical	5.8 W/(m ² .K)	Jw horizontal	5.8 W/(m ² .K)																													
<input type="checkbox"/> STD Coefficient solaire (Sw) 0.22																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Sw-C</th> <th>Sw1-C</th> <th>Sw2-C</th> <th>Sw3-C</th> <th>Sw-E</th> <th>Sw1-E</th> <th>Sw2-E</th> <th>Sw3-E</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hiver</td> <td>0.12</td> <td>0</td> <td>0.12</td> <td>0</td> <td>0.22</td> <td>0</td> <td>0.22</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Eté</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	Hiver	0.12	0	0.12	0	0.22	0	0.22	0	Eté								
	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E																								
Hiver	0.12	0	0.12	0	0.22	0	0.22	0																								
Eté																																

Illustration 44 : Caractéristiques de la porte donnant sur le garage, Pléiades

Hauteur	2.04 m	Largeur	1.6 m	Nb de vitrages	2																														
Sans protection																																			
Jw vertical	1.484 W/(m ² .K)	Jw horizontal	2.005 W/(m ² .K)	TI global	0.632																														
<input type="checkbox"/> STD Coefficient solaire (Sw) 0.51 <input type="checkbox"/> Vitrage spécia																																			
<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Sw-C</th> <th>Sw1-C</th> <th>Sw2-C</th> <th>Sw3-C</th> <th>Sw-E</th> <th>Sw1-E</th> <th>Sw2-E</th> <th>Sw3-E</th> <th>TI diffus</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hiver</td> <td>0.51</td> <td>0.427</td> <td>0.084</td> <td>0</td> <td>0.51</td> <td>0.427</td> <td>0.084</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Eté</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>							Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	TI diffus	Hiver	0.51	0.427	0.084	0	0.51	0.427	0.084	0	0	Eté									
	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	TI diffus																										
Hiver	0.51	0.427	0.084	0	0.51	0.427	0.084	0	0																										
Eté																																			

Illustration 45 : Caractéristiques des portes-fenêtres, Pléiades

Hauteur	<input type="text" value="1.4"/> m	Largeur	<input type="text" value="1.2"/> m	Nb de vitrages	<input type="text" value="2"/>																				
Sans protection																									
Jw vertical	<input type="text" value="1.606"/> W/(m ² .K)	Jw horizontal	<input type="text" value="2.107"/> W/(m ² .K)	TI global	<input type="text" value="0.608"/>																				
<input type="checkbox"/> STB Coefficient solaire (Sw) <input type="text" value="0.493"/> <input type="checkbox"/> Vitrage spécia																									
<table border="1"> <tr> <td></td> <td>Sw-C</td> <td>Sw1-C</td> <td>Sw2-C</td> <td>Sw3-C</td> <td>Sw-E</td> <td>Sw1-E</td> <td>Sw2-E</td> <td>Sw3-E</td> <td>TI diffus</td> </tr> <tr> <td>Hiver</td> <td><input type="text" value="0.493"/></td> <td><input type="text" value="0.41"/></td> <td><input type="text" value="0.083"/></td> <td><input type="text" value="0"/></td> <td>Été</td> <td><input type="text" value="0.493"/></td> <td><input type="text" value="0.41"/></td> <td><input type="text" value="0.083"/></td> <td><input type="text" value="0"/></td> </tr> </table>							Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	TI diffus	Hiver	<input type="text" value="0.493"/>	<input type="text" value="0.41"/>	<input type="text" value="0.083"/>	<input type="text" value="0"/>	Été	<input type="text" value="0.493"/>	<input type="text" value="0.41"/>	<input type="text" value="0.083"/>	<input type="text" value="0"/>
	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C	Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	TI diffus																
Hiver	<input type="text" value="0.493"/>	<input type="text" value="0.41"/>	<input type="text" value="0.083"/>	<input type="text" value="0"/>	Été	<input type="text" value="0.493"/>	<input type="text" value="0.41"/>	<input type="text" value="0.083"/>	<input type="text" value="0"/>																

Illustration 46 : Caractéristiques des fenêtres, Pléiades

2.3. Caractéristiques des parois opaques

Trois variantes de murs extérieurs sont retenues pour les différentes configurations de la maison individuelle. Ne possédant pas de couche d'isolant côté intérieur les configurations ME2 et ME6 présentent à priori une inertie plus importante que la configuration ME8. Ces variantes de mur, comme celles des autres parois, sont issues du Catalogue Construction Bois et présentées en suivant :

Tableau 33 : Variantes de murs extérieurs

ME2 : Isolant en âme et voile travaillant intérieur

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
BA13	0.013	0.25	800	1000	0.4	0.03
Lame d'air	0.025	0.139	1	1224		
OSB	0.01	0.13	650	1700		
Isolant / Montants	0.2	0.038	60	1030		

ME6 : Isolant en âme et en doublage extérieur

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
BA13	0.013	0.25	800	1000	0.4	0.02
Lame d'air	0.025	0.139	1	1224		
Isolant / Montants	0.145	0.038	60	1030		
OSB	0.01	0.13	650	1700		
Isolant	0.06	0.038	60	1030		

ME8 : Isolant en âme et en doublage intérieur et extérieur

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
BA13	0.013	0.25	800	1000	0.4	0.02
Isolant	0.04	0.038	60	1030		
Isolant / Montants	0.145	0.038	60	1030		
OSB	0.01	0.13	650	1700		
Isolant	0.06	0.038	60	1030		

Une seule configuration de toiture est retenue. Il s'agit d'une toiture en fermettes avec combles perdus. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 34 : Caractéristiques de la toiture

T4 : Combles perdus avec 300 mm d'isolant et fermette 100*36 mm

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
BA13	0.013	0.25	800	1000		
Isolant / Fermettes	0.1	0.038	60	1030		
Isolant	0.2	0.038	60	1030		

Deux types de plancher bas sont retenus pour les différentes configurations du bâtiment. Il s'agit d'un plancher à solivage bois sur vide sanitaire et d'un plancher béton sur terre-plein avec chape béton. Ce second plancher présente l'inertie la plus importante. Le tableau suivant présente ces deux configurations.

