

THERMIQUE ETE BOIS

Sous tâche 2.3 : Lame d'air ventilée

Rédaction : Thomas Garnesson

Date : 07/03/2017

Version : Finale

CONTENU

Illustrations.....	3
Tableaux.....	5
Graphiques.....	7
Introduction generale.....	8
Chapitre 1 : Travail préparatoire.....	9
Introduction.....	9
Partie 1 : Considérations pratiques.....	10
1. Introduction.....	10
2. Documents de référence.....	10
3. Paramètres identifiés et recommandations.....	11
4. Synthèse.....	17
Partie 2 : Considérations RT 2012.....	19
1. Introduction.....	19
2. Description d'un bardage avec lame d'air.....	19
3. Synthèse.....	24
Partie 3 : Considérations physiques.....	26
1. Introduction.....	26
2. Modèle Physique.....	26
3. Données d'entrée et accessibilité.....	27
4. Synthèse.....	27
Partie 4 : Synthèse sur les perspectives d'évolution.....	28
Chapitre 2 : Application du modèle physique.....	29
Introduction.....	29
Partie 1 : Description du modèle.....	30
1. Echanges de chaleur.....	30
2. Type de modélisation.....	31

3. Données d'entrée du modèle.....	43
4. Calcul du facteur solaire.....	46
Partie 2 : Analyse du modèle.....	49
1. Caractère intrinsèque du facteur solaire.....	49
2. Comparaison aux Règles Th-S.....	55
Partie 3 : Choix des paramètres de caractérisation	58
1. paramètres et plages de variation	58
2. Analyse de sensibilité	63
3. Synthèse	68
Partie 4 : Calcul des coefficients correctifs sur facteur solaire	71
Partie 5 : Impact sur les indicateurs réglementaires.....	75
1. Cas d'étude.....	75
2. Impact à l'échelle de la paroi.....	81
3. Impact sur les indicateurs réglementaires	88
Synthèse	92
Références.....	94

ILLUSTRATIONS

Illustration 1 : Principe d'un bardage avec lame d'air ventilée.....	11
Illustration 2 : Eléments supports de bardage verticaux, NF DTU 41.2 P1-1	12
Illustration 3 : Eléments support de bardage avec contre lattage, NF DTU 41.2 P1-1.....	13
Illustration 4 : Bardage bois à claire-voie posé sur mur à ossature bois, NF DTU 41.2 P1-1	14
Illustration 5 : Bardage en métal déployé, archiexpo.fr.....	15
Illustration 6 : Exemple de profils courants de lames pour bardages bois, NF DTU 41.2 P1.1	15
Illustration 7 : Lame de bardage en PVC comportant des cavités internes, buisson-pvc.com	16
Illustration 8 : Mise en place d'une bavette en acier entre deux niveaux, IT 249	17
Illustration 9 : Simplification pour le calcul de la résistance thermique d'une paroi munie d'un bardage avec lame d'air ventilée, Règles Th-U fascicule 4.....	20
Illustration 10 : Notion de facteur de transmission solaire, Règles Th-S	22
Illustration 11 : Représentation d'une paroi opaque verticale à lame d'air extérieure ventilée, Règles Th-S.....	23
Illustration 12 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO, Antoine Dugué	31
Illustration 13 : Modélisation d'une couche solide	32
Illustration 14 : Modélisation des transferts au niveau de la face externe.....	32
Illustration 15 : Représentation des échanges au niveau de la lame d'air.....	33
Illustration 16 : Modélisation des transferts au niveau de la face interne	33
Illustration 17 : Pertes de charge singulières en partie basse de la lame d'air ventilée	35
Illustration 18 : Perte de charge singulière au niveau du contre-lattage de la lame d'air ventilée.....	37
Illustration 19 : Perte de charge singulière au niveau de la bavette en partie haute de la cavité d'air	38
Illustration 20 : Types de bavette étudiés par J. Falk et K. Sandin	39
Illustration 21 : Modélisation d'un bardage ajouré à lames horizontales	40
Illustration 22 : Modélisation d'un bardage ajouré à lames verticales.....	42
Illustration 23 : Cas d'étude « maison individuelle », catalogue-construction-bois.fr	76
Illustration 24 : Caractéristiques de la porte d'entrée, Pléiades.....	77
Illustration 25 : Caractéristiques de la porte donnant sur le garage, Pléiades	77

Illustration 26 : Caractéristiques des portes-fenêtres, Pléiades	77
Illustration 27 : Caractéristiques des fenêtres, Pléiades	77

TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres « pratiques » du bardage et plages de variation courantes	18
Tableau 2 : Propriétés de différents bois, Règles Th-U fascicule 2	21
Tableau 3 : Valeurs tabulées du coefficient de correction <i>Kcorr1a</i> , Règles Th-S.....	23
Tableau 4 : Valeur par défaut de <i>ak</i> , Règles Th-S	24
Tableau 5 : Paramètres « RT 2012 » du bardage et plages de variation courantes.....	25
Tableau 6 : Détermination des paramètres pour le calcul du coefficient de perte de charge singulière pour la grille anti-rongeur, Mémento des pertes de charge.....	37
Tableau 7 : Paramètres géométriques du système.....	44
Tableau 8 : Propriétés radiatives des surfaces du bardage et de la face externe du mur support	45
Tableau 9 : Configurations retenues pour l'étude du caractère intrinsèque du coefficient correctif ..	49
Tableau 10 : Propriétés retenues pour le bois résineux massif	50
Tableau 11 : Propriétés retenues pour le béton	50
Tableau 12 : Propriétés retenues pour l'isolant.....	51
Tableau 13 : Constitution des fichiers météo pour l'étude de la sensibilité du facteur solaire aux sollicitations extérieures	52
Tableau 14 : Configurations de paroi pour l'étude de la sensibilité du facteur solaire du bardage	53
Tableau 15 : Coefficients de correction sur facteur solaire, Règles Th-S.....	55
Tableau 16 : Valeurs retenues pour les paramètres propres au modèle dans le cadre de la comparaison aux Règles Th-S.....	55
Tableau 17 : Comparaison des facteurs solaires fournis par les Règles Th-S (en bleu) à ceux obtenus à partir du modèle (en vert).....	57
Tableau 18 : Caractéristiques de différents types de bois données par les Règles Th-U 2/5	58
Tableau 19 : Propriétés pour les différentes catégories de bois.....	60
Tableau 20 : Plages de variation retenues pour les paramètres géométriques	62
Tableau 21 : Propriétés radiatives du bardage	62
Tableau 22 : Résultats des analyses de sensibilité	65
Tableau 23 : Valeurs des paramètres du bardage pour le calcul des coefficients correctifs sur facteur solaire	70

Tableau 24 : Valeurs des coefficients correctifs sur facteur solaire pour un bardage bois de catégorie 1	72
Tableau 25 : Valeurs des coefficients correctifs sur facteur solaire pour un bardage bois de catégorie 2	72
Tableau 26 : Valeurs des coefficients correctifs sur facteur solaire pour un bardage bois de catégorie 3	73
Tableau 27 : Comparaison entre Règles Th-S et modèle physique.....	74
Tableau 28 : Composition des murs extérieurs.....	78
Tableau 29 : Composition de la toiture	78
Tableau 30 : Composition du plancher bas	79
Tableau 31 : Composition des murs intérieurs	79
Tableau 32 : Composition du plancher intermédiaire.....	79
Tableau 33 : Composition des murs extérieurs avec enduit	80
Tableau 34 : Configurations de bardage étudiées	81
Tableau 35 : Coefficients pour la prise en compte du bardage	83
Tableau 36 : Valeurs du coefficient $\alpha K_{corr, la}$ avec interpolation linéaire.....	84
Tableau 37 : Impact de l'utilisation d'une interpolation sur les coefficients pour la prise en compte du bardage.....	85
Tableau 38 : Facteurs solaire de paroi pour les différentes configurations de bardage.....	87
Tableau 39 : Impact sur les indicateurs réglementaires	89
Tableau 40 : Propriétés d'un bois de catégorie 1.....	90
Tableau 41 : Coefficients de correction, Règles Th-S	92
Tableau 42 : Valeurs des coefficients correctifs pour un bardage bois	93

GRAPHIQUES

Graphique 1 : Evolution du coefficient de transmission pour un bardage ajouré à lames horizontales	41
Graphique 2 : Evolution du coefficient de transmission pour un bardage ajouré à lames verticales ..	43
Graphique 3 : Sensibilité du facteur solaire du bardage à la température de consigne.....	51
Graphique 4 : Sensibilité du facteur solaire du bardage au fichier météo	53
Graphique 5 : Sensibilité du facteur solaire du bardage à la composition du mur support	54
Graphique 6 : Influence du type de bois sur le facteur solaire	59
Graphique 7 : Facteurs solaires pour les bois de la catégorie 1.....	60
Graphique 8 : Facteurs solaires pour les bois de la catégorie 2.....	60
Graphique 9 : Facteurs solaires pour les bois de la catégorie 3.....	61

INTRODUCTION GENERALE

Le projet THERMIQUE ETE BOIS propose par le biais de la tâche 2 des méthodes pour une évolution du moteur de calcul RT 2012. L'objectif est d'intégrer la prise en compte des spécificités du comportement des constructions bois en période estivale. La sous tâche 2.3 porte plus particulièrement sur les bardages à lame d'air ventilée. Pour tenir compte de ce type de revêtement, les Règles Th-S de la RT 2012 proposent le calcul d'un coefficient de correction sur facteur solaire. Celui-ci dépend alors de quelques paramètres liés à la géométrie du bardage et de sa couleur. L'objectif de la sous-tâche 2.3 est alors de définir une méthode permettant de prendre en compte plus finement l'impact du bardage sur le facteur solaire de la paroi bois. Le but étant d'améliorer la définition du comportement estival du bâtiment.

Ce document comporte deux chapitres. Le premier s'attache à relever les différents paramètres et les valeurs couramment rencontrées qui permettent la description d'un bardage avec lame d'air ventilée. Cette analyse porte plus particulièrement sur les pratiques de mise en œuvre, la réglementation thermique ainsi que sur une modélisation physique des phénomènes de transfert de chaleur au sein d'un tel système de paroi. L'objectif est d'évaluer l'accessibilité des paramètres et leur plage de variation afin de guider la définition de coefficients correctifs sur facteur solaire pour différentes configurations de bardage. Le second chapitre porte sur l'application d'un modèle physique dans le but de calculer une série de coefficients correctifs sur facteur solaire. Le modèle physique est décrit et étudié de manière à valider son aptitude à répondre aux objectifs de l'étude. Le recours à l'analyse de sensibilité permet de réduire le nombre de configurations de bardage à caractériser en identifiant les paramètres ayant le plus d'influence sur le facteur solaire de la paroi. Les valeurs des coefficients correctifs sur facteur solaire calculées sont présentées. Une comparaison est finalement réalisée sur les valeurs des indicateurs réglementaires entre l'utilisation des coefficients proposés dans les Règles Th-S et ceux calculés dans le cadre de cette étude.

CHAPITRE 1 : TRAVAIL PREPARATOIRE

INTRODUCTION

Le travail préparatoire présenté dans ce premier chapitre a pour objectif de relever les différents paramètres qui permettent la description d'un bardage à lame d'air ventilée. Ceux-ci sont liés aux pratiques de mise en œuvre, à la réglementation thermique ou encore aux phénomènes physiques qui régissent le comportement d'un tel système. Des plages de variations sont alors associées à ces différents paramètres. Les conclusions de ce travail serviront de base à l'identification des paramètres à prendre en compte pour une évolution de la méthode réglementaire. Ce chapitre présente les différents paramètres « pratiques », « RT 2012 » et « physiques » relevés. Une synthèse sur les perspectives d'évolution de la méthode réglementaire de prise en compte des bardages à lame d'air ventilée conclue ce premier chapitre.

1. INTRODUCTION

Les règles de l'art et de mise en œuvre qui concernent les bardages sont analysés afin de mettre en évidence les paramètres « pratiques » qui décrivent ce type de revêtement. Il s'agit des paramètres pris en compte lors de la réalisation d'un bardage avec lame d'air ventilée et sont donc facilement accessibles au concepteur. Plusieurs exigences réglementaires et normatives portent sur ces paramètres.

Les documents pris en compte pour la définition de ces paramètres « pratiques » sont tout d'abord présentés. Ensuite, les différents paramètres et les plages de variation associées sont donnés. Une synthèse des observations faites conclue cette première partie.

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

De nombreux documents traitent de la réalisation des ouvrages de bardage avec lame d'air ventilée. Ceux-ci peuvent être des documents normatifs, réglementaires ou de simples recommandations. Il ne s'agit pas ici de passer en revue l'ensemble du corpus traitant ce sujet mais d'analyser les principaux documents afin de relever les pratiques de mise œuvre et les paramètres qui entrent en jeu.

Les documents analysés sont listés ci-dessous et brièvement décrit :

- NF DTU 31.2 : Travaux de bâtiment – Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois

Ce document donne des spécifications quant à la mise en œuvre des constructions à ossature bois. Le chapitre 13 de la partie 1-1 de ce DTU porte notamment sur les ouvrages de revêtement extérieur

- NF DTU 41.2 : Travaux de bâtiment – Revêtements extérieurs en bois

Ce DTU précise les spécifications relatives à la mise en œuvre des revêtements extérieurs en bois. La ventilation de la lame d'air, les bardages à claire-voie ainsi que les dimensions des éléments sont quelques-uns des points abordés dans ce document.

- Instruction technique n°249 relative aux façades

Cette instruction technique traite de la propagation des incendies au niveau des façades. Des règles de conception y sont données.

- Cahier du CSTB n°3316 V2 : GS2 – Ossature bois et isolation thermique des bardages rapportés faisant l'objet d'un avis technique ou d'un constat de traditionnalité

Ce document donne les exigences attendues notamment pour les bardages rapportés sur ossature bois. Les dimensions de la lame d'air ainsi que son compartimentage sont des points abordés.

- Guide RAGE : Bardages en acier protégé et en acier inoxydable

Il s'agit dans ce document de donner des recommandations quant à la conception et la mise en œuvre des bardages en acier protégé et en acier inoxydable.

- Guide RAGE : Mise en œuvre des procédés de bardage rapporté à lame d'air ventilée

Ce guide porte sur l'isolation thermique extérieure et plus particulièrement sur la mise en œuvre des procédés de bardage rapporté à lame d'air ventilée. Malgré que le domaine d'application de ce document soit limité à des parois supports en béton ou constituées de maçonnerie de petits éléments, son étude permet de relever des pratiques sensiblement similaires à ce qui peut s'observer en construction bois.

3. PARAMETRES IDENTIFIES ET RECOMMANDATIONS

L'étude des documents précédents permet d'identifier les paramètres relatifs à la conception et à la mise en œuvre des complexes de bardage munis d'une lame d'air ventilée. Ces paramètres sont listés en suivant et les plages de valeurs admissibles ou couramment retenues sont précisées.

De manière générale, un complexe de bardage avec lame d'air ventilée est fixé sur une paroi support qui peut être réalisée en béton, en maçonnerie ou encore en ossature bois ou métallique. Ce complexe se compose d'éléments de support qui aménagent une lame d'air entre la paroi et la couche de revêtement extérieur. Les éléments de support sont généralement des tasseaux en bois ou métal. Dans certaines configurations une couche d'isolant prend place entre la paroi support et la lame d'air ventilée. L'illustration suivante présente le principe d'un bardage avec lame d'air ventilée :

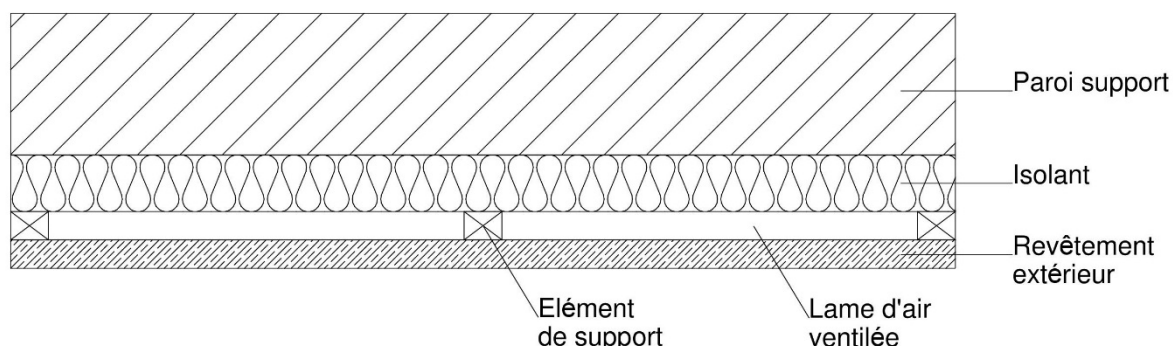


Illustration 1 : Principe d'un bardage avec lame d'air ventilée

3.1. Matériau de revêtement extérieur

Les matériaux utilisés pour réaliser le revêtement extérieur du bardage peuvent être de différents types. D'après les différents documents étudiés, peuvent être employés le bois, le métal (acier inoxydable, zinc, ...) ou encore des matières minérales (béton, terre cuite, ardoises, ...) ou plastiques PVC, polycarbonates, ...).

Les limitations d'usage sont essentiellement dues à la réglementation incendie qui fixe, en fonction des caractéristiques du bâtiment, des limites quant à la réaction au feu des matériaux de revêtement.

Aucun type de matériau n'est donc exclu du moment qu'il respecte les exigences de réaction au feu imposées.