Tableau 35 : Variantes de planchers bas

PB1 : Solives bois avec sous-face continue

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
Parquet	0.016	0.18	758	1600	0.4	0.03
OSB	0.022	0.13	650	1700		
Isolant / Solives	0.22	0.038	60	1030		
OSB	0.01	0.13	650	1700		

PB2 : Dallage sur terre-plein avec chape béton

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
Parquet	0.016	0.18	758	1600		
Chape béton	0.05	1.15	2000	840		
Dalle béton	0.2	2.3	2350	1000		
Isolant polystyrène	0.2	0.039	35	1450		

La configuration de mur intérieur retenu est composée d'une simple ossature bois avec parement en plaque de plâtre. Celle-ci est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 36 : Caractéristiques du mur intérieur

MI1 : Mur simple ossature 95*45 mm

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
BA13	0.013	0.25	800	1000		
Lame d'air 25 mm	0.025	0.139	1	1224		
OSB	0.01	0.13	650	1700		
Isolant / Montants	0.095	0.038	60	1030		
lame d'air 25 mm	0.025	0.139	1	1224		
BA13	0.013	0.25	800	1000		

Deux configurations de planchers intermédiaires sont retenues pour composer les différentes variantes du bâtiment. Il s'agit de planchers à solivage bois. L'une des configurations apporte plus d'inertie par l'intermédiaire d'une chape béton. Le tableau suivant présente ces planchers.

Tableau 37 : Variantes de planchers intermédiaires

PI1 : Solivage simple bois massif 220*45 mm sans chape

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
Parquet	0.016	0.18	758	1600		
OSB	0.022	0.13	650	1700		
Lame d'air / Solives	0.22	1.375	1	1224		
Isolant	0.06	0.038	60	1030		
BA13	0.013	0.25	800	1000		

PI2 : Solivage simple bois massif 220*45 mm avec chape

	Epaisseur	λ	ρ	C	PT intégré	
	[m]	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]	Entraxe [m]	ψ [W/(K.m)]
Parquet	0.016	0.18	758	1600		
Chape béton	0.05	1.15	2000	840		
OSB	0.022	0.13	650	1700		
Lame d'air / Solives	0.22	1.375	1	1224		
Isolant	0.06	0.038	60	1030		
BA13	0.013	0.25	800	1000		

Le tableau suivant présente les caractéristiques des montants d'ossature, des solives et des fermettes qui sont utilisées pour quantifier l'inertie qu'ils apportent.

Tableau 38 : Caractéristiques des éléments d'ossature

	λ	ρ	C
	[W/(K.m)]	[kg/m ³]	[J/(kg.K)]
Ossatures	0.15	450	1600

2.4. Configurations

Les variantes retenues pour les différentes parois ainsi que le nombre de niveau du bâtiment permettent de composer 18 configurations de la maison individuelle. Celles-ci sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 39 : Configurations de la maison individuelle

N° Config	Nombre de niveaux	Toiture	Mur ext.	Plancher bas	Mur int.	Plancher int.
1	1	T4	ME2	PB1	MI1	
2		T4	ME2	PB2	MI1	
3		T4	ME6	PB1	MI1	
4		T4	ME6	PB2	MI1	
5		T4	ME8	PB1	MI1	
6		T4	ME8	PB2	MI1	
7	2	T4	ME2	PB1	MI1	PI1
8		T4	ME2	PB1	MI1	PI2
9		T4	ME2	PB2	MI1	PI1
10		T4	ME2	PB2	MI1	PI2
11		T4	ME6	PB1	MI1	PI1
12		T4	ME6	PB1	MI1	PI2
13		T4	ME6	PB2	MI1	PI1
14		T4	ME6	PB2	MI1	PI2
15		T4	ME8	PB1	MI1	PI1
16		T4	ME8	PB1	MI1	PI2
17		T4	ME8	PB2	MI1	PI1
18		T4	ME8	PB2	MI1	PI2

3. GAIN D'INERTIE A L'ECHELLE PAROI

Il s'agit ici de quantifier l'apport d'inertie à l'échelle paroi dû à la prise en compte des montants d'ossature, des solives et des fermettes. Pour chaque variante des typologies de parois les capacités thermiques quotidienne et séquentielle sont données avec et sans prise en compte de l'ossature bois. Les murs extérieurs et intérieurs sont composés d'une ossature d'épaisseur 45 mm avec un entraxe de 400 mm. La partie « isolant » représente donc 88.75 % de la paroi complète et la partie « ossature » les 11.25 % restant. Les entrants des fermettes en toiture sont d'épaisseur 36 mm avec un entraxe de 400 mm. La partie « isolant » représente 91 % de la paroi complète et la partie « ossature » 9 %. Enfin, pour les planchers intermédiaires et le plancher bas bois, les solives sont d'épaisseur 75 mm et d'entraxe 400 mm. La partie « isolant » représente donc 81.25 % de la paroi complète et la partie « ossature » représente les 18.75 % restant.

3.1. Murs extérieurs

Les tableaux suivants donnent les capacités thermiques périodiques obtenues pour les murs extérieurs.