3.2. Type de pose

Le plus fréquemment, Les éléments support de la peau extérieure du bardage sont des tasseaux bois ou profilés métal placés à la verticale. Cette disposition permet de ne pas entraver la circulation d'air au sein de lame ventilée. L'illustration suivante présente ce type de pose :

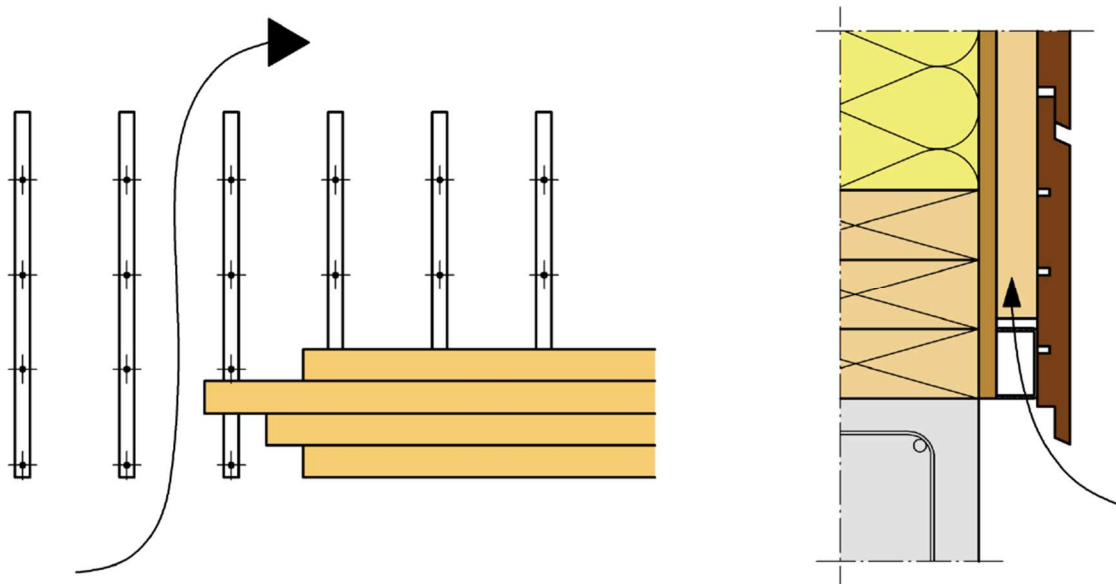


Illustration 2 : Eléments supports de bardage verticaux, NF DTU 41.2 P1-1

Toutefois, notamment pour les bardages à lames verticales, les éléments supports peuvent être placés à l'horizontale et un contre lattage est alors nécessaire pour ne pas entraver la circulation du flux d'air. Ce type de pose est illustré en suivant :

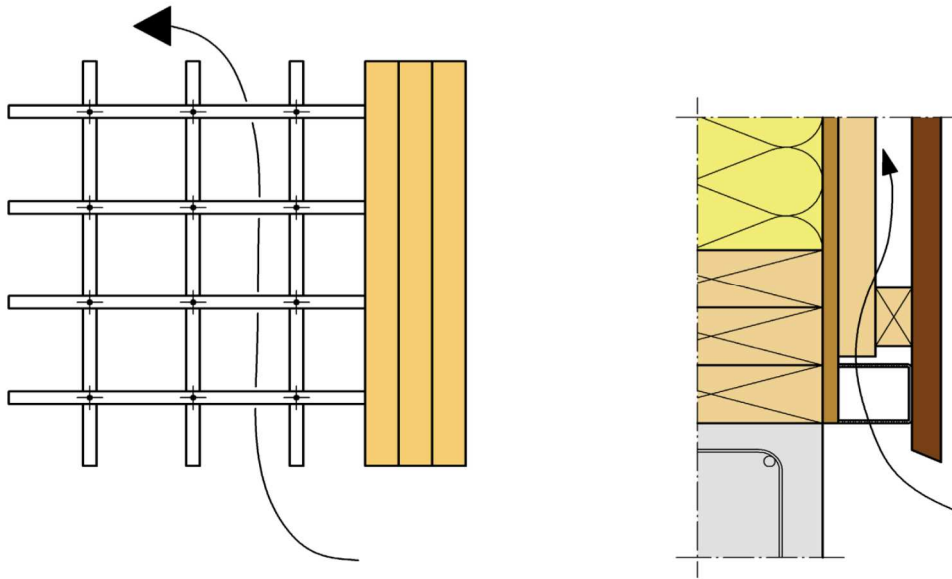


Illustration 3 : Eléments support de bardage avec contre lattage, NF DTU 41.2 P1-1

Le type de pose choisi a une influence sur les pertes de charge au sein de la lame d'air qui peuvent être prises en compte lors de la modélisation du comportement du bardage.

3.3. Ouverture des joints

Un bardage réalisé à partir de lames horizontales ou verticales à joints ouverts est nommé bardage à claire-voie. Une représentation en est donnée sur l'illustration suivante :

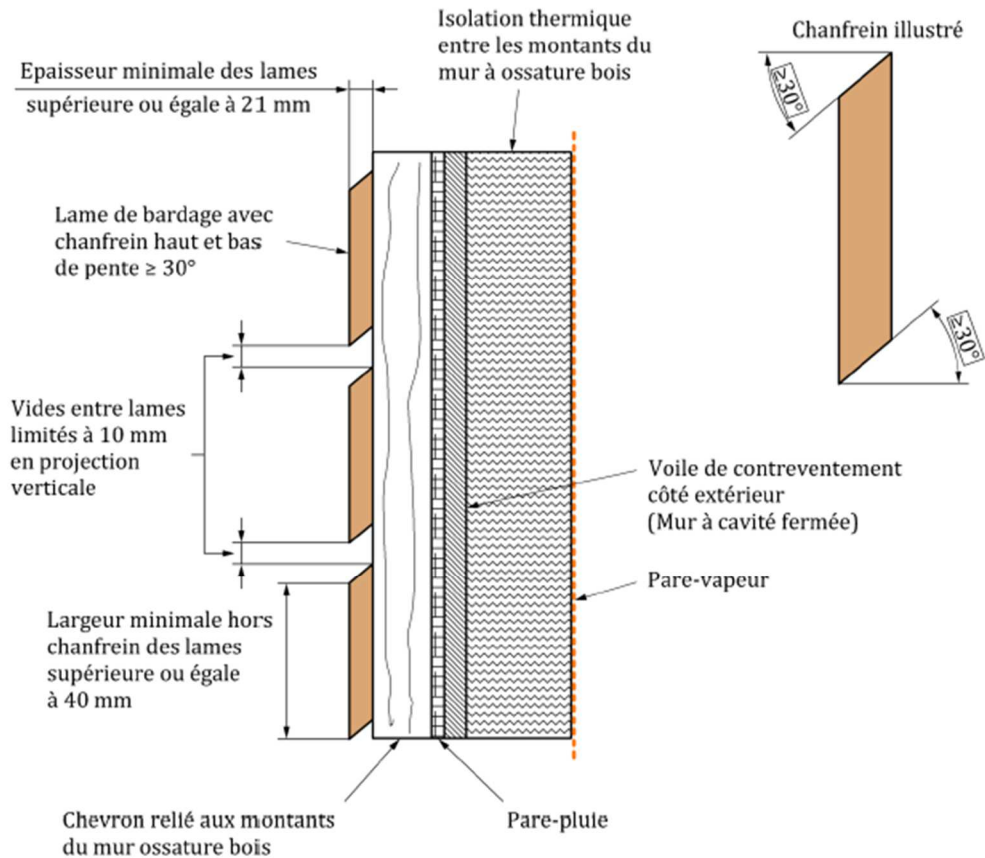


Illustration 4 : Bardage bois à claire-voie posé sur mur à ossature bois, NF DTU 41.2 P1-1

Suivant les dimensions des ouvertures entre lames il est possible de définir un taux de transmission directe du rayonnement solaire qui correspond à la part du rayonnement incident à la paroi qui atteint directement le mur support ou la couche d'isolation se trouvant derrière la lame d'air. Ce paramètre peut aussi se définir pour des bardages qui ne sont pas réalisés à partir de lames comme par exemple les bardages en métal déployé. Un aperçu de ce type de bardage est donné sur l'illustration suivante :



Illustration 5 : Bardage en métal déployé, archiexpo.fr

Dans le cas d'un bardage à claire-voie sur ossature bois réalisé à partir de lame en bois, plusieurs exigences portent sur l'aspect dimensionnel comme observé sur Illustration 4. Les vides entre lames sont limités à 10 mm. Les lames doivent présenter un chanfrein avec un angle au moins égal à 30°, une épaisseur minimale de 21 mm et une largeur d'au moins 40 mm. Pour les bardages réalisés à partir d'autres matériaux comme le métal, les vides peuvent être plus importants que pour les bardages à lames de bois. Il est donc préférable de considérer que le taux de transmission directe puisse varier de 0 à 1. Une valeur nulle signifie que la peau de bardage ne comporte pas de vide et une valeur de 1 suppose qu'il n'y a pas de peau extérieure et donc aucune lame d'air ventilée.

3.4. Éléments de bardage

Les éléments de bardage peuvent être de différents types. Il peut s'agir de lames, de panneaux ou encore d'écaillés. L'épaisseur est la dimension principale de ces éléments. Toutefois celle-ci peut être difficile à définir pour certains types de profils comme ceux présentés sur l'illustration qui suit :

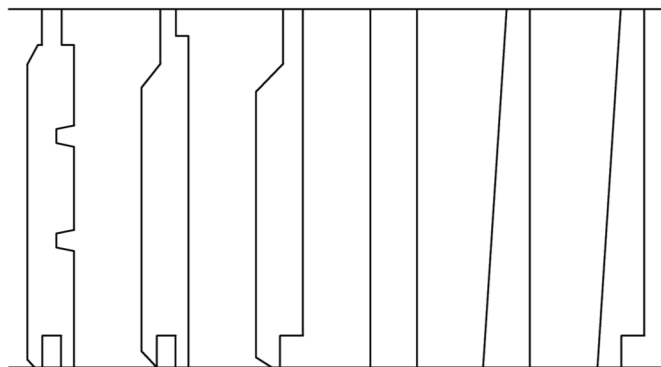


Illustration 6 : Exemple de profils courants de lames pour bardages bois, NF DTU 41.2 P1.1

Il convient dans la plupart des cas de retenir une épaisseur moyenne ou bien l'épaisseur correspondant à la partie exempte de singularité. En fonction du matériau utilisé les épaisseurs mises en œuvre peuvent être fortement différentes. Par exemple pour les bardages bois les épaisseurs varient de 10 mm pour certains panneaux de contreplaqués à des épaisseurs pouvant atteindre 27 mm. Pour les bardages en métal les épaisseurs sont beaucoup plus faibles et sont de l'ordre du millimètre.

Il est à noter que certains matériaux utilisés ne le sont pas forcément en tant qu'éléments pleins. Les profilés en matière plastique notamment peuvent présenter des cavités internes comme présenté sur l'illustration qui suit. Pour cette raison, les propriétés des éléments de bardage qui sont le plus souvent renseignées sont propres à chaque élément et ne sont pas celles du matériau utilisé. Par exemple, ce n'est pas la masse volumique des éléments de bardage qui est renseignée mais plutôt la masse surfacique en $[kg/m^2]$ de paroi. Cette dernière est couramment comprise entre 4 kg/m^2 pour des éléments en matière plastique et 50 kg/m^2 pour des éléments en terre cuite. Cette donnée est notamment utilisée pour dimensionner les éléments support de la peau extérieure.



Illustration 7 : Lame de bardage en PVC comportant des cavités internes, buisson-pvc.com

3.5. Lame d'air

L'épaisseur de la lame d'air n'est que peu dépendante du matériau ou de la forme des éléments constituant la peau extérieure du bardage. En règle générale, une épaisseur supérieure à 20 mm est imposée. Dans la pratique, la lame d'air n'excède que rarement les 50 mm.

Des ouvertures doivent être aménagées en parties basse et haute de la lame d'air afin d'assurer sa ventilation. La dimension de ces ouvertures dépend de la hauteur du bardage et l'on retrouve dans le cas d'un bardage bois des ouvertures minimums comprises entre 50 cm^2/ml et 120 cm^2/ml . Si l'ouverture est totale la dimension en cm^2/ml sera égale au produit de l'épaisseur en cm et 100 cm.

La hauteur de lame d'air est également un paramètre considéré. Il correspond à la hauteur sur laquelle la lame d'air est continue. C'est-à-dire la distance entre l'entrée et la sortie du flux d'air. Un fractionnement de la lame d'air est généralement mis en place entre chaque niveau du bâtiment comme le préconise la réglementation incendie. Ce fractionnement est réalisé à partir de bavette métallique comme présenté sur l'illustration suivante :

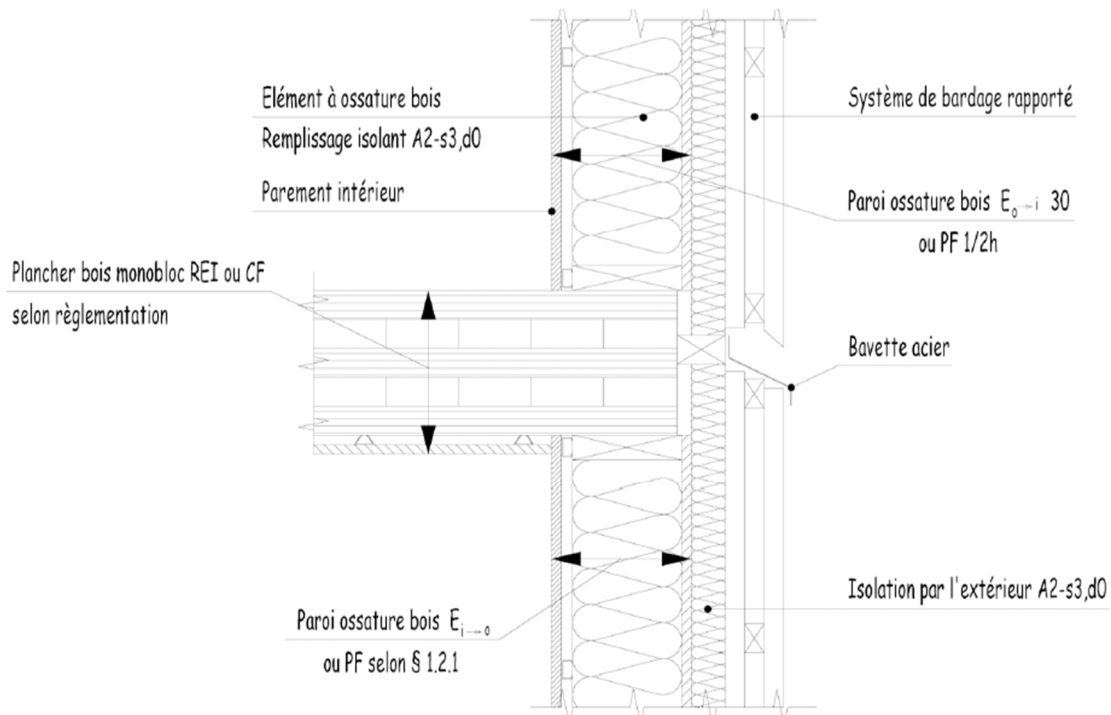


Illustration 8 : Mise en place d'une bavette en acier entre deux niveaux, IT 249

Le plus souvent la hauteur de la lame d'air sera égale à la hauteur entre étage soit entre 2 et 3 m. Lorsque que les préconisations en matière d'incendie ne sont pas d'application obligatoire, la hauteur de la lame d'air peut être plus importante. Par exemple, pour le cas des bardages rapportés sur ossature bois, un fractionnement de la lame d'air est nécessaire au-delà de 24 m de hauteur.

4. SYNTHÈSE

Les observations précédentes mettent en évidence les paramètres du bardage considérés par les pratiques courantes de mise en œuvre. Ils concernent le type de matériau utilisé, les caractéristiques géométriques des éléments de bardage, le type de pose ainsi que les dimensions de la lame d'air. Ces paramètres sont facilement accessibles puisqu'ils doivent être définis lors de la réalisation de ce type de revêtement pour répondre aux diverses exigences.

Le tableau suivant synthétise les différents paramètres « pratiques » du bardage ainsi que les valeurs couramment rencontrées :

Tableau 1 : Paramètres « pratiques » du bardage et plages de variation courantes

Catégorie	Paramètre	Unité	Plage de variation
Matériau	Type	[1]	[Bois ; Métal ; Minéral ; Plastique]
Pose	Type	[1]	[Lattage simple ; Contre lattage]
Ouverture des joints	Facteur de transmission directe	[1]	[0 ; 1]
Éléments	Type	[1]	[Plaques ; Lames ; Ecailles]
	Épaisseur	[1]	[0.5 ; 50]
	Masse surfacique	[kg/m ²]	[4 ; 50]
Lame d'air	Épaisseur	[mm]	[20 ; 50]
	Ouverture	[cm ² /ml]	[50 ; 500]
	Hauteur	[mm]	[2000 ; 24000]

1. INTRODUCTION

La méthode de prise en compte des bardages à lame d'air ventilée par la RT 2012 est analysée afin de mettre en évidence les paramètres « RT 2012 ». Ceux-ci servent à la description d'un bardage qui compose une paroi. Le présence d'un bardage influence les propriétés de la paroi et a des répercussions sur les valeurs des indicateurs réglementaires.