Tableau 40 : Capacité thermique quotidienne des murs extérieurs

Capacité thermique quotidienne					
χ_j [kJ/(m ² .K)]					
	Calcul matriciel	Calcul matriciel par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
ME2	22.64	22.64	27.84	23.23	2.6%
ME6	14.49	14.49	26.15	15.80	9.1%
ME8	14.8	14.8	15.13	14.84	0.3%

Tableau 41 : Capacité thermique séquentielle des murs extérieurs

Capacité thermique séquentielle					
χ_s [kJ/(m ² .K)]					
	Méthode épaisseur efficace	Méthode épaisseur efficace par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
ME2	21.45	21.45	76.03	27.59	28.6%
ME6	10.43	10.40	73.99	17.55	68.8%
ME8	10.40	10.40	10.40	10.40	0.0%

Les résultats obtenus montrent que la variante ME2 pour laquelle le panneau OSB est placé côté intérieur présente l'inertie quotidienne et séquentielle la plus importante. C'est la variante ME8, avec une couche d'isolant côté intérieur, qui apporte le moins d'inertie. L'application de la méthode par décomposition permet un gain au niveau de la capacité thermique quotidienne qui est maximum pour la variante ME6 (9.1 %). Ce gain est quasi nul pour la variante ME8 (0.3 %). L'écart entre les résultats obtenus par application de la méthode réglementaire et de la méthode par décomposition est plus important pour l'inertie séquentielle. Pour la variante ME6, une augmentation de 68.8 % de la capacité thermique séquentielle est observée lorsque l'ossature est prise en compte. La capacité thermique séquentielle de la variante ME8 est la même quelle que soit la méthode de calcul utilisée puisque la

méthode de l'épaisseur efficace ne considère pas les couches placées derrière la première couche isolante.

3.2. Toiture

Les tableaux suivants présentent les valeurs obtenues pour les capacités thermiques de la toiture.

Tableau 42 : Capacité thermique quotidienne de la toiture

Capacité thermique quotidienne					
χ_j [kJ/(m ² .K)]					
	Calcul matriciel	Calcul matriciel par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
T4	15.33	15.33	37.48	17.32	13.0%

Tableau 43 : Capacité thermique séquentielles de la toiture

Capacité thermique séquentielle					
χ_s [kJ/(m ² .K)]					
	Méthode épaisseur efficace	Méthode épaisseur efficace par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
T4	10.40	10.40	82.30	16.87	62.2%

L'application de la méthode par décomposition permet un gain de 13 % et de 62.2 % respectivement sur les valeurs des capacités thermiques quotidienne et séquentielle. Comme pour les murs extérieurs le gain dû à la prise en compte de l'ossature bois est plus important pour l'inertie séquentielle.

3.3. Planchers bas

Les tableaux suivants présentent les capacités thermiques périodiques des variantes de plancher bas. Pour la variante PB2 la méthode par décomposition n'est pas appliquée car il s'agit d'un plancher bas béton à couches homogènes qui n'est pas composé d'une ossature bois.

Tableau 44 : Capacité thermique quotidienne du plancher bas bois

Capacité thermique quotidienne					
χ_j [kJ/(m ² .K)]					
	Calcul matriciel	Calcul matriciel par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
PB1	35.23	35.23	34.35	35.07	-0.5%

Tableau 45 : Capacité thermique séquentielle du plancher bas bois

Capacité thermique séquentielle					
χ_s [kJ/(m ² .K)]					
	Méthode épaisseur efficace	Méthode épaisseur efficace par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
PB1	43.67	43.67	112.08	56.50	29.4%

Tableau 46 : Capacités thermiques du plancher bas béton

	Capacité thermique quotidienne	Capacité thermique séquentielle
	χ_j [kJ/(m ² .K)]	χ_s [kJ/(m ² .K)]
	Calcul matriciel	Méthode épaisseur efficace
PB2	45.27	441.57

Il peut être observé que la méthode par calcul matriciel définie dans la norme *NF EN ISO 13786* donne une capacité thermique quotidienne plus faible pour la partie « ossature » que pour la partie « isolant ». Vu les propriétés capacitives du matériau bois en comparaison à l'isolant, un tel résultat ne semble pas cohérent. Il s'agit certainement d'une imprécision de la méthode par calcul matriciel. D'ailleurs, pour l'inertie séquentielle c'est bien la capacité thermique de la partie « ossature » qui est la plus importante. Dans le cas de ce plancher bas, la méthode par décomposition ne permet pas de valoriser l'inertie quotidienne apportée par le solivage. Pour l'inertie séquentielle, la prise en compte de cette ossature permet une augmentation de la capacité thermique de 29.4 %. La variante de plancher PB2, grâce à la présence d'une chape béton, présente des capacités thermiques quotidienne et séquentielle plus importantes que celles obtenues pour la variante à solivage bois.

3.4. Mur intérieur

Les tableaux suivants s'intéressent aux capacités thermiques périodiques du mur intérieur. Les valeurs renseignées correspondent à la somme des capacités obtenues pour les deux faces de la paroi. Dans le cas d'une paroi intérieure elles participent toutes deux à l'inertie du bâtiment.

Tableau 47 : Capacité thermique quotidienne du mur intérieur

Capacité thermique quotidienne					
χ_j [kJ/(m ² .K)]					
	Calcul matriciel	Calcul matriciel par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
MI1	35.4	35.4	58.61	38.01	7.4%

Tableau 48 : Capacité thermique séquentielle du mur intérieur

Capacité thermique séquentielle					
χ_s [kJ/(m ² .K)]					
	Méthode épaisseur efficace	Méthode épaisseur efficace par décomposition			Ecart
		Partie "isolant"	Partie "ossature"	Paroi complète	
MI1	42.90	42.90	104.08	49.78	16.0%

La prise en compte de l'ossature par le biais de la méthode par décomposition permet une augmentation de 7.4 % et de 16.0 % respectivement pour les capacités thermiques quotidienne et séquentielle.