Dans cette partie, la description d'un bardage selon les Règles Th-U puis selon les Règles Th-S est donnée. Une synthèse des paramètres « RT 2012 » pris en compte est ensuite réalisée et les plages de variation associées sont renseignées.

2. DESCRIPTION D'UN BARDAGE AVEC LAME D'AIR

Lorsqu'un bardage avec lame d'air ventilée est mis œuvre, il doit être pris en compte lors de la caractérisation de la paroi. Pour la réglementation thermique 2012, les Règles Th-U et Th-S abordent le cas d'une paroi composée d'un tel revêtement. Les Règles Th-U portent sur la caractérisation thermique des parois et les Règles Th-S sur la caractérisation du facteur de transmission solaire.

2.1. Dans les Règles Th-U

Les Règles Th-U de la RT 2012 permettent la détermination des caractéristiques thermiques des parois vitrées et opaques. Dans ces règles, la manière dont est pris en compte un bardage avec lame d'air ventilée est décrite. Des valeurs tabulées pour certaines propriétés de matériaux d'usage courant dans le bâtiment y sont également données.

2.1.1. Calcul des caractéristiques thermiques

Le fascicule 4 des Règles Th-U donne les méthodes de calcul des caractéristiques thermiques des parois opaques. Il s'agit du coefficient de transmission surfacique $U [W/(m^2.K)]$ et de la résistance thermique de la paroi $R [m^2.K/W]$.

Dans ce fascicule, la lame d'air d'un bardage est considérée comme fortement ventilée lorsque les dimensions des ouvertures haute et basse sont supérieures ou égales à $15 \text{ cm}^2/\text{ml}$. Cette valeur est inférieure à ce qui est pratiqué lorsqu'un bardage avec lame d'air est réalisé (couramment entre 50 et $120 \text{ cm}^2/\text{ml}$ comme indiqué au paragraphe 3.5 de la partie précédente. Dans ce cas, les Règles Th-U définissent la résistance thermique totale de la paroi en négligeant la résistance thermique de la lame d'air et de toutes les couches situées entre la lame d'air et l'ambiance extérieure. La résistance thermique superficielle extérieure est également prise égale à la résistance thermique superficielle intérieure. L'illustration suivante présente la simplification proposée :

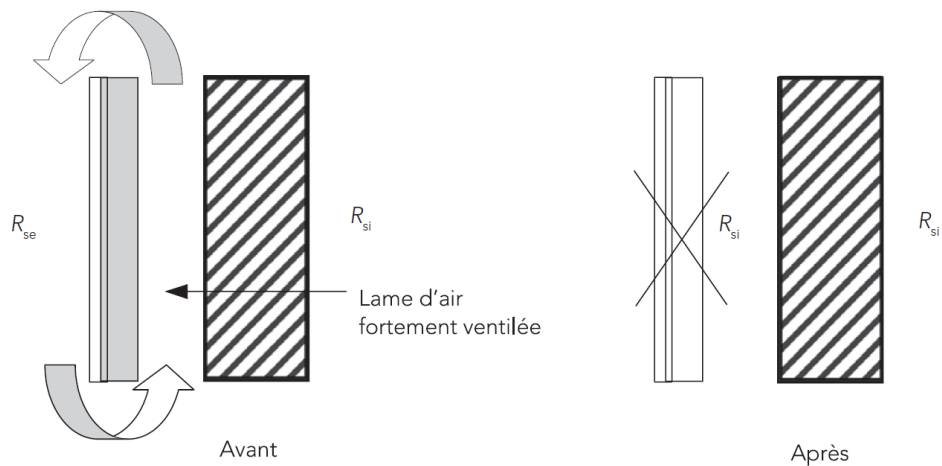


Illustration 9 : Simplification pour le calcul de la résistance thermique d'une paroi munie d'un bardage avec lame d'air ventilée, Règles Th-U fascicule 4

Les caractéristiques du bardage ne sont donc pas prises en compte lors du calcul de la résistance thermique d'une paroi. Sa seule présence est considérée par une modification de la résistance thermique superficielle du côté extérieur.

2.1.2. Propriétés des matériaux

Le fascicule 2/5 des Règles Th-U donne les valeurs thermiques des matériaux d'application générale dans le bâtiment en fonction de leur masse volumique ρ [kg/m^3]. Il s'agit de la conductivité thermique λ [$W/(m.K)$], de la capacité thermique massique C_p [$J/(kg.K)$] et du facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau μ [1].

A partir de ce fascicule, il est possible de définir les propriétés du matériau utilisé pour réaliser la peau extérieure d'un bardage avec lame d'air ventilée. Pour exemple, est donné en suivant l'extrait d'un tableau présentant les propriétés de différents bois :

Tableau 2 : Propriétés de différents bois, Règles Th-U fascicule 2

Matériaux ou application	(ρ) en kg/m ³	(λ) en W/(m.K)	(C_p) en J/(kg.K)	(μ)	
				Sec	Humide
Feuillus très lourds $\rho_n > 1\ 000$ kg/m ³	$\rho > 870$	0,29	1 600	200	50
Feuillus lourds $865 < \rho_n \leq 1\ 000$ kg/m ³	$750 < \rho \leq 870$	0,23	1 600	200	50
Feuillus mi-lourds $650 < \rho_n \leq 865$ kg/m ³	$565 < \rho \leq 750$	0,18	1 600	200	50
Feuillus légers $500 < \rho_n \leq 650$ kg/m ³	$435 < \rho \leq 565$	0,15	1 600	200	50
Feuillus très légers $230 < \rho_n \leq 500$ kg/m ³ hors balsa	$200 < \rho \leq 435$	0,13	1 600	50	20
Balsa $\rho_n \leq 230$ kg/m ³	$\rho \leq 200$	0,057	1 600	50	20
Résineux très lourds $\rho_n > 700$ kg/m ³	$\rho > 610$	0,23	1 600	50	20
Résineux lourds $600 < \rho_n \leq 700$ kg/m ³	$520 < \rho \leq 610$	0,18	1 600	50	20
Résineux mi-lourds $500 < \rho_n \leq 600$ kg/m ³	$435 < \rho \leq 520$	0,15	1 600	50	20
Résineux légers $\rho_n \leq 500$ kg/m ³	$\rho \leq 435$	0,13	1 600	50	20

Il est à noter que ces propriétés s'entendent pour des éléments pleins. Le fascicule 2/5 des Règles Th-U ne peut donc pas être utilisé pour déterminer les propriétés des éléments de bardage comportant des cavités comme certaines lames en matière plastique (voir Illustration 7).

2.2. Dans les Règles Th-S

Les Règles Th-S permettent de définir les paramètres nécessaires pour calculer les apports solaires au travers des éléments de l'enveloppe du bâtiment. Il s'agit des facteurs solaires des différentes parois vitrées et opaques. Le facteur solaire d'une paroi est défini comme étant le rapport entre l'énergie due au rayonnement solaire transmise au local et l'énergie incidente sur la paroi. L'illustration suivante présente la définition du facteur solaire S :

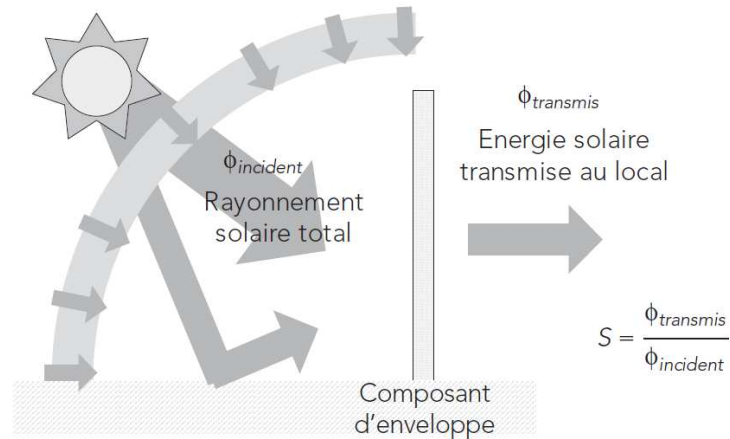


Illustration 10 : Notion de facteur de transmission solaire, Règles Th-S

Le chapitre 5 des Règles Th-S porte sur les parois opaques. Dans ces règles il est précisé que la définition du facteur de transmission solaire d'une paroi opaque ne fait pas l'objet d'un contexte normatif. La méthode de calcul proposée par les Règles Th-S est basée sur les propriétés thermiques de la paroi. Dans le cas général, la méthode retenue pour le calcul du facteur solaire d'une paroi opaque repose sur l'équation suivante :

$$F_{s,mur} = \alpha_{k,mur} \times R_{se-E} \times U_{k-E} \quad (1)$$

Où :

$F_{s,mur}$ [1] est le facteur solaire de la paroi

$\alpha_{k,mur}$ [1] est le coefficient d'absorption solaire de la face extérieure du mur

R_{se-E} [$m^2 \cdot K/W$] est la résistance thermique superficielle extérieure (convection et rayonnement)

U_{k-E} [$W/(m^2 \cdot K)$] est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque

L'équation (1) traduit le fait que seulement une partie du rayonnement solaire est absorbé par le mur (terme $\alpha_{k,mur}$). Ensuite, la partie du rayonnement absorbé qui traverse la paroi est proportionnel au rapport entre la résistance thermique superficielle extérieure et la résistance thermique de la paroi (terme $R_{se-E} \times U_{k-E} = R_{se-E}/R_{k-E}$).

Dans le cas d'une paroi opaque avec lame d'air extérieure ventilée la méthode de calcul est similaire et l'équation suivante est utilisée pour le calcul du facteur solaire :

$$F_s = \alpha_k \times R_{se-E} \times K_{corr_{la}} \times U_{k-E} \quad (2)$$

Où :

F_s [1] est le facteur solaire de la paroi avec bardage

α_k [1] est le coefficient d'absorption solaire de la peau de bardage

$K_{corr_{la}}$ [1] est le coefficient de correction associé à la prise en compte de la lame d'air extérieure ventilée

Dans l'équation (2) le coefficient $K_{corr_{la}} \leq 1$ est introduit pour caractériser l'impact de lame d'air qui réduit le facteur solaire de la paroi. La valeur de ce coefficient de correction est issue du tableau donné en suivant :

Tableau 3 : Valeurs tabulées du coefficient de correction $K_{corr_{la}}$, Règles Th-S

e_{la} (m)	H_{la} (m)			
	2 ou moins		10 ou plus	
	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$
0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,05	0,70	0,65	0,70	0,70
0,1	0,65	0,60	0,65	0,60
0,5	0,60	0,55	0,55	0,50

Les paramètres considérés sont :

e_{la} [m] : Epaisseur de la lame d'air

H_{la} [m] : Hauteur de la lame d'air

α_k [1] : Coefficient d'absorption solaire de la peau de bardage

L'illustration suivante présente ces paramètres :

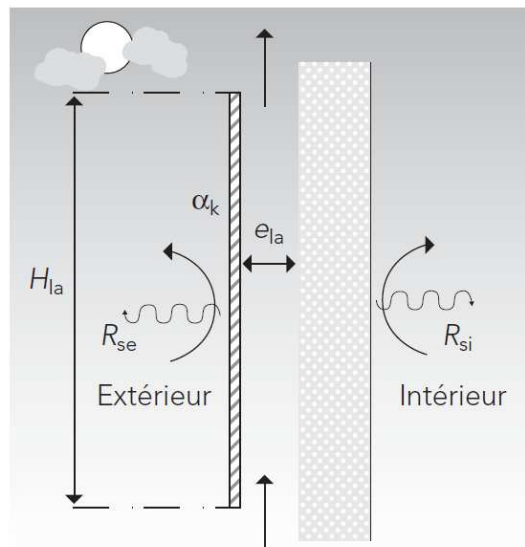


Illustration 11 : Représentation d'une paroi opaque verticale à lame d'air extérieure ventilée, Règles Th-S

Dans les Règles Th-S, lorsque le coefficient d'absorption solaire de la peau de bardage n'a pas été mesuré, une valeur par défaut peut être retenue en fonction de la couleur du revêtement extérieur comme donné dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Valeur par défaut de α_k , Règles Th-S

Catégorie	Couleurs	Valeur de α_k par défaut
Clair	Blanc, jaune, orange, rouge clair	0,4
Moyen	Rouge sombre, vert clair, bleu clair, gris clair	0,6
Sombre	Brun, vert sombre, bleu vif, gris moyen	0,8
Noir	Noir, brun sombre, bleu sombre, gris sombre	1,0

Le coefficient de correction associé à la prise en compte de la lame d'air ne tient compte que d'un nombre limité de paramètres. Les ouvertures des joints pour les bardages ajourés ne sont par exemple pas prises en compte. Le coefficient de correction K_{corr1a} sera donc le même pour des bardages pleins et ajourés du moment que l'épaisseur de la lame d'air, sa hauteur et la couleur du revêtement extérieur sont identiques.

Une analyse du Tableau 3 soulève plusieurs interrogations. Tout d'abord, les valeurs des coefficients de correction sont données pour des hauteurs de lame d'air de 2 mètres ou moins et de 10 mètres ou plus. Dans les Règles Th-S, il n'est pas précisé quelles valeurs doivent être considérées pour des hauteurs comprises entre ces deux intervalles. Ensuite, 4 valeurs pour l'épaisseur de lame d'air sont retenues (0, 5, 10 et 50 cm). Une épaisseur nulle signifie qu'il n'y a pas de lame d'air ventilée ce qui se traduit par une valeur du coefficient correctif égale à 1. Les valeurs de 5 et 10 cm semblent se rapprocher des pratiques courantes mais une épaisseur de lame d'air de 50 cm est bien au-delà de ce qu'il est fréquent de rencontrer. En ce qui concerne le coefficient d'absorption solaire de la peau du bardage, les valeurs de 0.4 et 0.8 sont données dans le Tableau 3. Ces valeurs correspondent à des couleurs claires et sombres. Pour d'autres valeurs de coefficient d'absorption aucune recommandation n'est fournie. L'usage d'une interpolation n'est donc pas exclu.

3. SYNTHÈSE

Ce qui précède met en évidence les paramètres du bardage considérés par la Réglementation Thermique 2012. Le fascicule 2/5 des Règles Th-U donne certaines propriétés des matériaux d'usage courant dans le bâtiment. Il est alors possible de connaître facilement la masse volumique, la conductivité thermique, la capacité thermique massique ainsi que le facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau du matériau constituant la peau du bardage. Les Règles Th-S retiennent seulement 3 paramètres du bardage pour définir son influence sur le facteur solaire de la paroi. L'ensemble de ces paramètres sont faciles à déterminer du moment que le matériau et la couleur de la peau de bardage sont connus ainsi que l'épaisseur et la hauteur de la lame d'air.

Le tableau suivant synthétise les différents paramètres « RT 2012 » du bardage ainsi que les valeurs couramment rencontrées :

Tableau 5 : Paramètres « RT 2012 » du bardage et plages de variation courantes

Catégorie	Paramètre	Unité	Plage de variation
Matériau de revêtement extérieur	Masse volumique	[kg/m ³]	[150 ; 8900]
	Conductivité thermique	[W/(m.K)]	[0.057 ; 380]
	Capacité thermique massique	[J/(kg.K)]	[380 ; 2200]
	Facteur de résistance à la diffusion de vapeur d'eau	[1]	[15 ; 100000]
	Coefficient d'absorption solaire	[1]	[0.4 ; 1]
Lame d'air	Epaisseur	[mm]	[0 ; 500]
	Hauteur	[mm]	[2 ; 10]

1. INTRODUCTION

Des travaux déjà menés à Nobatek sont repris. Ils sont relatifs au travail de Thèse d'Antoine Dugué et portent sur la caractérisation et valorisation de protection solaires pour la conception de bâtiment. Ce travail a abouti à la proposition de différentes modélisations d'un bardage avec lame d'air ventilée. Elles permettent, par calcul successifs, de définir pour une composition de bardage donnée un coefficient correctif sur facteur solaire $F_{s,ps}$. Celui-ci peut être utilisé pour calculer le facteur solaire d'une paroi avec bardage en se basant sur la méthode proposée par les Règles Th-S :

$$F_s = F_{s,ps} \times R_{se-E} \times U_{k-E} \quad (3)$$

La relation entre ce coefficient et le coefficient de correction $K_{corr_{la}}$ utilisé dans les Règles Th-S est alors donnée par l'équation suivante :

$$F_{s,ps} = \alpha_k K_{corr_{la}} \quad (4)$$

Il s'agit ici de mettre en évidence les paramètres « physiques » du bardage qui ont été identifiés dans ces travaux comme ayant une influence sur l'impact que peut avoir le bardage sur le comportement thermique du bâtiment.

Dans un premier temps la modélisation du bardage est brièvement présentée et son utilisation justifiée. Les données d'entrée du modèle sont ensuite présentées et leur accessibilité discutée. Une synthèse des paramètres « physique » est alors réalisée.

2. MODELE PHYSIQUE

Le modèle développé dans le cadre de la Thèse d'Antoine Dugué permet d'étudier le comportement d'une paroi munie d'un bardage et soumise à une sollicitation extérieure dynamique. La modélisation se base sur une analogie rhéoelectrique pour définir le comportement du système. Ce modèle tient compte des phénomènes conductifs, convectifs et aussi radiatifs qui régissent les échanges de chaleur par ce type de paroi munie d'une lame d'air ventilée.

Cette modélisation a été retenue dans le cadre de cette étude puisque parmi ces multiples applications elle permet de définir le facteur solaire d'une paroi. Plusieurs simulations successives aboutissent à l'obtention du facteur solaire propre au bardage. Cette modélisation offre donc la possibilité de définir finement l'impact d'un bardage sur le comportement d'une paroi par le biais d'une méthode similaire à celle utilisée par la réglementation thermique.

Ce modèle a fait l'objet de multiples validations expérimentales réalisées dans le cadre du travail de Thèse d'Antoine Dugué. Il apparait comme étant un modèle fiable sur lequel il est possible de se baser pour proposer une évolution des méthodes réglementaires.

3. DONNEES D'ENTREE ET ACCESSIBILITE

Les données d'entrée du modèle concernent la géométrie du bardage ainsi que les propriétés des matériaux utilisés. Les paramètres géométriques du bardage, c'est-à-dire l'épaisseur de la protection solaire, celle de la lame d'air ainsi que la hauteur de cette lame d'air et son ouverture, ont une influence sur les échanges de chaleur et sur les mouvements d'air entre la protection solaire et le mur. Les mouvements d'air dépendent également des pertes de charges au sein de la lame d'air. Celles-ci peuvent être définies en fonction de la disposition des tasseaux supports de la protection solaire. Les pertes de charge ne seront pas les mêmes suivant si la pose nécessite ou non un contre lattage comme présenté sur les illustrations Illustration 2 et Illustration 3. L'épaisseur de la lame d'air ainsi que son ouverture influencent également le calcul des pertes de charge.

Dans la modélisation de la paroi avec bardage, les matériaux sont définis par leur conductivité thermique, leur masse volumique et leur capacité thermique massique. En plus de ces données le modèle fait appel aux propriétés radiatives des surfaces qui pilotent les échanges de chaleur radiatifs. Il s'agit notamment des coefficients d'absorption, de réflexion et de transmission des matériaux. Aussi une distinction est faite entre les courtes longueurs d'onde (CLO : rayonnement solaire) et les grandes longueurs d'onde (GLO : rayonnement des corps proches de la température ambiante).

Mises à part les pertes de charge, les propriétés géométriques du bardage sont des données facilement accessibles au concepteur. Pour les pertes de charge qui dépendent de la disposition des éléments support de la protection solaire ainsi que des autres propriétés géométriques, il est nécessaire de faire appel à des abaques génériques utilisés en mécanique des fluides. Toutefois, il est possible de définir des valeurs pour différents types de configurations.

Les propriétés des matériaux que sont la conductivité thermique, la masse volumique et la capacité thermique massique peuvent aussi être obtenues avec facilité. Elles sont fréquemment données par le fabricant ou peuvent être prises par défaut dans le fascicule 2 des Règles Th-U de la RT 2012. Les propriétés radiatives des matériaux sont quant à elles plus difficile d'accès.

4. SYNTHESE

Ce qui précède met en évidence les paramètres qui vis-à-vis du modèle retenu pour cette étude ont une influence sur le comportement thermique de la paroi avec bardage. Certains de ces paramètres peuvent facilement être déterminés puisqu'il s'agit soit de données géométriques soit de propriétés des matériaux couramment utilisées. D'autres paramètres sont plus difficiles d'accès comme les pertes de charges au sein de la lame d'air ainsi que les nombreuses propriétés radiatives des surfaces.

PARTIE 4 : SYNTHÈSE SUR LES PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION

Lors de ce travail préparatoire les paramètres « pratiques », « RT 2012 » et « physiques » décrivant un bardage ont été relevés. Les paramètres « pratiques » sont des données qui concernent les règles de l'art et de mise en œuvre des bardages avec présence d'une lame d'air ventilée. Ils sont assez faciles d'accès puisqu'ils doivent être définis lors de la conception de la paroi. Les paramètres « RT 2012 » sont peu nombreux. Ils sont utilisés lors d'un calcul selon la RT 2012 afin de définir l'influence du bardage sur le comportement thermique du bâtiment. Les données sont très simples d'accès. A partir des Règles Th-U de la RT 2012 il est également possible d'obtenir des valeurs par défaut pour certaines propriétés de différents matériaux. Celles-ci ne sont pas utilisées par la RT 2012 pour la détermination de l'influence du bardage mais peuvent servir de référence dans la suite de ce travail. Enfin, les paramètres « physiques » sont les données d'entrée nécessaires à l'emploi du modèle décrivant le comportement thermique d'une paroi avec bardage. Ce modèle a été développé lors de travaux antérieurs réalisés à Nobatek dans le cadre de la Thèse d'Antoine Dugué. Ce modèle a pu être validé par des expérimentations sur un complexe de paroi avec bardage et lame d'air ventilée. L'accessibilité à ces paramètres « physiques » n'est pas toujours évidente, notamment pour ce qui est des propriétés radiatives des surfaces. Ces données ne sont spécifiées par les fabricants que pour des produits à usage particulier. Il est alors nécessaire de recourir à des essais en laboratoire pour définir ces propriétés.

La méthode actuelle de prise en compte du bardage pour la détermination du facteur solaire d'une paroi opaque ne tient compte que d'un nombre réduit de paramètres. Les bardages à claire-voie ne sont par exemple pas considérés. Aussi, il est parfois difficile de faire le lien entre les plages de variation utilisées pour les paramètres dits « pratiques » et celles données pour les paramètres « RT 2012 ». Dans les Règles Th-S, il n'est par exemple pas spécifié de valeur de coefficient correctif sur facteur solaire pour des hauteurs de bardage comprises entre 2 et 10 m alors qu'il s'agit là d'un intervalle courant.

Dans la suite de cette étude, une première sélection des paramètres d'intérêt sera alors réalisée en fonction des conclusions de ce travail préparatoire. Des plages de variation seront également associées à ces paramètres de manière à être représentatif des pratiques courantes. Dans le cadre d'une application réglementaire, il ne semble toutefois pas envisageable de demander au concepteur de renseigner l'ensemble des paramètres dits « physiques » qui pour certains sont difficiles d'accès. Une étude de sensibilité sera menée afin d'identifier les paramètres réellement influents. Si ceux-ci restent tout de même difficiles à déterminer pour le concepteur, il faudra que des valeurs par défaut puissent être utilisées. Le choix de l'une ou l'autre de ces valeurs pourra alors se baser sur des propriétés connues comme par exemple la couleur des surfaces ou encore le type de matériau utilisé.

CHAPITRE 2 : APPLICATION DU MODELE PHYSIQUE

INTRODUCTION

L'objectif de ce second chapitre est d'affiner la prise en compte des bardages avec lame d'air ventilée lors d'un calcul thermique RT 2012 via l'application d'un modèle physique fin.

Dans la méthode de calcul thermique réglementaire, au niveau d'une paroi opaque, les transferts de chaleur conductifs, convectifs et radiatifs dus aux sollicitations de grande longueur d'onde (GLO : rayonnement issu de sources proches de la température ambiante) sont différenciés des transferts radiatifs dus aux sollicitations de courte longueur d'onde (CLO : rayonnement solaire). Les premiers sont caractérisés selon les Règles Th-U par la définition d'un coefficient de transmission thermique et les seconds selon les Règles Th-S par un facteur de transmission solaire. Dans le cas d'une paroi munie d'un bardage, les Règles Th-U proposent de considérer la paroi sans son bardage et de modifier la valeur de la résistance thermique superficielle extérieure. Pour ce qui est du facteur de transmission solaire, les Règles Th-S proposent de prendre en compte la présence du bardage par le biais d'un coefficient de correction. Ces simplifications sont présentées dans la partie 2 du premier chapitre de ce document.

La proposition d'évolution de la méthode réglementaire qui est proposée dans ce chapitre concerne les Règles Th-S et la définition du facteur solaire d'une paroi avec bardage et lame d'air ventilée. Il est proposé de considérer un nombre plus important de caractéristiques du bardage de manière à prendre plus finement en compte son influence. Ces caractéristiques portent notamment sur les propriétés des matériaux utilisés et la géométrie du bardage.

Le modèle physique utilisé dans cette étude a été développé dans le cadre du travail de Thèse d'Antoine Dugué. Ce modèle et les modifications qui lui ont été apportées afin de répondre aux objectifs de ce travail sont dans un premier temps présentés. Une analyse du modèle est ensuite réalisée de manière à discuter du caractère intrinsèque du facteur solaire du bardage. Dans cette seconde partie les résultats fournis par le modèle sont également comparés aux coefficients de correction proposés par les Règles Th-S. Ensuite, la troisième partie porte sur le choix des paramètres à prendre en compte pour la définition de coefficients correctifs sur facteur solaire en vue d'une utilisation dans un cadre réglementaire. Ce choix est en grande partie guidé par les résultats d'une analyse de sensibilité ainsi que par l'accessibilité des paramètres pour le concepteur. Dans la partie suivante, les coefficients correctifs obtenus par l'application du modèle physique fin sont présentés. Enfin, la dernière partie de ce chapitre est dédiée à l'étude de l'impact de la prise en compte de ces coefficients correctifs sur les indicateurs réglementaires Bbio et Tic.

PARTIE 1 : DESCRIPTION DU MODELE

Le modèle retenu dans le cadre de cette étude a pour objectif de décrire le comportement d'une paroi verticale munie d'un bardage. Ce dernier, posé sur une ossature, laisse place à une lame d'air qui débouche sur l'extérieur par l'intermédiaire d'ouvertures haute et basse. Ce modèle a été développé dans le cadre du travail de Thèse d'Antoine Dugué. Une validation expérimentale présentée dans le mémoire de Thèse atteste de la justesse du modèle. Des modifications ont été apportées au modèle initial afin de répondre aux objectifs de cette étude. Ils concernent la prise en compte des pertes de charge singulières pour l'écoulement au sein de la lame d'air. Celles-ci sont dues à différents éléments couramment employés pour la réalisation d'un bardage. Il s'agit notamment de la présence en partie basse d'une grille anti-rongeur, d'un contre-lattage dans le cas d'un bardage à lames verticales ainsi que d'une bavette en partie haute. Les modifications apportées au modèle concernent également la prise en compte de la part du rayonnement directement transmis au mur support dans le cas d'un bardage ajouré.

1. ECHANGES DE CHALEUR

Trois types de phénomènes de transfert de chaleur interviennent dans le cas d'une paroi avec bardage et lame d'air ventilée :

- La conductivité thermique : celle-ci caractérise le transfert de chaleur dans les matériaux solides. Que ce soit dans le mur support du bardage ou dans le bardage lui-même.
- La convection : l'air est le support de ce type de transfert. Au sein du système étudié, la convection prend deux formes. Le transport convectif qui se caractérise par un renouvellement d'air dans la cavité formée par le bardage est la première. La seconde est l'échange convectif qui a lieu au sein de lame d'air entre la face interne de la protection solaire et l'air et entre la face externe du mur et l'air par convection naturelle. Il y a également un échange convectif sous l'effet du vent entre la face externe de la protection solaire et l'air extérieur.
- Le transfert radiatif : un tel transfert de chaleur a lieu entre la surface extérieure de la protection solaire et son environnement ainsi que de surface à surface de part et d'autre de la lame d'air ventilée.

Dans le cas du transfert radiatif il est nécessaire de distinguer les courtes longueurs d'onde (CLO) des grandes longueurs d'onde (GLO). La longueur d'onde d'un rayonnement va dépendre de la température de la surface émettrice. La relation entre ces deux paramètres est donnée par la loi de Planck. Puisque la température de surface du soleil est proche des 5870 K, le rayonnement qu'il émet est un rayonnement en CLO. Le rayonnement émis par les sources terrestres, plus proches de la température ambiante, est quant à lui considéré comme un rayonnement en GLO. Le recours à cette distinction est notamment justifié par le comportement des éléments transparents comme les vitrages qui ne laissent passer que les CLO. Il est alors nécessaire de différencier leurs propriétés radiatives sur ces deux plages.

De part et d'autre de la lame d'air un phénomène de multi-réflexion intervient. La part de rayonnement solaire (CLO) transmis par la protection solaire, qui peut-être semi-transparente, peut ensuite être soit absorbée, soit réfléchi par le mur. Ensuite cette part réfléchi, peut à nouveau être transmise, réfléchi ou absorbée par la face interne de la protection solaire, comme présenté sur l'illustration suivante :

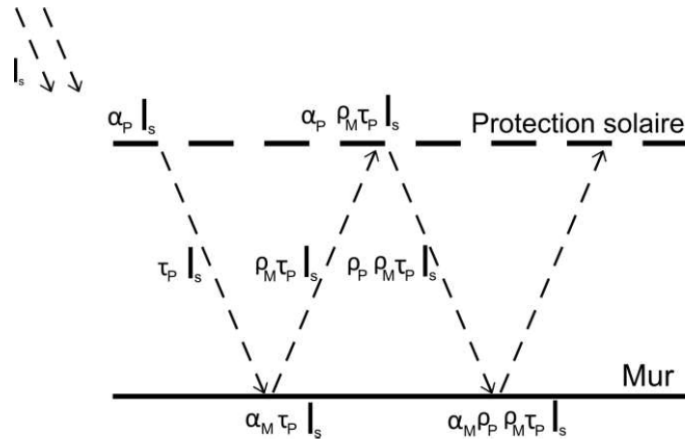


Illustration 12 : Schéma du phénomène de multi-réflexion du rayonnement CLO, Antoine Dugué

Aussi, les échanges radiatifs entre la face interne de la protection solaire et le mur font également intervenir les flux calculés à partir des températures de surface et des propriétés radiatives des matériaux en GLO.

2. TYPE DE MODELISATION

2.1. Analogie rhéoélectrique

Le modèle retenu pour l'étude du comportement des parois verticales avec bardage est décrit en détail dans le Chapitre 3 : Modélisation des transferts de chaleur dans l'EPLM de la Thèse d'Antoine Dugué.

La modélisation retenue repose sur une analogie rhéoélectrique. Un corps homogène et thermiquement mince est alors modélisé par un couple composé d'une résistance thermique R et d'une capacité thermique C . Chaque couche de la paroi avec bardage est divisée en plusieurs mailles. A chacune d'elle est associé un couple (R, C) . Au centre de chaque maille est placé un nœud. Des nœuds sont également placés aux extrémités de chaque couche, c'est-à-dire aux interfaces entre couches. La capacité thermique associée à cette interface est calculée en fonction de celles des deux matériaux en contact. L'illustration suivante présente la modélisation d'une couche k qui a à sa gauche une autre couche solide et à sa droite une couche d'air.

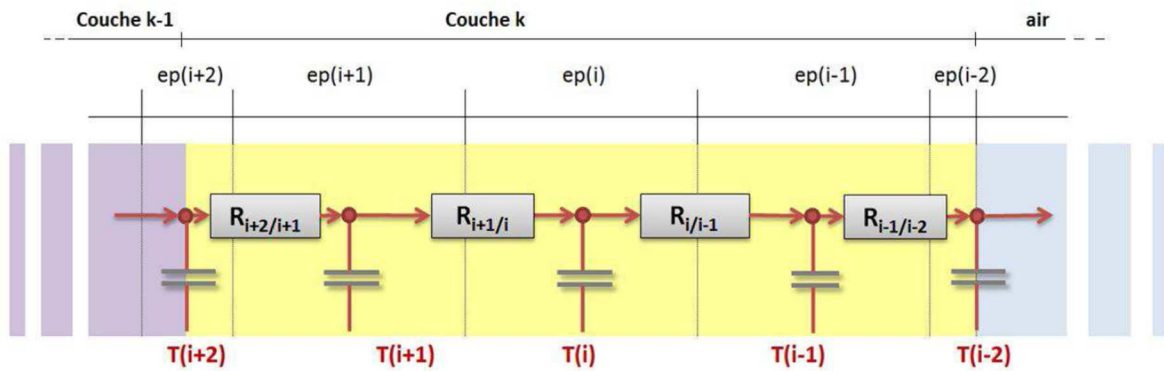


Illustration 13 : Modélisation d'une couche solide

Pour les lames d'air, une seule maille est considérée avec en son centre un nœud qui correspond à la température moyenne de l'air. Les nœuds aux extrémités de la cavité correspondent aux températures de surface des couches adjacentes.

Au niveau de la face externe de la protection solaire les flux de chaleurs considérés sont les suivants :

- Le flux solaire incident en CLO
- Le flux en GLO d'échange avec le ciel et le flux en GLO d'échange avec l'environnement extérieur
- Le flux convectif forcé par le vent extérieur
- Le flux conductif dans l'épaisseur de la protection solaire

La modélisation retenue est présentée sur l'illustration suivante.