3.5. Planchers intermédiaires

Pour les planchers intermédiaires, il est nécessaire de différencier l'inertie apportée par les faces supérieure et inférieure. La première participe à l'inertie du niveau supérieur (plancher bas) et la seconde à celle du niveau inférieur (plancher haut). Pour les variantes retenues, l'isolant est placé en sous face du solivage et l'espace disponible entre les solives est utilisé pour le passage des réseaux. Pour être précis, dans ce cas la paroi est décomposée en une partie « ossature » et une partie « lame d'air ». Les tableaux suivants donnent les capacités thermiques périodiques pour les différentes faces des variantes de plancher intermédiaire.

Tableau 49 : Capacité thermique quotidienne des planchers intermédiaires

	Capacité thermique quotidienne				
	χ_j [kJ/(m ² .K)]				
	Calcul matriciel	Calcul matriciel par décomposition			Ecart
Partie "lame d'air"		Partie "ossature"	Paroi complète		
PI1 face supérieure	35.41	35.41	36.28	35.57	0.5%
PI1 face inférieure	15.02	15.02	13.49	14.73	-1.9%
PI2 face supérieure	55.40	55.4	51.94	54.75	-1.2%
PI2 face inférieure	15.24	15.24	13.39	14.89	-2.3%

Tableau 50 : Capacité thermique séquentielle des planchers intermédiaires

	Capacité thermique séquentielle				
	χ_s [kJ/(m ² .K)]				
	Méthode épaisseur efficace	Méthode épaisseur efficace par décomposition			Ecart
Partie "lame d'air"		Partie "ossature"	Paroi complète		
PI1 face supérieure	43.70	43.70	131.14	60.10	37.5%
PI1 face inférieure	10.40	10.40	10.40	10.40	0.0%
PI2 face supérieure	127.46	127.33	178.5	136.92	7.5%
PI2 face inférieure	10.40	10.40	10.40	10.40	0.0%

L'inertie apportée par la face supérieure est plus importante pour la variante PI2 que pour la PI1. C'est la présence d'une chape béton sur la plancher PI2 qui explique ce résultat. En revanche, les capacités thermiques périodiques pour les faces inférieures sont similaires pour les deux variantes. De la même manière que pour le plancher bas bois, la méthode par calcul matriciel donne une capacité thermique

quotidienne plus faible pour la partie « ossature » que pour la partie « lame d'air » pour la face inférieure de la variante PI1 ainsi que pour les deux faces de la variante PI2. Il n'est donc pas possible de valoriser l'inertie quotidienne apportée par le solivage à partir de la méthode par décomposition. Aussi pour la face supérieure du plancher PI1 l'augmentation de la capacité thermique quotidienne due à la prise en compte du solivage est faible (0.5 %). Pour l'inertie séquentielle, l'application de la méthode par décomposition permet de valoriser l'inertie apportée par le solivage uniquement pour les faces supérieures. La méthode de l'épaisseur efficace considère que les éléments placés au-dessus de la couche d'isolant ne participent pas à l'inertie de la face inférieure. Il est intéressant d'observer que malgré la présence d'une chape béton pour la variante PI2, la prise en compte du solivage permet une augmentation de la capacité thermique séquentielle de la face supérieure de 7.5 %. Cette augmentation est de 37.5 % pour la variante PI1.

3.6. Conclusion

Pour les variantes étudiées, il peut être observé que l'augmentation de la valeur de la capacité thermique due à la prise en compte des montants est plus importante pour l'inertie séquentielle que pour l'inertie quotidienne. Une augmentation maximum de la capacité thermique séquentielle de 68.8 % est obtenue pour la variante de mur extérieur ME6. Pour la capacité thermique quotidienne, une augmentation maximum de 13.0 % est observée pour la toiture.

Dans certains cas (notamment pour les planchers), la méthode par calcul matriciel donne une capacité thermique quotidienne plus faible pour la partie « ossature » que pour la partie « isolant ». Vu les caractéristiques capacitatives du bois au regard de l'isolant ou bien de l'air considérée comme uniquement résistive, un tel résultat ne semble pas cohérent. Il s'agit certainement d'une imprécision de la méthode matricielle. De la sorte, il n'est pas possible de valoriser l'inertie apportée par les ossatures pour ces configurations.

Il est possible d'observer que pour certaines variantes la capacité thermique séquentielle est plus faible que la capacité thermique quotidienne. Or, par définition, l'équation $\chi_s \geq \chi_j$ doit être vérifiée. Ce constat peut s'expliquer par les méthodes qui sont utilisées (calcul matriciel pour χ_j et méthode de l'épaisseur efficace pour χ_s). La méthode de l'épaisseur efficace est une méthode simplifiée qui retient plusieurs hypothèses dont celle que les couches isolantes et celles qui la suivent ne participent pas à l'inertie.

4. GAIN D'INERTIE A L'ECHELLE BATIMENT

Les valeurs des capacités thermiques périodiques (χ_j et χ_s) obtenues précédemment sont utilisées pour calculer les paramètres d'inertie quotidienne (C_m et A_m) et séquentielle (C_{ms}) des différentes configurations de la maison individuelle présentées dans le Tableau 39. Les équations suivantes issues des *Règles Th-I* sont utilisées.

$$C_m = \sum A_i \times \chi_{ji} + 20 \times A_{niv} \text{ [kJ/K]}$$

$$A_m = \left(\sum A_i \times \chi_{ji} \right)^2 / \left(\sum A_i \times \chi_{ji}^2 \right) \text{ [m}^2\text{]}$$

$$C_{ms} = \sum A_i \times \chi_{si} + 20 \times A_{niv} \text{ [kJ/K]}$$

Où :

A_i [m^2] est la surface de la paroi i

χ_{ji} [$kJ/(K \cdot m^2)$] et χ_{si} [$kJ/(K \cdot m^2)$] sont respectivement les capacités thermiques quotidienne et séquentielle de la paroi i

A_{niv} [m^2] est la surface utile du niveau du bâtiment considéré

Dans les *Règles Th-I*, il est spécifié que les valeurs calculées des paramètres C_m , A_m et C_{ms} à partir des équations précédentes ne doivent pas être fournies telles quelles au moteur de calcul RT. Elles sont utilisées pour définir des classes d'inertie quotidienne et séquentielle qui à leur tour permettent d'obtenir des valeurs pour les paramètres C_m , A_m et C_{ms} qui sont utilisées par le moteur de calcul. Dans la pratique et notamment lorsque le logiciel Pléiades+Comfie est utilisé, ce sont les valeurs des paramètres d'inertie calculées qui sont directement utilisées. Il se pose alors une question qui n'a pas lieu d'être lorsque la méthode réglementaire est suivie. Il est spécifié dans les *Règles Th-I* que c'est le niveau le plus défavorisé du point de vue de l'inertie quotidienne qui est retenu pour la détermination de l'ensemble des paramètres d'inertie. Lorsque les classes d'inertie sont utilisées, les valeurs des paramètres C_m , A_m et C_{ms} vont dépendre uniquement de la surface du bâtiment et de la classe d'inertie quotidienne la plus basse obtenue. Lorsque les classes d'inertie ne sont pas utilisées, comment déterminer lequel des niveaux est le plus défavorisé du point de vue de l'inertie quotidienne sachant que celle-ci est caractérisée par deux paramètres qui peuvent être ramenés à la surface du niveau C_m/A_{niv} et A_m/A_{niv} ? Lorsque l'un des niveaux présente le couple de valeurs le plus faible alors il s'agit du niveau le plus défavorisé. Lorsqu'une telle situation ne se présente pas, il est proposé de retenir le niveau qui présente la valeur $\sqrt{(C_m/A_{niv})^2 + (A_m/A_{niv})^2}$ la plus faible comme étant le niveau le plus défavorisé d'un point de vue de l'inertie quotidienne. Par définition, la valeur du paramètre C_{ms} devrait être au moins égale à celle du paramètre C_m . Dans le cas où cela n'est pas vérifié pour le niveau le plus défavorisé la valeur $C_{ms} = C_m$ est retenue.

La comparaison des valeurs obtenues pour les paramètres C_m , A_m et C_{ms} avec et sans prise en compte des ossatures permet d'évaluer le gain d'inertie à l'échelle du bâtiment. Lorsque les éléments d'ossature bois sont considérés, il est également admis dans le cas où $\chi_s < \chi_j$ que $\chi_s = \chi_j$ puisque par définition la capacité thermique séquentielle est au moins égale à la capacité thermique quotidienne. Cette opération a pour effet une meilleure valorisation de l'inertie du bâtiment. Le tableau en pages suivantes présente les résultats obtenus.

Tableau 51 : Impact de la prise en compte des ossatures bois à l'échelle bâtiment

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Niveau défavorable	Inertie quotidienne					Inertie séquentielle			Ecart		
					Cm [kJ/K]	Cm/Aniv [kJ/(m².K)]	Am [m²]	Am/Aniv [m²/m²]	Classe d'inertie	Cms [kJ/K]	Cms/Aniv [kJ/(m².K)]	Classe d'inertie	Cm/Aniv	Am/Aniv	Cms/Aniv
1	1	NF	1	1	8209	112	234	3.2	Légère	8665	119	Très légère	3.53%	1.40%	25.01%
		Décomposition	1	1	8499	116	238	3.2	Légère	10832	148	Très légère			
2		NF	1	1	8943	122	221	3.0	Légère	37751	516	Moyenne	3.24%	2.20%	3.26%
		Décomposition	1	1	9233	126	226	3.1	Légère	38980	533	Moyenne			
3		NF	1	1	7600	104	219	3.0	Très légère	7839	107	Très légère	4.53%	2.52%	28.61
		Décomposition	1	1	7944	109	225	3.1	Très légère	10081	138	Très légère			
4		NF	1	1	8334	114	205	2.8	Légère	36928	505	Moyenne	4.13%	3.50%	3.53%
		Décomposition	1	1	8678	119	212	2.9	Légère	38230	523	Moyenne			
5		NF	1	1	7623	104	220	3.0	Très légère	7839	107	Très légère	3.26%	1.08%	26.02%
		Décomposition	1	1	7872	108	223	3.0	Très légère	9878	135	Très légère			
6		NF	1	1	8357	114	205	2.8	Légère	36925	505	Moyenne	2.98%	1.97%	2.98%
		Décomposition	1	1	8606	118	209	2.9	Légère	38027	520	Moyenne			
7	2	NF	1	1	8186	112	234	3.2	Légère	8665	119	Très légère	1.76%	-0.48%	23.07%
		Décomposition	1	1	8330	114	232	3.2	Légère	10663	146	Très légère			
8		NF	1	1	8203	112	234	3.2	Légère	8665	119	Très légère	1.75%	-0.48%	23.25%
		Décomposition	1	1	8347	114	233	3.2	Légère	10679	146	Très légère			
9		NF	1	2	4741	113	142	3.4	Légère	4879	116	Très légère	3.22%	1.57%	29.38%
		Décomposition	1	2	4893	116	144	3.4	Légère	6313	150	Très légère			