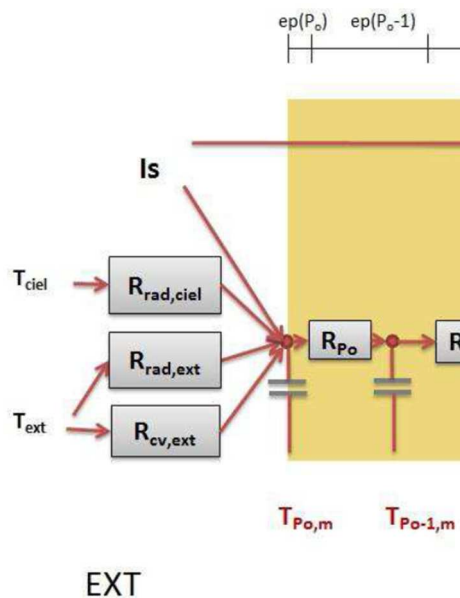


Illustration 14 : Modélisation des transferts au niveau de la face externe

La modélisation de la lame d'air présentée sur l'illustration 15 permet de prendre en compte les éléments suivants :

- La convection naturelle ($h_{cv,la}$)

- L'échange radiatif de surface à surface entre la protection solaire et le mur (R_{GLO})
- Le renouvellement d'air (Φ_{pertes})

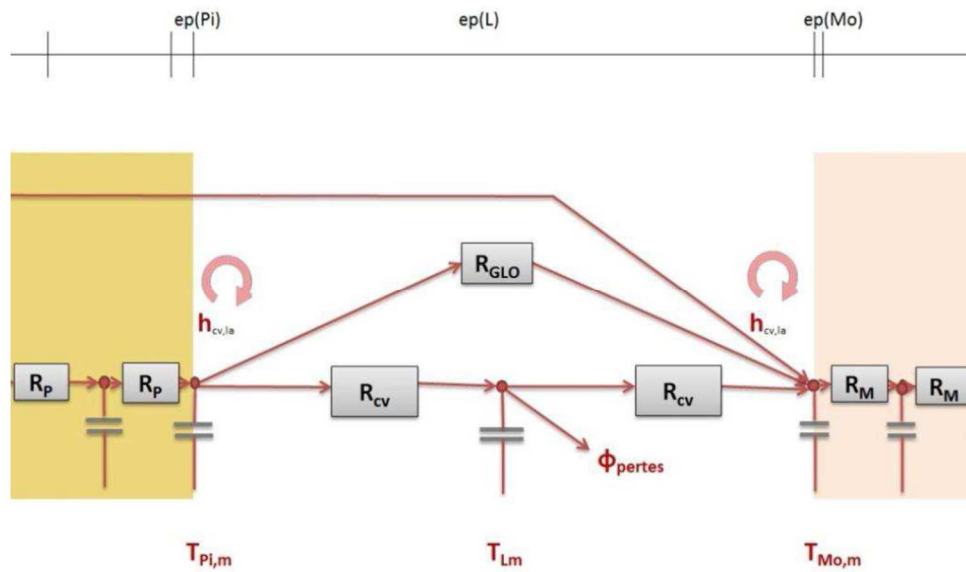


Illustration 15 : Représentation des échanges au niveau de la lame d'air

Enfin, au niveau de la face interne de la paroi les échanges sont modélisés comme présentés sur l'illustration suivante où H_e et C_o sont respectivement les possibles termes de puissance associés au chauffage et au rafraîchissement.

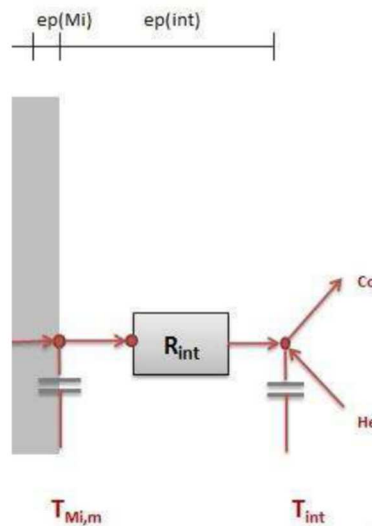


Illustration 16 : Modélisation des transferts au niveau de la face interne

2.2. Ecoulement dans la lame d'air

2.2.1. Type d'approche

Pour déterminer la vitesse d'écoulement de l'air dans la cavité et donc le renouvellement associé, plusieurs approches existent. Parmi elles, l'approche numérique par CFD (Computational Fluid Dynamics) et deux approches analytiques, la première se basant sur l'effet cheminée et la seconde sur les pertes de charge de l'écoulement.

L'approche par CFD fait appel aux équations de Navier-Stokes afin de déterminer la vitesse d'écoulement entre deux plaques chauffées asymétriquement. Cette approche nécessite un temps de calcul conséquent. De plus, il s'avère que les résultats sont valables pour des configurations spécifiques limitant leur exploitation.

L'approche basée sur l'effet cheminée s'appuie sur l'écriture des profils de pression à l'intérieur et à l'extérieur de la lame d'air en tenant compte des pertes de charges linéaires dans la lame d'air. L'utilisation de cette approche nécessite des mesures expérimentales.

Enfin, l'approche basée sur l'écriture des pertes de charge permet d'exprimer la vitesse d'air en fonction de la différence de pression motrice entre l'air extérieur et l'air intérieur. C'est cette approche qui est retenue dans le cadre de cette étude. Elle s'avère plus souple que les précédentes et l'écriture des pertes de charge linéaires et singulières peut être ajustée simplement.

2.2.2. Ecriture des pertes de charge

Pertes de charge linéaires

L'écriture des pertes de charge linéaires est décrite dans le mémoire de Thèse d'Antoine Dugué. Les éléments principaux sont rappelés en suivant.

Les pertes de charge linéaires Δ_{pfr} sont définies par la formule de Darcy-Weissbach :

$$\Delta_{pfr} = \frac{KH_{la}}{2ep_{la}} \frac{\rho v^2}{2} \quad (5)$$

Où :

H_{la} [m] est la hauteur de la lame d'air

ρ [kg/m³] est la masse volumique de l'air

v [m/s] est la vitesse de l'air

ep_{la} [m] est l'épaisseur de la lame d'air

K [1] est le coefficient de friction qui dépend du type d'écoulement et donc du nombre de Reynolds

Pertes de charge singulières

Dans le cadre de cette étude les éléments suivants sont considérés pour l'écriture des pertes de charge singulières :

- Réduction de section à l'entrée de la cavité Δ_{pb1}

- Coude à 90° à l'entrée de la cavité Δ_{pb2}
- Grille anti-rongeur Δ_{Pgar}
- Contre-lattage dans le cas d'un bardage à lames verticales Δ_{Pltg}
- Bavette à la sortie de la cavité Δ_{Ph}

L'expression des pertes de charge singulière totales est la suivante :

$$\Delta P_s = \sum \Delta P_i \quad (6)$$

Avec :

$$\Delta P_i = \xi_i \frac{\rho v^2}{2} \quad (7)$$

Où :

ρ [kg/m^3] est la masse volumique de l'air

v [m/s] est la vitesse de l'air

ξ_i [1] est le coefficient de perte de charge pour la singularité i

L'illustration suivante présente la localisation des pertes de charge singulières en partie basse de la lame d'air ventilée.

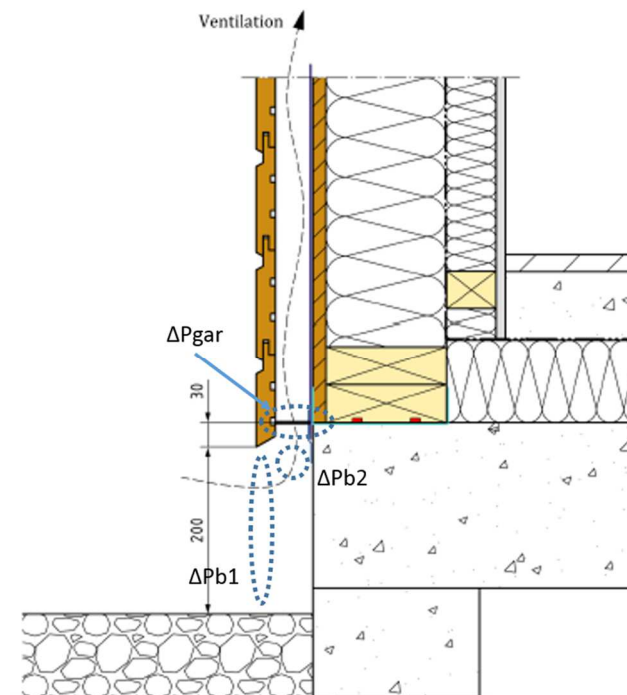


Illustration 17 : Pertes de charge singulières en partie basse de la lame d'air ventilée

Les valeurs des coefficients de perte de charge pour ces singularités sont issues de l'ouvrage Mémento des pertes de charges et des travaux de J. Falk et K. Sandin.

- Réduction de section à l'entrée de la cavité $\Delta_{pb1} : \xi_{b1} = 0.5$
- Coude à 90° à l'entrée de la cavité $\Delta_{pb2} : \xi_{b2} = 1.1$
- Grille anti-rongeur $\Delta_{Pgar} :$

Cette grille est considérée comme une tôle perforée dont les ouvertures sont à bords vifs. De plus, les expérimentations menées dans le cadre du travail de Thèse d'Antoine Dugué¹ montrent qu'au sein de la lame d'air le nombre de Reynolds reste inférieur à $Re < 10^5$. Dans ce cas, le mémento des pertes de charge donne l'expression qui suit pour le coefficient ξ_{gar} .

$$\xi_{gar} = \left[\xi_{\varphi} + \bar{\varepsilon}_0^{Re} (\xi_0 - \bar{f})^2 \right] \frac{1}{\bar{f}^2} \quad (8)$$

Avec :

$$\xi_0 = 1 + 0.707 \sqrt{1 - \bar{f}} \quad (9)$$

Et :

$$\bar{f} = \frac{F_0}{F_1} = o_{la} \quad (10)$$

Où :

o_{la} [1] est l'ouverture de la grille anti-rongeur comprise en 0 et 1

Les paramètres $\bar{\varepsilon}_0^{Re}$ et ξ_{φ} sont définis par le tableau suivant en fonction des valeurs du nombre de Reynolds Re et de l'ouverture de la grille anti-rongeur $\frac{F_0}{F_1} = o_{la}$.

¹ (DUGUE, 2013) : *Chapitre 2.8 : Analyse qualitative de l'écoulement*

Tableau 6 : Détermination des paramètres pour le calcul du coefficient de perte de charge singulière pour la grille anti-rongeur, Mémento des pertes de charge

Re	2,5.10	4.10	6.10	10 ²	2.10 ²	4.10 ²	10 ³	2.10 ³	4.10 ³	10 ⁴	2.10 ⁴	10 ⁵	2.10 ⁵	> 10 ⁵
$\overline{\epsilon Re}_0$	0,34	0,36	0,37	0,40	0,42	0,46	0,53	0,59	0,64	0,74	0,81	0,94	0,96	0,98
$\frac{F_0}{F_1}$	Valeur de ξ_ψ													
0	1,94	1,38	1,14	0,89	0,69	0,64	0,39	0,30	0,22	0,15	0,11	0,04	0,01	0
0,2	1,78	1,36	1,05	0,85	0,67	0,57	0,36	0,26	0,20	0,13	0,09	0,03	0,01	0
0,3	1,57	1,16	0,88	0,75	0,57	0,43	0,30	0,22	0,17	0,10	0,07	0,02	0,01	0
0,4	1,35	0,99	0,79	0,57	0,40	0,28	0,19	0,14	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0
0,5	1,10	0,75	0,55	0,34	0,19	0,12	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0
0,6	0,85	0,56	0,30	0,19	0,10	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0
0,7	0,58	0,37	0,23	0,11	0,06	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0
0,8	0,40	0,24	0,13	0,06	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0
0,9	0,20	0,13	0,08	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,95	0,03	0,03	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

L'illustration suivante présente la localisation de la perte de charge au niveau des éléments du contre-lattage horizontal.

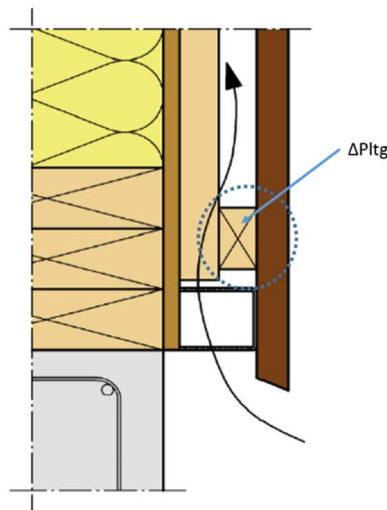


Illustration 18 : Perte de charge singulière au niveau du contre-lattage de la lame d'air ventilée

La perte de charge obtenue pour un élément de contre-lattage est à multiplier par le nombre d'éléments effectivement présent le long de la cavité d'air. L'expression de la perte de charge totale due au contre-lattage est alors la suivante :

$$\Delta P_{ltg} = n \xi_{ltg} \frac{\rho v^2}{2} \quad (11)$$

Avec :

$$n = \frac{H_{la}}{ent} \quad (12)$$

Où :

ξ_{ltg} [1] est le coefficient de perte de charge pour un élément de contre-lattage

n [1] est le nombre d'élément de contre-lattage présents le long de la lame d'air ventilée

H_{la} [m] est la hauteur de la lame d'air

ent [m] est l'entraxe des éléments de contre-lattage qui est considéré égal 0.6 m dans la suite de cette étude

La présence d'un élément de contre-lattage horizontal est considérée comme un diaphragme à bords épais dans une conduite rectiligne. Pour ce type de singularité, le Mémento des pertes de charge donne l'expression suivante pour le coefficient de perte de charge :

$$\xi_{ltg} = \left(\xi_{\varphi} + \bar{\varepsilon}_0^{Re} \xi_0 + \lambda \frac{l}{D_H} \right) \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2 \quad (13)$$

Si les pertes de charge par frottement dans la section réduite sont négligées et l'épaisseur des ossatures primaire et seconde sont égales ($\frac{F_1}{F_0} = 2$), la formule précédente devient :

$$\xi_{ltg} = (\xi_{\varphi} + \bar{\varepsilon}_0^{Re} \times 1.5) \times 4 \quad (14)$$

Les paramètres $\bar{\varepsilon}_0^{Re}$ et ξ_{φ} sont définis par le Tableau 6 en fonction des valeurs du nombre de Reynolds Re et de $\frac{F_0}{F_1} = 0.5$.

L'illustration suivante présente la localisation de la perte de charge au niveau de la bavette en partie haute de la cavité d'air.

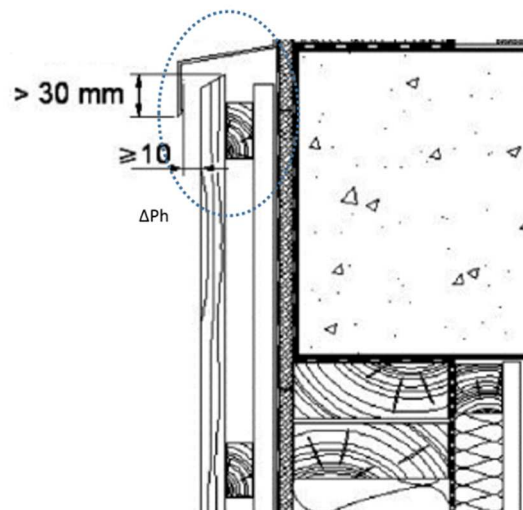


Illustration 19 : Perte de charge singulière au niveau de la bavette en partie haute de la cavité d'air

L'expression du coefficient de perte de charge de cette singularité est issue des travaux de J. Falk et K. Sandin. Ils ont déterminé expérimentalement les coefficients de perte de charge pour différentes géométries de bavette. Celles-ci sont représentées sur l'illustration 20.

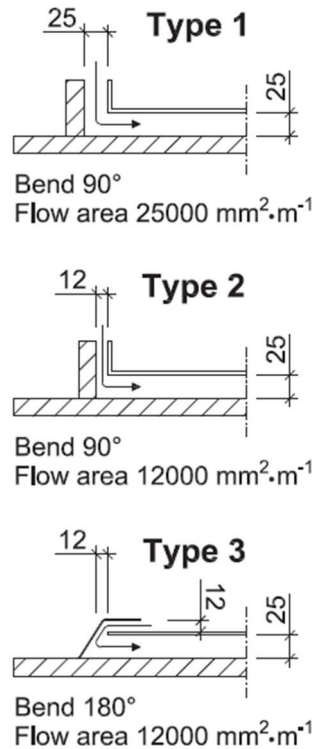


Illustration 20 : Types de bavette étudiés par J. Falk et K. Sandin

Le type 3 représente le mieux ce qui est couramment employé. C'est cette géométrie qui est retenue. Les résultats obtenus par J. Falk et K. Sandin donnent l'expression suivante pour le coefficient de perte de charge au niveau de ce type de bavette :

$$\xi_h = 16.8 - 4.3v \quad (15)$$

Où :

v [m/s] est la vitesse de l'air dans la cavité

2.3. Bardages ajourés

Dans le cas d'un bardage ajouré, une partie du rayonnement incident sur le mur est directement transmise sur la paroi support du bardage. La modélisation retenue tient compte de cette particularité en considérant l'ouverture entre les lames du bardage. Pour déterminer la partie directement transmise à la paroi support, le rayonnement incident est multiplié par le coefficient de transmission direct du bardage τ_ϕ . Ce paramètre est nul pour un bardage non ajouré. La valeur τ_ϕ est dynamique et est fonction de la position du soleil dans le ciel par rapport au mur. Aussi sa valeur dépend de l'orientation des lames du bardage et donc des ouvertures qui peuvent être horizontales ou verticales. Dans ce travail, les bardages ajourés à lames obliques qui ne sont que rarement employés ne sont pas considérés.

2.3.1. Lames horizontales

Dans le cas d'un bardage à lames horizontales, celles-ci sont considérées de largeur 100 mm pour le calcul de τ_{ϕ} . Les lames sont également considérées chanfreinées à 30° comme recommandé dans le DTU 41.2 (Illustration 4). L'illustration suivante présente la modélisation retenue pour le calcul du coefficient de transmission direct d'un bardage ajouré à lames horizontales.