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Niveau défavorable	Inertie quotidienne					Inertie séquentielle			Ecart		
					Cm [kJ/K]	Cm/Aniv [kJ/(m².K)]	Am [m²]	Am/Aniv [m²/m²]	Classe d'inertie	Cms [kJ/K]	Cms/Aniv [kJ/(m².K)]	Classe d'inertie	Cm/Aniv	Am/Aniv	Cms/Aniv
10		NF	1	1	8936	122	221	3.0	Légère	37751	516	Moyenne	1.61%	0.18%	2.85%
			2												
		Décomposition	1	1	9080	124	221	3.0	Légère	38828	531	Moyenne			
			2												
11		NF	1	2	4228	100	130	3.1	Très légère	4228	100	Très légère	4.69%	3.17%	34.37%
			2												
		Décomposition	1	2	4426	105	135	3.2	Très légère	5681	135	Très légère			
			2												
12	2	NF	1	1	7593	104	219	3.0	Très légère	7839	107	Très légère	2.61%	0.52%	26.67%
			2												
		Décomposition	1	1	7792	107	220	3.0	Très légère	9929	136	Très légère			
			2												
13		NF	1	2	4228	100	130	3.1	Très légère	4228	100	Très légère	4.69%	3.17%	34.37%
			2												
		Décomposition	1	2	4426	105	135	3.2	Très légère	5681	135	Très légère			
			2												
14		NF	1	1	8327	114	204	2.8	Légère	36925	505	Moyenne	2.38%	1.32%	3.12%
			2												
		Décomposition	1	1	8525	117	207	2.8	Légère	38078	521	Moyenne			
			2												

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Niveau défavorable	Inertie quotidienne					Inertie séquentielle			Ecart		
					Cm [kJ/K]	Cm/Aniv [kJ/(m².K)]	Am [m²]	Am/Aniv [m²/m²]	Classe d'inertie	Cms [kJ/K]	Cms/Aniv [kJ/(m².K)]	Classe d'inertie	Cm/Aniv	Am/Aniv	Cms/Aniv
15	2	NF	1	2	4247	101	131	3.1	Très légère	4247	101	Très légère	2.78%	1.18%	29.73%
		Décomposition	2	2	4365	104	133	3.2	Très légère	5510	131	Très légère			
16		NF	1	1	7616	104	220	3.0	Très légère	7839	107	Très légère	1.35%	-0.91%	24.08%
		Décomposition	2	1	7719	106	218	3.0	Très légère	9726	133	Très légère			
17		NF	1	2	4247	101	131	3.1	Très légère	4247	101	Très légère	2.78%	1.18%	29.73%
		Décomposition	2	2	4365	104	133	3.2	Très légère	5510	131	Très légère			
18		NF	1	1	8350	114	205	2.8	Légère	36925	505	Moyenne	1.23%	-0.20%	2.57%
		Décomposition	2	1	8453	116	205	2.8	Légère	37875	518	Moyenne			

Il peut être observé dans le tableau précédent que les paramètres d'inertie quotidienne C_m et A_m ne sont que peu impactés par la prise en compte des éléments d'ossature. Une augmentation maximale de 4.69 % est obtenue pour le paramètre C_m/A_{niv} et de 3.50 % pour le paramètre A_m/A_{niv} . Si les classes d'inertie sont définies, celles-ci sont identiques que l'ossature soit ou non prise en compte. Toutefois, l'application de la méthode par décomposition a un impact plus important sur l'inertie séquentielle. Elle permet une augmentation maximale de 34.37 % du paramètre C_{ms}/A_{niv} .

5. IMPACT SUR BBIO ET TIC

Les valeurs des paramètres d'inertie C_m , A_m et C_{ms} précédemment obtenus sont utilisés pour mener une étude RT 2012 sur les différentes configurations. Les indicateurs réglementaires B_{bio} et Tic sont calculés et leur comparaison permet d'évaluer l'impact de la prise en compte de l'inertie apportée par les ossatures bois.

Le B_{bio} est exprimé en nombre de points. Il apporte une indication sur l'impact que peut avoir la conception bioclimatique du bâtiment sur sa performance énergétique. Il est calculé à partir de l'équation suivante.

$$B_{bio} = 2 \times (B_{chauffage} + B_{refroidissement}) + 5 \times B_{éclairage} [pts]$$

Où $B_{chauffage} [pts]$ est le besoin en chauffage

$B_{refroidissement} [pts]$ est le besoin en refroidissement

$B_{éclairage} [pts]$ est le besoin en éclairage

Le niveau d'inertie du bâtiment impacte la composante $B_{chauffage}$. Il est spécifié dans la *Méthode de calcul Th-BCE 2012* que le B_{bio} s'appuie entre autres sur la valorisation des caractéristiques d'inertie du bâti. Afin de respecter les exigences de la RT 2012 le B_{bio} doit rester inférieur à une valeur maximale $B_{bio_{max}}$.

La $Tic [^{\circ}C]$ est définie comme étant la température intérieure conventionnelle. Cet indicateur permet de qualifier le confort estival du bâtiment. Il s'agit de la température opérative la plus élevée atteinte dans les locaux lors de la journée la plus froide parmi les cinq plus chaudes de l'année pour un site donné. Le modèle retenu pour le calcul de cette température fait appel au niveau d'inertie du bâtiment. La RT 2012 impose l'obtention d'une Tic inférieure à une valeur de référence $Tic_{réf}$.

Le tableau en pages suivantes présente les résultats obtenus pour les différentes configurations suivant si les éléments d'ossature sont ou non pris en compte.

Tableau 52 : Impact sur les indicateurs réglementaires de la prise en compte des éléments d'ossature

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Bbio	Bbiomax	Ecart	Tic	Ticréf	Ecart
			défavorable			Bbio	[°C]	[°C]	Tic [°C]
1	1	NF	1	45.9	50.9	-0.3	34.2	34.4	-0.1
		Décomposition	1	45.6	50.9		34.1		
2		NF	1	46.8	50.9	-0.4	33.8	34.4	-0.1
		Décomposition	1	46.4	50.9		33.7		
3		NF	1	42.8	50.8	-0.5	34.5	34.4	-0.2
		Décomposition	1	42.3	50.8		34.3		
4		NF	1	44.6	50.8	-0.4	34	34.4	-0.1
		Décomposition	1	44.2	50.8		33.9		
5		NF	1	40.9	50.7	-0.3	34.4	34.4	-0.1
		Décomposition	1	40.6	50.7		34.3		
6		NF	1	38.9	50.7	-0.2	34	34.4	-0.1
		Décomposition	1	38.7	50.7		33.9		
7	2	NF	1	37.1	42	-0.1	33.8	33.8	0
		Décomposition	1	37	42		33.8		

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Bbio	Bbiomax	Ecart	Tic	Ticréf	Ecart
			défavorable			Bbio	[°C]	[°C]	Tic [°C]
8	2	NF	1	37.1	42	-0.1	33.8	33.8	0
		Décomposition	1	37	42		33.8	33.8	
9		NF	2	37.9	42	-0.1	33.8	33.8	-0.1
		Décomposition	2	37.8	42		33.7	33.8	
10		NF	1	37.5	42	-0.1	33.5	33.8	-0.1
		Décomposition	1	37.4	42		33.4	33.8	

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Bbio	Bbiomax	Ecart	Tic	Ticréf	Ecart
			défavorable			Bbio	[°C]	[°C]	Tic [°C]
11	2	NF	2	34.4	42	0	34.2	33.8	-0.2
		Décomposition	2	34.4	42		34	33.8	
12		NF	1	34.3	42	-0.1	34.1	33.8	-0.1
		Décomposition	1	34.2	42		34	33.8	
13		NF	2	35.7	42	-0.3	34.2	33.8	-0.2
		Décomposition	2	35.4	42		34	33.8	

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Bbio	Bbiomax	Ecart	Tic	Ticréf	Ecart
			défavorable			Bbio	[°C]	[°C]	Tic [°C]
14	2	NF	1	34.9	42	0	33.7	33.8	-0.1
		Décomposition	1	34.9	42		33.6	33.8	
15		NF	2	32.4	42	-0.2	34.1	33.8	-0.1
		Décomposition	2	32.2	42		34	33.8	
16		NF	1	32.1	42	-0.1	34	33.8	0
		Décomposition	1	32	42		34	33.8	

N° Config	Nombre de niveaux	Valeurs considérées	Niveau	Bbio	Bbiomax	Ecart	Tic	Ticréf	Ecart
			défavorable			Bbio	[°C]	[°C]	Tic [°C]
17	2	NF	2	32	42	-0.2	34.1	33.8	-0.1
		Décomposition	2	31.8	42		34	33.8	
18		NF	1	31.3	42	-0.1	33.7	33.8	-0.1
		Décomposition	1	31.2	42		33.6	33.8	

Les résultats présentés dans le Tableau 52 montrent que l'exigence sur la valeur de $Bbio$ est dans tous les cas respectée. Aussi pour la majorité des configurations, la prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature bois permet un abaissement du $Bbio$ qui peut atteindre les 0.5 points. Cet abaissement maximum est observé pour une maison sur 1 niveau avec un plancher bas léger et des murs extérieurs avec complément d'isolant extérieur (configuration 3). La prise en compte de l'inertie apportée par les ossatures n'impacte pas de manière significative les valeurs du $Bbio$ obtenues pour les différentes configurations étudiées. Toutefois dans certains cas, l'abaissement induit pourrait amener au respect de l'exigence $Bbio \leq Bbio_{max}$.

Le respect de l'exigence sur la Tic n'est pas observé pour toutes les configurations étudiées. Aussi certaines satisfont tout juste l'exigence avec $Tic = Tic_{réf}$. Au maximum, la Tic est supérieur de 0.4 °C à la valeur de référence $Tic_{réf}$. Les configurations qui ne respectent pas l'exigence portant sur le confort estival sont composées d'au moins un plancher léger (plancher bas ou intermédiaire) et le niveau défavorable vis-à-vis de l'inertie est celui pour lequel le plancher est léger (plancher bas à solivage bois ou plancher intermédiaire à solivage bois sans chape béton). La prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature bois permet dans la majorité des cas un abaissement de la température intérieure conventionnelle. Celui-ci peut atteindre les 0.2 °C. Il s'agit d'un écart assez faible mais qui permet pour la configuration 3 le respect de l'exigence $Tic \leq Tic_{réf}$. Sans la prise en compte de l'inertie apportée par les ossatures bois, cette configuration ne satisfait pas l'exigence sur le confort estival. Pour cette configuration sur 1 niveau composée d'un plancher bas léger et de murs extérieurs avec complément d'isolant extérieur, un calcul RT 2012 a également été mené en considérant seulement l'inertie apportée par les montants bois des murs extérieurs. Les résultats montrent que l'abaissement de la Tic n'est plus que de 0.1 °C mais permet tout de même de satisfaire l'exigence relative au confort estival.

La prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature bois impacte les indicateurs réglementaires $Bbio$ et Tic . Celle-ci favorise dans la majorité des cas le respect des exigences de la RT 2012. Toutefois, les écarts observés restent assez faibles.

6. CONCLUSION

Les méthodes proposées pour la prise en compte des éléments d'ossature des parois bois sont utilisées pour définir les capacités thermiques quotidienne χ_j et séquentielle χ_s de différentes compositions. C'est essentiellement pour l'inertie séquentielle que la prise en compte des ossatures est intéressante. Le gain sur la capacité thermique séquentielle est plus important que celui obtenu pour la capacité thermique quotidienne. Dans certains cas, les hypothèses retenues pour l'application de la méthode de l'épaisseur efficace (méthode simplifiée décrite dans la norme *NF EN ISO 13786* et utilisée pour le calcul de la capacité thermique séquentielle) aboutissent à l'obtention d'un niveau d'inertie séquentielle inférieur à celui obtenu pour l'inertie quotidienne. Par définition de tels résultats ne semblent pas cohérents et il est dans ce cas proposé de retenir la valeur $\chi_s = \chi_j$.