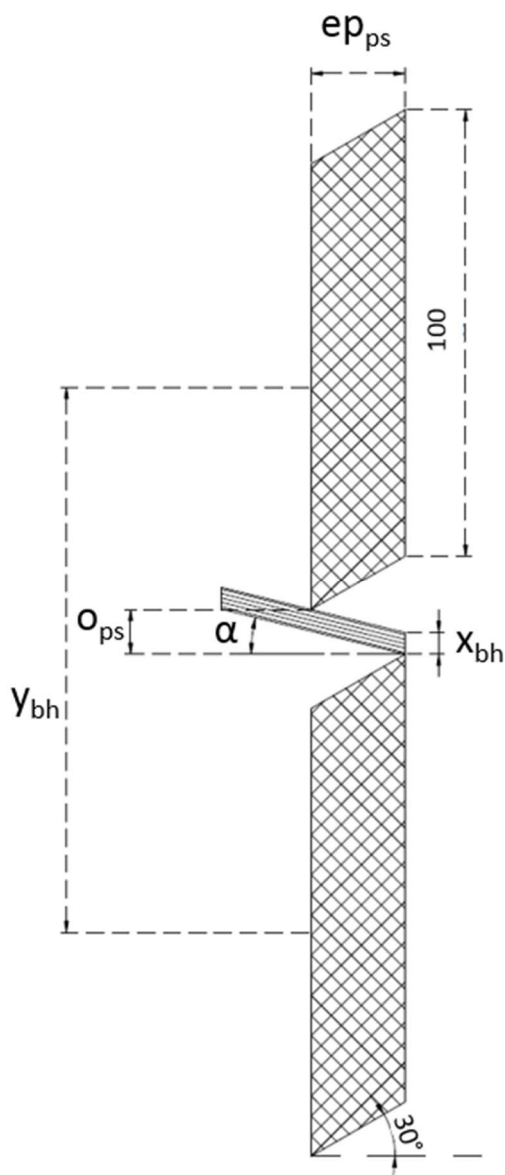
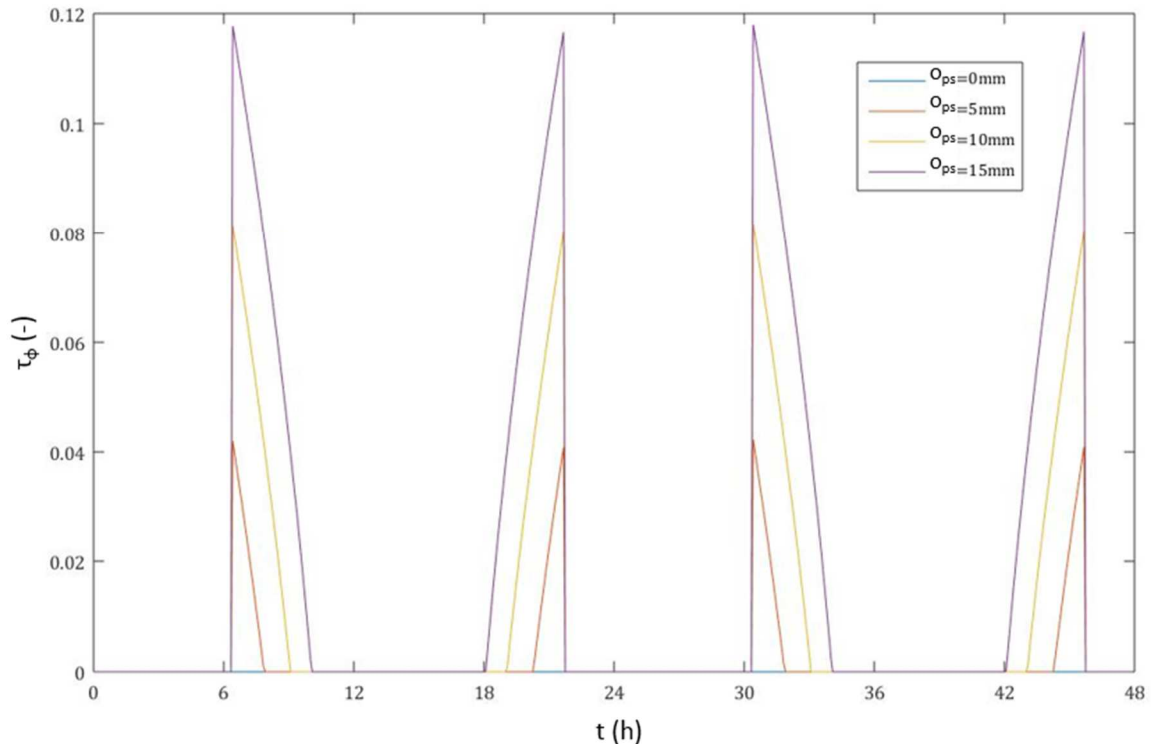


Illustration 21 : Modélisation d'un bardage ajouré à lames horizontales

Sur l'illustration 21, le paramètre α représente la hauteur du soleil dans le ciel, o_{ps} l'ouverture des joints du bardage et ep_{ps} son épaisseur. L'expression du coefficient de transmission direct est alors la suivante :

$$\tau_{\phi} = \begin{cases} 0 & \text{si } \alpha \geq \tan^{-1}\left(\frac{o_{ps}}{ep_{ps}}\right) \\ \frac{x_{bh}}{y_{bh} \times \cos \alpha} = \frac{o_{ps} - ep_{ps} \times \tan \alpha}{(100 + o_{ps} + ep_{ps} \times \tan 30^{\circ}) \times \cos \alpha} & \text{sinon} \end{cases} \quad (16)$$

Le graphique suivant présente l'évolution sur deux jours du paramètre τ_{ϕ} obtenue pour un bardage ajouré à lames horizontales orienté Sud d'épaisseur 20 mm pour différentes valeurs d'ouverture des joints o_{ps} .



Graphique 1 : Evolution du coefficient de transmission pour un bardage ajouré à lames horizontales

Sur le Graphique 1, il est possible de constater que le coefficient de transmission direct atteint sa valeur maximale à deux reprises dans la journée, le matin et le soir. Il s'agit des moments où la hauteur du soleil est suffisante et pas trop importante pour permettre aux rayons du soleil de passer au travers des ouvertures du bardage. Aussi, plus l'ouverture des joints est grande plus le temps pendant lequel une partie des rayons atteint directement la paroi est important et plus la valeur maximale atteinte par le paramètre τ_{ϕ} est élevée.

2.3.2. Lames verticales

Dans le cas d'un bardage à lames verticales, celles-ci sont considérées de largeur 100 mm pour le calcul de τ_{ϕ} . Les lames ne sont pas chanfreinées. L'illustration suivante présente la modélisation retenue pour le calcul du coefficient de transmission direct d'un bardage ajouré à lames verticales.

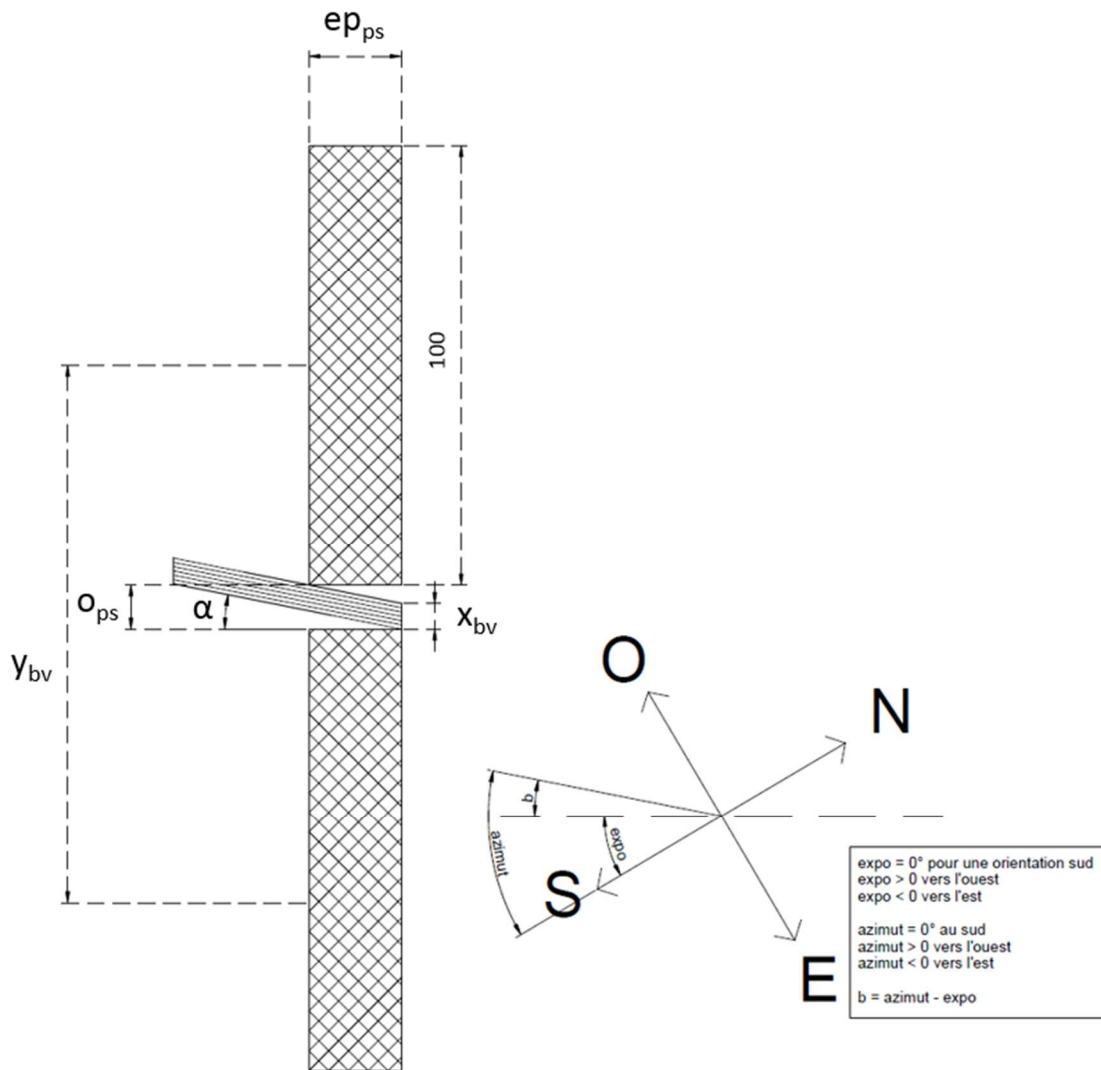
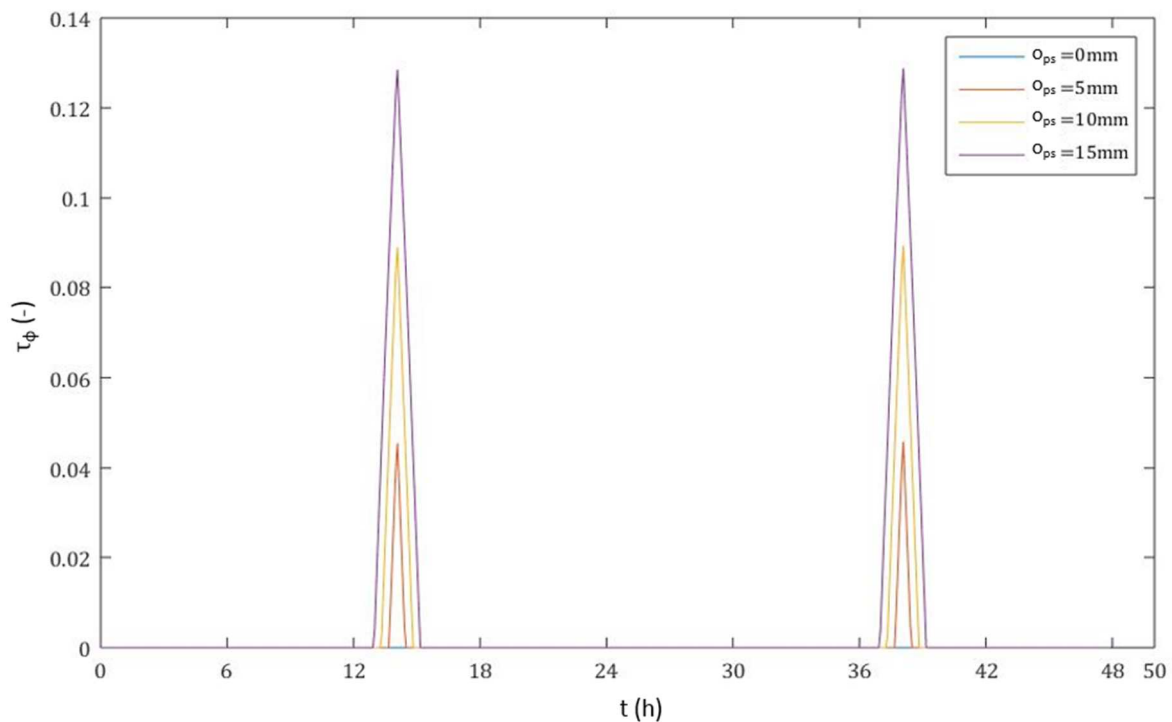


Illustration 22 : Modélisation d'un bardage ajouré à lames verticales

Sur l'illustration 22, le paramètre b dépend de l'azimut du soleil et de l'exposition de la paroi notés respectivement $azimut$ et $expo$. Comme pour les bardages à lames horizontales, les paramètres o_{ps} et ep_{ps} correspondent à l'ouverture des joints du bardage et à son épaisseur. L'expression du coefficient de transmission direct est alors la suivante :

$$\tau_{\phi} = \begin{cases} 0 & \text{si } |azimut - expo| \geq \tan^{-1} \left(\frac{o_{ps}}{ep_{ps}} \right) \\ \frac{x_{bv}}{y_{bv}} = \frac{o_{ps} - ep_{ps} \times \tan|azimut - expo|}{100 + o_{ps}} \sin \alpha & \text{sinon} \end{cases} \quad (17)$$

Le graphique suivant présente l'évolution sur deux jours du paramètre τ_{ϕ} obtenue pour un bardage ajouré à lames verticales d'épaisseur 20 mm et orienté Sud pour différentes valeurs d'ouverture des joints o_{ps} .



Graphique 2 : Evolution du coefficient de transmission pour un bardage ajouré à lames verticales

Le Graphique 2 montre que le coefficient de transmission direct atteint sa valeur maximale une fois en milieu de journée. Il s'agit de l'instant pendant lequel, dans un plan horizontal, les rayons du soleil sont perpendiculaires à la surface du mur. Il est également possible d'observer sur ce graphique que plus l'ouverture des joints est grande plus le temps pendant lequel une fraction des rayons atteint directement le mur support est important et plus la valeur maximale atteinte par le paramètre τ_{ϕ} est élevée.

3. DONNEES D'ENTREE DU MODELE

La modélisation du système de paroi avec bardage et lame d'air ventilée qui vient d'être présentée nécessite plusieurs données d'entrées. Celles-ci décrivent la géométrie du système, les propriétés des matériaux ainsi que les conditions aux limites du système. Il existe également des paramètres de simulation tel que le nombre de mailles utilisé pour discrétiser une couche de matériau ou encore le nombre de couches définissant le mur support du bardage. Ces paramètres et les valeurs retenues sont décrits dans le mémoire de Thèse d'Antoine Dugué. Des valeurs identiques sont retenues dans cette étude pour ces paramètres de simulation.

3.1. Géométrie du système

Les données géométriques du modèle sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Paramètres géométriques du système

Notation	Description	Unité
ep_{ps}	Epaisseur du bardage	[m]
ep_{la}	Epaisseur de la lame d'air	[m]
H_{la}	Hauteur de la lame d'air	[m]
o_{la}	Facteur d'ouverture de la lame d'air	[1]
o_{ps}	Ouverture des joints entre lames	[m]
t_{oss}	Type de l'ossature support du bardage	{1 : bardage sur ossature verticale ; 2 : bardage sur contre ossature horizontale}

Le facteur d'ouverture de la lame d'air o_{la} et le type de l'ossature support du bardage t_{oss} sont des paramètres introduits dans le modèle pour le calcul des pertes de charge singulières. L'ouverture des joints entre les lames du bardage o_{ps} (> 0 dans le cas d'un bardage ajouré) permet de caractériser la part du rayonnement incident sur le mur qui est directement transmis sur la paroi support du bardage. Pour un bardage ajouré, lorsque le type d'ossature est égal à $t_{oss} = 1$ les lames sont considérées horizontales. Les lames du bardage sont considérées verticale quand $t_{oss} = 2$.

3.2. Propriétés des matériaux

Les matériaux définissant le bardage et le mur support ainsi que l'air circulant dans la cavité ventilée sont définis par les trois propriétés que sont la conductivité thermique λ , la masse volumique ρ et la capacité thermique massique c_p . A celles-ci s'ajoutent les propriétés radiatives des surfaces comme présenté dans le tableau suivant.

Tableau 8 : Propriétés radiatives des surfaces du bardage et de la face externe du mur support

Notation	Description	Unité
$\tau_{ps,CLO}$	Coefficient de transmission du bardage pour les courtes longueurs d'onde	[1]
$\tau_{ps,GLO}$	Coefficient de transmission du bardage pour les grandes longueurs d'onde	[1]
$\alpha_{ps,CLO}$	Coefficient d'absorption solaire du bardage	[1]
$\varepsilon_{ps,GLO}$	Emissivité du bardage pour les grandes longueurs d'onde	[1]
$\alpha_{mur,CLO}$	Coefficient d'absorption solaire de la face externe du mur support	[1]
$\varepsilon_{mur,GLO}$	Emissivité de la face externe du mur support pour les grandes longueurs d'onde	[1]

Les coefficients de transmission de mur support sont considérés nuls. Aussi, de ces propriétés radiatives dépendent les coefficients de réflexion pour les grandes et courtes longueurs d'onde et les coefficients d'absorption pour les grandes longueurs d'onde. Pour les déterminer sont utilisés :

- Le bilan d'énergie : La somme des coefficients d'absorption, de réflexion et de transmission est égale à 1
- L'hypothèse du corps gris basée sur la loi du rayonnement de Kirchoff : le coefficient d'émissivité est égal au coefficient d'absorption pour les grandes longueurs d'onde.