Les compositions de parois pour lesquelles les capacités thermiques périodiques χ_j et χ_s ont été calculées servent à la définition de différentes variantes d'une maison individuelle. Pour celles-ci, en fonction des résultats obtenus à l'échelle de la paroi, les paramètres d'inertie C_m , A_m et C_{ms} sont calculés. Il est alors possible d'évaluer l'impact de la prise en compte des ossatures sur l'inertie du bâtiment. Comme à l'échelle de la paroi, cette prise en compte accroît principalement le niveau d'inertie séquentielle défini par le paramètre C_{ms} .

Un calcul RT 2012 est mené pour chaque configuration de la maison individuelle en considérant les paramètres d'inertie obtenus avec et sans prise en compte des montants d'ossature. Les indicateurs *Bbio* et *Tic* sont calculés. La comparaison des résultats permet d'évaluer l'impact sur ces indicateurs de l'inertie apportée par les ossatures. Les observations faites sur les différentes configurations montrent que cette inertie supplémentaire permet dans la majorité des cas un abaissement des valeurs du *Bbio* et de la *Tic*. Toutefois, celui-ci reste assez faible (0.2 °C au maximum pour la *Tic* et 0.5 points pour le *Bbio*). Pour l'une des configurations, l'abaissement de la température intérieur conventionnelle permet tout de même d'aboutir au respect de l'exigence sur le confort estival (celui-ci n'étant pas satisfait lorsque l'inertie des ossatures n'est pas prise en compte).

CONCLUSION

Dans la première partie de ce chapitre, deux méthodes complémentaires sont proposées pour la prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature des parois bois. Leur justesse est également vérifiée. L'une concerne l'inertie quotidienne (période de 24 heures) et l'autre l'inertie séquentielle (période de 12 jours). Elles peuvent toutes deux être considérées comme des méthodes par décomposition. Il s'agit alors de décomposer la paroi à couches hétérogènes en parois à couches homogènes. Une paroi à ossature bois sera alors décomposée en une partie « ossature » et une partie « isolant ». Pour le calcul de la capacité thermique quotidienne χ_j , la méthode par calcul matriciel définie dans la norme *NF EN ISO 13786* est utilisée pour définir la capacité thermique de chaque partie. La capacité thermique quotidienne de la paroi complète est alors prise égale à la somme des capacités de chaque partie pondérées au prorata de leur présence dans la paroi complète. Pour le calcul de la capacité thermique séquentielle χ_s , la méthode de l'épaisseur efficace définie dans l'annexe A de la norme *NF EN ISO 13786* est utilisée pour définir la capacité thermique de chaque partie. Pour la partie « ossature » une valeur de l'épaisseur efficace maximale différente de celle renseignée dans les *Règles Th-I* est retenue pour s'accorder aux spécificités du matériau bois. La capacité thermique séquentielle de la paroi complète est prise égale à la somme des capacités de chaque partie pondérées au prorata de leur présence au sein de la paroi complète. Les capacités thermiques (quotidienne et séquentielle) des parois d'un bâtiment sont utilisées pour définir ses paramètres d'inertie C_m , A_m et C_{ms} qui sont des données d'entrée d'un calcul RT 2012.

La partie 2 de ce chapitre s'attache à évaluer l'impact de la prise en compte des éléments d'ossature sur les indicateurs réglementaires *Bbio* et *Tic*. Différentes variantes d'une maison individuelles sont étudiées. L'impact à l'échelle de la paroi de l'inertie apportée par les ossatures est dans un premier temps observé. La prise en compte de cette inertie supplémentaire favorise essentiellement la capacité thermique séquentielle. Les observations faites montrent également que les hypothèses retenues pour l'application de la méthode de l'épaisseur efficace aboutissent à des valeurs de la capacité thermique séquentielle inférieures à celles obtenues pour la capacité thermique quotidienne $\chi_s < \chi_j$. Par définition de tels résultats ne sont pas envisageables et il est proposé dans ce cas de retenir la valeur $\chi_s = \chi_j$. A l'échelle du bâtiment, l'impact de la prise en compte des ossatures bois est évalué au travers des paramètres C_m , A_m et C_{ms} . Ceux-ci sont calculés pour les différentes configurations de la maison individuelle. Il apparaît à cette échelle aussi que l'inertie apportée par les éléments bois favorise l'inertie séquentielle (paramètre C_{ms}). En ce qui concerne les indicateurs réglementaires *Bbio* et *Tic*, l'inertie apportée par les ossatures n'impacte que peu les valeurs obtenues. Toutefois, comme c'est le cas pour l'une des configurations étudiées, cela peut suffire pour qu'un bâtiment satisfasse une exigence non respectée sans la prise en compte de cette inertie supplémentaire (exigence sur le confort estival $Tic \leq Tic_{réf}$ dans le cas de la configuration étudiée). Aussi les résultats obtenus dans cette tâche sont à replacer dans le contexte du projet. L'impact de la prise en compte de l'inertie apportée par les éléments d'ossature bois viendra compléter les conclusions obtenues sur les autres tâches du projet THERMIQUE ETE BOIS.

REFERENCES

Livrable Projet THERMIQUE ETE BOIS – Phase 1 : Rapport final

AFNOR ; NF EN ISO 13786 : Performance thermique des composants de bâtiment – Caractéristiques thermiques dynamiques – Méthodes de calcul ; 2008

CSTB ; RT 2012 – Règles Th-I : Caractérisation de l’inertie thermique des bâtiments ; 2012

CSTB ; Méthode de calcul Th-BCE 2012 : Annexe à l’arrêté portant approbation de la méthode de calcul Th-BCE 2012 ; 2012

FCBA ; Site internet Catalogue Construction Bois : www.catalogue-construction-bois.fr