3.3. Conditions aux limites

Les conditions aux limites, c'est-à-dire les conditions du côté extérieur et intérieur du mur avec bardage, sont également des données d'entrée du modèle. Côté extérieur les sollicitations sont définies par un fichier météo qui donne en fonction du temps :

- La densité de rayonnement incident total en CLO
- La vitesse de vent extérieur
- La température de l'air extérieur

- La température de brillance de ciel, calculée à partir de la température de l'air extérieur

Côté intérieur, une température de consigne est imposée. Celle-ci est maintenue constante par une charge de chauffage ou de rafraichissement.

4. CALCUL DU FACTEUR SOLAIRE

L'utilisation du modèle décrit précédemment a pour objectif le calcul du facteur solaire du bardage seul, autrement dit le coefficient correctif à appliquer sur le facteur solaire de la paroi nue pour considérer l'effet du bardage. L'expression du facteur solaire total du mur avec bardage est alors la suivante :

$$F_S = F'_{S,ps} \times F_{S,mur} \quad (18)$$

Où :

$F'_{S,ps}$ est le coefficient correctif / facteur solaire du bardage

$F_{S,mur}$ est le facteur solaire du mur seul

Le facteur solaire d'une paroi est défini comme étant le rapport entre l'énergie due au rayonnement solaire transmise au local et l'énergie incidente sur la paroi (Illustration 10). Il traduit les échanges associés à la sollicitation radiative solaire (courtes longueurs d'onde). Or, le modèle utilisé ne permet pas directement d'isoler ces sollicitations radiatives des autres transferts associés aux sollicitations extérieures. La détermination du facteur solaire se fait donc de manière indirecte suivant la méthode proposée par B. HELLSTROM et al. La paroi étudiée est associée à une zone thermique pour laquelle toutes les autres parois sont considérées adiabatiques. Il n'y a pas d'inertie intérieure. Les consignes de températures haute et basse sont fixées à 20°C. De la sorte les puissances de chaud et froid nécessaires au maintien de la température de consigne correspondent à la compensation du flux de chaleur total transmis par la paroi. La méthode consiste alors à réaliser sur une période donnée deux simulations, la première en considérant un rayonnement solaire incident et la seconde sans ce rayonnement. L'expression du facteur solaire est alors la suivante :

$$F_S = \frac{(C_o - H_e)_1 - (C_o - H_e)_0}{S \times I_s} \quad (19)$$

Où :

L'indice 1 représente la simulation avec rayonnement solaire incident

L'indice 0 représente la simulation sans rayonnement solaire incident

H_e [W/m^2] est la charge de chauffage

C_o [W/m^2] est la charge de rafraichissement

S [m^2] est la surface de la zone thermique

I_s [W] est le rayonnement incident

Pour définir le facteur solaire du bardage seul la méthode proposée par B. HELLSTROM et al est alors utilisée une première fois pour définir le facteur solaire de la paroi munie du bardage F_S puis une seconde pour définir le facteur solaire du mur nu $F_{S,mur}$. La relation suivante est ensuite utilisée pour obtenir le facteur solaire du bardage seul :

$$F'_{S,ps} = \frac{F_S}{F_{S,mur}} \quad (20)$$

La détermination du coefficient correctif associé à une protection solaire nécessite donc de réaliser les 4 simulations suivantes à partir du modèle présenté précédemment :

- Simulation du mur avec bardage avec prise en compte du rayonnement
- Simulation du mur avec bardage sans prise en compte du rayonnement
- Simulation du mur nu avec prise en compte du rayonnement
- Simulation du mur nu sans prise en compte du rayonnement

Il faut remarquer une distinction entre le facteur solaire $F'_{S,ps}$ du bardage et le coefficient correctif $F_{S,ps}$ utilisé dans l'équation (3). Si la méthode proposée par les Règles Th-S pour le calcul du facteur solaire d'une paroi opaque (équation (1)) est introduite dans l'équation (18) la relation suivante est obtenue :

$$F_S = F'_{S,ps} \times F_{S,mur} = F'_{S,ps} \times \alpha_{k,mur} \times R_{se-E} \times U_{k-E} \quad (21)$$

Les équations (3) et (21) conduisent à la relation suivante :

$$F_{S,ps} = F'_{S,ps} \times \alpha_{k,mur} \quad (22)$$

Le facteur solaire du bardage $F'_{S,ps}$ calculé à partir de la méthode présentée précédemment dépend du coefficient d'absorption solaire de la face externe du mur extérieur. Pour illustrer cette particularité, il est proposé de considérer deux parois avec bardage P_1 et P_2 . La seule différence entre ces deux parois porte sur la valeur du coefficient d'absorption solaire de la face externe du mur support ($\alpha_{mur,P_1} = 0,6$ et $\alpha_{mur,P_2} = 0,9$). Dans le cas d'un bardage non ajouré, il n'y a pas d'échange radiatif en CLO entre la face interne du bardage et la face externe du mur support. La valeur du facteur solaire de la paroi avec bardage ne sera alors pas affectée par la valeur du coefficient d'absorption solaire et donc $F_{S,P_1} = F_{S,P_2}$. Cependant, le coefficient d'absorption solaire aura une incidence sur le facteur solaire de la paroi sans bardage et puisque $\alpha_{mur,P_1} < \alpha_{mur,P_2}$ alors $F_{S,mur,P_1} < F_{S,mur,P_2}$. Donc si le facteur solaire du bardage est calculé à partir de l'équation (20) le résultat attendu est logiquement $F_{S,ps,P_1} > F_{S,ps,P_2}$. Afin que le facteur solaire du bardage soit utilisé tel quel dans l'équation (3), il convient, lors de l'utilisation du modèle physique, de considérer $\alpha_{mur} = 1$. De la sorte l'équation (22) devient :

$$F_{S,ps} = F'_{S,ps} \times \alpha_{k,mur} = F'_{S,ps} \times 1 = F'_{S,ps} \quad (23)$$

Et donc l'équation (3) devient :

$$F_S = F_{S,ps} \times R_{se-E} \times U_{k-E} = F'_{S,ps} \times R_{se-E} \times U_{k-E} \quad (24)$$

Dans le cas d'un bardage ajouré la face externe du mur support va capter une partie du rayonnement solaire. La valeur du facteur solaire de la paroi avec bardage F_S dépendra donc en partie du coefficient d'absorption solaire de la face externe du mur support $\alpha_{k,mur}$ qui est considérée égale à l'unité. Cette valeur semble également convenir dans le cas d'un bardage ajouré car dans cette configuration le mur support est dans la majorité des cas recouvert d'un pare-pluie de couleur foncée. Celui-ci possède alors un coefficient d'absorption solaire compris entre 0,8 et 1. La méthode proposée aura alors légèrement tendance à surestimer le facteur solaire de la paroi avec bardage ajouré.

PARTIE 2 : ANALYSE DU MODELE

Dans la première partie du chapitre 2 la modélisation du mur avec bardage ainsi que la méthode de calcul du coefficient correctif ont été présentés. Ce dernier est calculé en considérant un fichier météo ainsi qu'une composition précise du mur support du bardage. Aussi, des paramètres de calcul comme la température de consigne du local doivent être fixés. Il est donc naturel de s'interroger sur le caractère intrinsèque de la valeur du coefficient correctif calculé. Or, ce coefficient est amené à décrire l'effet du bardage sur tout type de mur support dans tout type de condition. Cette seconde partie s'attache à discuter du caractère intrinsèque du coefficient correctif calculé. Les valeurs obtenues sont également comparées aux valeurs des coefficients de correction $K_{corr_{la}}$ donnés dans les Règles Th-S.

1. CARACTERE INTRINSEQUE DU FACTEUR SOLAIRE

La méthode de détermination du coefficient correctif solaire associé à une configuration de bardage nécessite de fixer les paramètres suivants :

- Température de consigne à l'intérieur du local
- Sollicitations extérieures par l'intermédiaire d'un fichier météo
- Composition du mur support du bardage

Le coefficient correctif obtenu est amené à décrire l'influence du bardage quel que soit le mur support ou les conditions intérieure et extérieure. Il paraît alors important d'évaluer son caractère intrinsèque vis-à-vis des paramètres fixés lors de l'application de cette méthode. A cette fin, il est proposé d'étudier la sensibilité du coefficient correctif à des modifications de ces paramètres. Pour cette étude plusieurs configurations de bardage sont étudiées. Elles correspondent à celles décrites dans le tableau des Règles Th-S qui donne les différentes valeurs des coefficients correctifs (Tableau 3). Seules les configurations pour lesquelles l'épaisseur de la lame d'air est égale à 0 m et 0,5 m ne sont pas considérées car elles ne correspondent à des cas d'application courante. Les configurations étudiées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Configurations retenues pour l'étude du caractère intrinsèque du coefficient correctif

Configuration	ep_{la} [mm]	$\alpha_{ps,CLO}$ [1]	H_{la} [m]
1	0,05	0,4	2
2	0,1	0,4	2
3	0,05	0,8	2
4	0,1	0,8	2
5	0,05	0,4	10
6	0,1	0,4	10
7	0,05	0,8	10
8	0,1	0,8	10

La méthode de détermination du coefficient correctif proposée dans cette étude nécessite que soient définis des paramètres géométriques supplémentaires. Ceux-ci sont fixés aux valeurs suivantes :

- Epaisseur du bardage $ep_{ps} = 0,025$ m
- Facteur d'ouverture de la lame d'air $o_{la} = 0,5$

- Ouverture des joints entre lames $o_{ps} = 0 \text{ m}$ (pas de bardage à claire-voie)
- Type d'ossature support du bardage $t_{oss} = 1$ (bardage sur ossature verticale)

Le matériau retenu pour le bardage est du bois résineux massif qui possède les caractéristiques présentées dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Propriétés retenues pour le bois résineux massif

Notation	Description	Valeur
λ	Conductivité thermique	0,201 W/(m.K)
ρ	Masse volumique	560 kg/m ³
c_p	Capacité thermique massique	1300 J/(kg.K)
τ_{CLO}	Coefficient de transmission pour les courtes longueurs d'onde	0
τ_{GLO}	Coefficient de transmission pour les grandes longueurs d'onde	0
ε_{GLO}	Emissivité pour les grandes longueurs d'onde	0,86

Pour l'étude de la sensibilité à la température de consigne et aux sollicitations extérieures, la composition de la paroi support du bardage est fixée. Il s'agit d'une paroi composée d'une couche de béton côté intérieur de 20 cm et une couche d'isolant de type laine de verre côté extérieur de 20 cm également. Les propriétés retenues pour ces matériaux sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau 11 : Propriétés retenues pour le béton

Notation	Description	Valeur
λ	Conductivité thermique	1 W/(m.K)
ρ	Masse volumique	2200 kg/m ³
c_p	Capacité thermique massique	1000 J/(kg.K)
ε_{GLO}	Emissivité pour les grandes longueurs d'onde	0,9
α_{CLO}	Coefficient d'absorption solaire	1

Tableau 12 : Propriétés retenues pour l'isolant

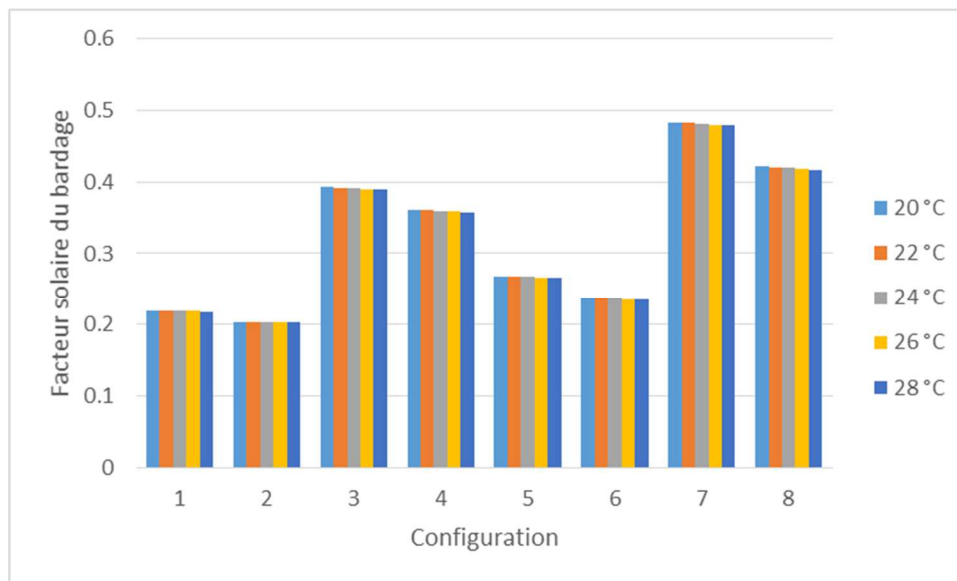
Notation	Description	Valeur
λ	Conductivité thermique	0,04 W/(m.K)
ρ	Masse volumique	19,4 kg/m ³
c_p	Capacité thermique massique	1030 J/(kg.K)
ε_{GLO}	Emissivité pour les grandes longueurs d'onde	0,9
α_{CLO}	Coefficient d'absorption solaire	1

Pour l'étude de la sensibilité à la température de consigne et à la composition du mur support, les conditions climatiques sont fixées. La durée de la simulation permettant de déterminer le coefficient correctif sur le facteur solaire est de 13 jours et le coefficient est calculé sur les 7 derniers. Les données climatiques sont celles qui ont été enregistrées à Talence (33) lors du travail de Thèse d'Antoine Dugué. Le protocole de collecte de ces données est présenté dans le mémoire de Thèse. Les données climatiques ont été enregistrées entre le 1 juillet 0:00 h et le 14 juillet 0:00 h 2012.

Pour l'étude de la sensibilité aux sollicitations extérieures et à la composition de la paroi, la température de consigne intérieure est fixée à 20 °C.

1.1. Sensibilité à la température de consigne

Pour les 8 configurations présentées dans le Tableau 9, le coefficient correctif sur facteur solaire est calculé en considérant 5 températures de consigne différentes. Cette température varie de 20 à 28 °C par pas de 2 °C. Le graphique suivant présente les résultats obtenus :



Graphique 3 : Sensibilité du facteur solaire du bardage à la température de consigne

Les résultats obtenus montrent une très faible sensibilité à la température de consigne du coefficient correctif sur facteur solaire. L'écart maximum est de seulement 1,15 % pour la configuration de bardage 4. Il est aussi possible d'observer que l'augmentation de la température de consigne tend à faire diminuer la valeur du facteur solaire.

1.2. Sensibilité aux sollicitations extérieures

Le fichier météo se compose des trois grandeurs suivantes définies pour un pas de temps de 5 minutes :

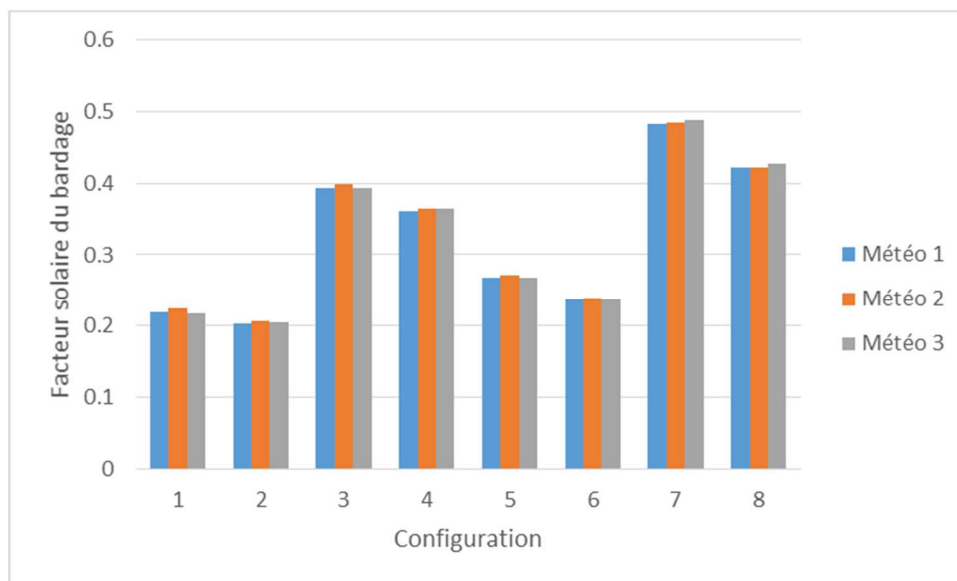
- L'éclairement [W/m²]
- La température de l'air extérieur [°C]
- La vitesse du vent [m/s]

Pour les différentes configurations de bardage, le facteur solaire est calculé en considérant 3 fichiers météo différents. Le premier est basé sur les mesures effectuées sur le site de Talence (33) et les deux autres en sont des variantes. Pour les deux variantes, les données sont augmentées ou réduites de 25 % par rapport au fichier de base comme présenté dans le tableau suivant.

Tableau 13 : Constitution des fichiers météo pour l'étude de la sensibilité du facteur solaire aux sollicitations extérieures

Fichier météo	Variante
1	Fichier de base
2	Eclairement : + 25 % Température : + 25 % Vitesse du vent : - 25 %
3	Eclairement : - 25 % Température : - 25 % Vitesse du vent : + 25 %

Le graphique suivant présente les résultats obtenus :



Graphique 4 : Sensibilité du facteur solaire du bardage au fichier météo

Pour les trois fichiers météo considérés, le facteur solaire du bardage est similaire. L'écart maximum est observé pour la configuration de bardage 1 et n'est que de 3,44 %.

1.3. Sensibilité à la composition de la paroi support

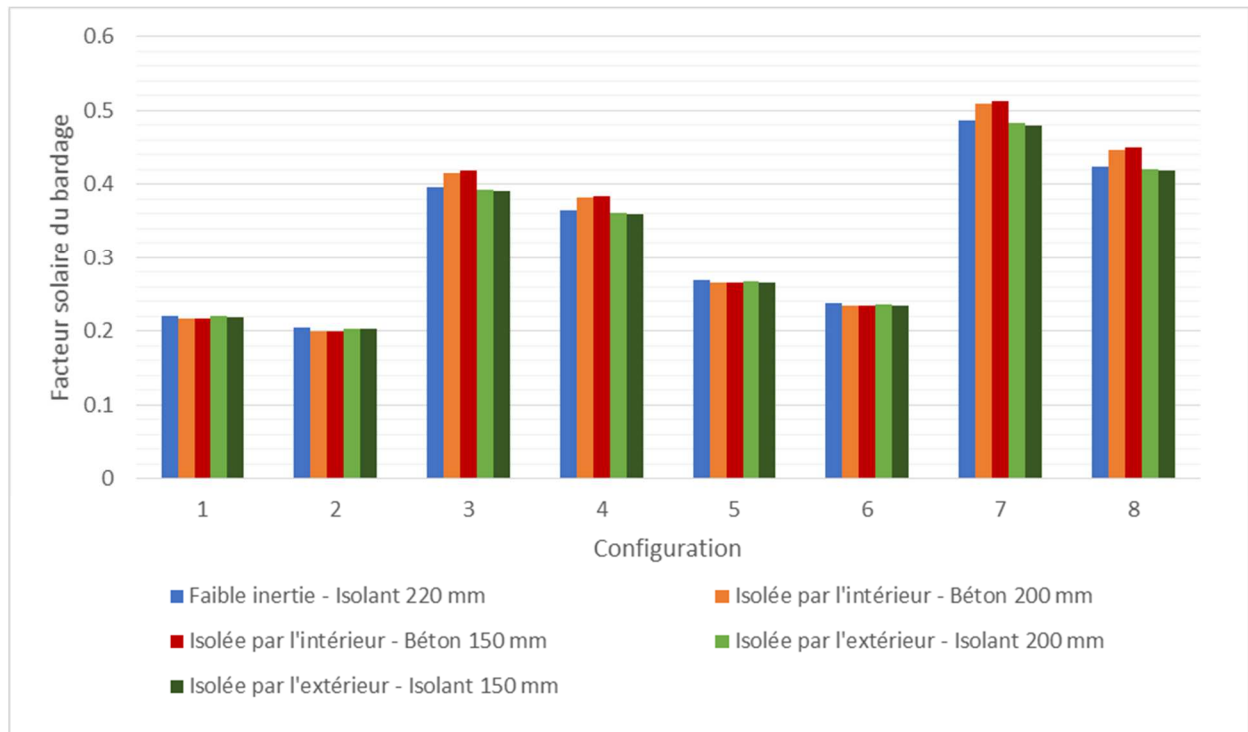
Le niveau d'isolation de la paroi ainsi que son inertie sont des paramètres qui sont susceptibles d'avoir une influence sur la détermination du facteur solaire du bardage. Pour les 8 configurations présentées dans le Tableau 9, il est alors proposé de calculer ce facteur en considérant 3 types de parois. Pour celles-ci plusieurs variantes sont étudiées ce qui représente au total 5 configurations de paroi. Celles-ci sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 14 : Configurations de paroi pour l'étude de la sensibilité du facteur solaire du bardage

Type	N°	Composition (ext->int)
Paroi à faible inertie (type ossature bois)	1	- Isolant : 220 mm
Paroi à forte inertie isolée par l'intérieur (type mur béton)	2	- Béton : 200 mm - Isolant : 200 mm
	3	- Béton : 150 mm - Isolant : 200 mm
Paroi à forte inertie isolée par l'extérieur (type mur béton)	4	- Isolant : 200 mm - Béton : 200 mm
	5	- Isolant : 150 mm - Béton : 200 mm

Les propriétés du béton et de l'isolant sont celles données dans le Tableau 11 et le

Tableau 12. Dans le cas des parois à forte inertie il a été choisi de faire varier la couche en contact avec la lame d'air du bardage. Il a été constaté que c'est la nature de cette couche qui impacte le plus fortement la détermination du facteur solaire du bardage. Le graphique suivant présente les résultats obtenus.



Graphique 5 : Sensibilité du facteur solaire du bardage à la composition du mur support

Sur le graphique précédent, il est possible d'observer que le facteur solaire du bardage est peu sensible aux compositions de paroi support étudiées. L'écart maximum est de 7,38 % pour la configuration de bardage 8. La valeur maximale est alors obtenue pour un mur support isolée par l'intérieur avec une couche de béton de 150 mm et la valeur minimale pour un mur support isolée par l'extérieur avec une couche d'isolant de 150 mm. Pour une paroi isolée par l'intérieur ou par l'extérieur, l'épaisseur de la couche extérieure n'impacte que très faiblement la valeur du facteur solaire. La différence est toujours inférieure à 1 %.

1.4. Conclusion sur le caractère intrinsèque du facteur solaire

Les résultats obtenus montrent que le facteur solaire du bardage est très peu sensible à la consigne de température intérieure. Des compositions de paroi très différentes ont été étudiées et il apparaît que le facteur solaire dépend que très légèrement de celles-ci. Enfin pour les 3 fichiers météo considérés, les valeurs du facteur solaire sont similaires. Pour les cas étudiés les écarts observés ne dépassent pas les 8 %.

De ce fait, il semble pertinent de conclure favorablement sur le caractère intrinsèque du facteur solaire du bardage obtenu. Ce facteur est alors considéré décrire l'impact d'un bardage sur une paroi quelles que soient les conditions extérieures et intérieures ainsi que pour tout type de mur support. Dans la suite de cette étude les simulations sont menées en considérant une température de consigne intérieure de 20 °C et une paroi support composée d'une couche intérieure de béton de 200 mm et

d'une couche extérieure d'isolant de 200 mm également. Le fichier météo considéré correspondant aux relevés effectués à Talence sur une période de 13 jours. Le facteur solaire est calculé sur les 7 derniers jours de cette période.

2. COMPARAISON AUX REGLES TH-S

Il s'agit ici de comparer les résultats fournis par le modèle aux coefficients correctifs sur facteur solaire renseignés dans les Règles Th-S. Ceux-ci sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau 15 : Coefficients de correction sur facteur solaire, Règles Th-S

	H_{la} (m)			
	2 ou moins		10 ou plus	
e_{la} (m)	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$
0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,05	0,70	0,65	0,70	0,70
0,1	0,65	0,60	0,65	0,60
0,5	0,60	0,55	0,55	0,50

Dans le cadre de cette comparaison, les valeurs données pour une épaisseur de lame d'air égale à 0 m et à 0,5 m ne sont pas étudiées car elles ne correspondent pas à des cas courants d'application. De plus, la modélisation du bardage considérée tient compte de paramètres supplémentaires que n'intègrent pas les Règles Th-S. Pour cette comparaison les valeurs données dans le tableau suivant sont retenues. Celles-ci décrivent une configuration de bardage classique à joints fermés pour laquelle les lames sont posées sur une ossature verticale. Le matériau considéré pour la peau du bardage correspond à du bois résineux massif qui possède les caractéristiques présentées dans le Tableau 10.

Tableau 16 : Valeurs retenues pour les paramètres propres au modèle dans le cadre de la comparaison aux Règles Th-S

Notation	Description	Valeur
ep_{ps}	Epaisseur du bardage	0,025 m
o_{la}	Facteur d'ouverture de la lame d'air	0,5
o_{ps}	Ouverture des joints entre lames	0 m
t_{oss}	Type de l'ossature support du bardage	1

La relation liant le coefficient de correction $K_{corr_{la}}$ au coefficient correctif $F_{S,ps}$ est donnée par l'équation (4). Les résultats fournis par le modèle permettent de construire le tableau comparatif suivant où les valeurs en bleu sont celles des Règles Th-S ($\alpha_k K_{corr_{la}}$) et les valeurs en vert celles issues des simulations ($F_{S,ps}$).

Tableau 17 : Comparaison des facteurs solaires fournis par les Règles Th-S (en bleu) à ceux obtenus à partir du modèle (en vert)

	$H_{la} = 2\text{ m}$		$H_{la} = 10\text{ m}$	
	$\alpha_{ps,CLO} = 0,4$	$\alpha_{ps,CLO} = 0,8$	$\alpha_{ps,CLO} = 0,4$	$\alpha_{ps,CLO} = 0,8$
$ep_{la} = 0,05\text{ m}$	0,28 / 0,22	0,52 / 0,39	0,28 / 0,27	0,56 / 0,48
$ep_{la} = 0,1\text{ m}$	0,26 / 0,20	0,48 / 0,36	0,26 / 0,24	0,48 / 0,42

La première observation qui peut être faite porte sur l'écart entre les valeurs des Règles Th-S et celles données par le modèle. Pour un coefficient d'absorption égal à 0,8 les valeurs issues du modèle sont en moyenne 19 % plus faibles que celles des Règles Th-S. N'ayant pas d'information concernant l'origine des valeurs fournies dans les Règles Th-S, aucune explication à cet écart ne peut être avancée. Si les valeurs issues du modèle sont considérées comme fiables, il apparaît que les Règles Th-S surestiment le facteur solaire des parois avec bardage ce qui a tendance en été à favoriser l'augmentation de la température intérieure.

Pour ce qui est de l'impact de l'épaisseur de la lame d'air, le modèle et les Règles Th-S donnent des tendances similaires. L'augmentation de ce paramètre a pour effet de réduire le coefficient correctif. Plus l'épaisseur de la lame d'air est importante plus la part radiative transmise à la paroi sera faible (diminution du coefficient correctif).

Les valeurs fournies par les Règles Th-S montrent une faible influence de la hauteur du bardage sur le coefficient correctif. Il est possible d'observer une augmentation du coefficient correctif pour une épaisseur de lame d'air égale à 5 cm et un coefficient d'absorption solaire égal à 0,8 lorsque la hauteur du bardage passe de 2 à 10 m. Une augmentation du coefficient correctif est également observée lorsque le modèle est utilisé. Pour les autres configurations, le modèle donne également une augmentation du coefficient correctif pour une hauteur de bardage qui passe de 2 à 10 m.

PARTIE 3 : CHOIX DES PARAMETRES DE CARACTERISATION

L'objectif de cette partie est de présenter et justifier le choix des configurations de bardage pour lesquelles un coefficient correctif sur facteur $F_{S,ps}$ sera associé. Les valeurs ainsi proposées pourraient se substituer au terme $\alpha_k K_{corr,la}$ utilisé par les Règles Th-S dans l'équation (2) pour le calcul du facteur solaire d'une paroi avec bardage. Les configurations sont définies par différents paramètres. Il est nécessaire que ces données soient faciles d'accès.

Des méthodes d'analyse de sensibilité sont employées afin d'évaluer l'influence des paramètres du bardage sur son facteur solaire. Les paramètres qui n'ont que peu d'impact peuvent alors être considérés comme constants afin de réduire le nombre de configuration. En revanche, les paramètres les plus influents verront leur plage de variation discrétisée finement pour le calcul des coefficients correctifs sur facteur solaire. L'analyse de sensibilité est particulièrement bien adaptée aux variables continues comme peut l'être l'épaisseur du bardage. Elle l'est moins pour des variables discrètes comme le type de l'ossature support du bardage. Cette caractéristique amène à réaliser plusieurs analyses de sensibilité.

Cette étude se focalisera sur les cas des bardages bois. Dans le cas où la méthode proposée s'avère pertinente, celle-ci pourra être appliquée à d'autres matériaux utilisés en bardage comme le métal, les matières plastiques et minérales.

1. PARAMETRES ET PLAGES DE VARIATION

1.1. Matériau

Le matériau constituant la peau de bardage est décrit par sa conductivité thermique λ_{ps} , sa masse volumique ρ_{ps} et sa capacité thermique massique $c_{p,ps}$. Pour définir ces propriétés il est possible de s'appuyer sur le fascicule 2/5 des Règles Th-U qui tient compte de différents types de bois résineux et feuillus. Les valeurs qui y sont données sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 18 : Caractéristiques de différents types de bois données par les Règles Th-U 2/5

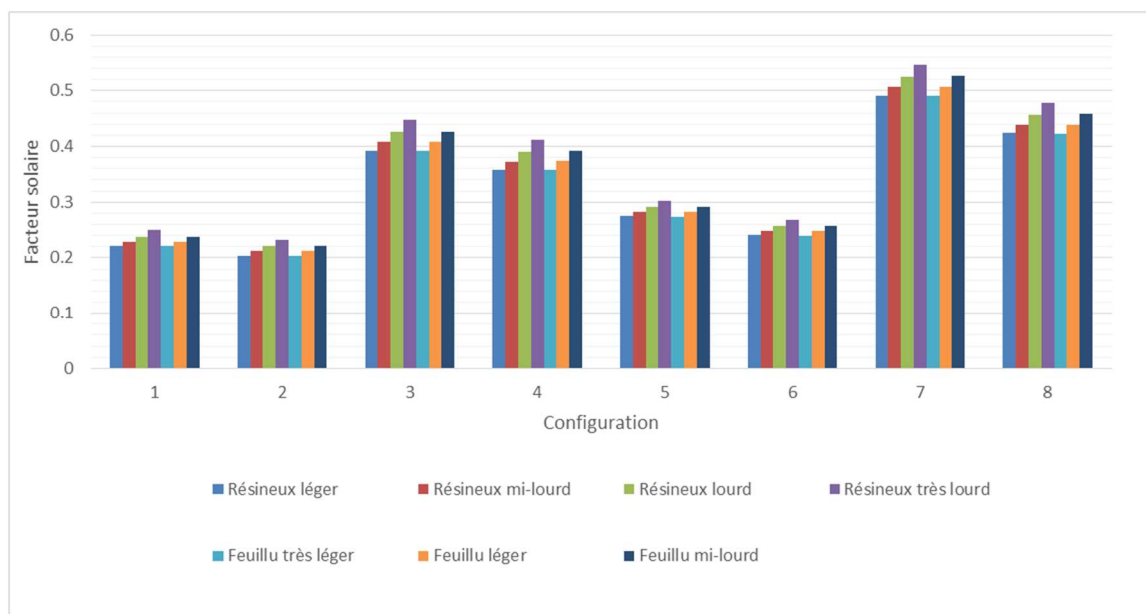
Type de bois	λ [W/(m.K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg.K)]
Résineux léger	0,13	435	1600
Résineux mi-lourd	0,15	480	1600
Résineux lourd	0,18	565	1600
Résineux très lourd	0,23	610	1600
Feuillu très léger	0,13	320	1600
Feuillu léger	0,15	500	1600
Feuillu mi-lourd	0,18	660	1600
Feuillu lourd	0,23	810	1600
Feuillu très lourd	0,29	870	1600

Lors d'un calcul réglementaire, plutôt que de demander au concepteur de fournir les propriétés du matériau constituant la peau de bardage, le type de bois utilisé pourrait constituer l'une des données d'entrée. Toutefois, afin de vérifier la pertinence de cette donnée d'entrée, des simulations sont

menées en reprenant les 8 configurations de bardage présentées dans le Tableau 9 et en considérant les différents types de bois. La comparaison des facteurs solaires permet d'évaluer la nécessité de retenir les propriétés matériaux comme données d'entrée. Pour cette comparaison les valeurs suivantes sont considérées :

- Epaisseur du bardage $ep_{ps} = 0,025 \text{ m}$
- Facteur d'ouverture de la lame d'air $o_{la} = 0,5$
- Ouverture des joints entre lames $o_{ps} = 0 \text{ m}$ (pas de bardage à claire-voie)
- Type d'ossature support du bardage $t_{oss} = 1$ (bardage sur ossature verticale)
- Coefficient de transmission du bardage pour les courtes longueurs d'onde $\tau_{CLO,ps} = 0$
- Coefficient de transmission du bardage pour les grandes longueurs d'onde $\tau_{GLO,ps} = 0$
- Emissivité du bardage pour les grandes longueurs d'onde $\varepsilon_{GLO,ps} = 0,86$

Le tableau suivant présente les résultats obtenus.



Graphique 6 : Influence du type de bois sur le facteur solaire

Sur le graphique précédent il est possible d'observer pour une même configuration des écarts assez importants sur la valeur du facteur solaire suivant le type de bois considéré pour le bardage. L'écart maximum entre deux valeurs pour une même configuration est en moyenne de 17 % et au maximum de 20 % pour la configuration 4. Ces valeurs semblent trop importantes pour ne pas prendre en compte le type de bois utilisé. Il est proposé de retenir les 3 catégories suivantes :

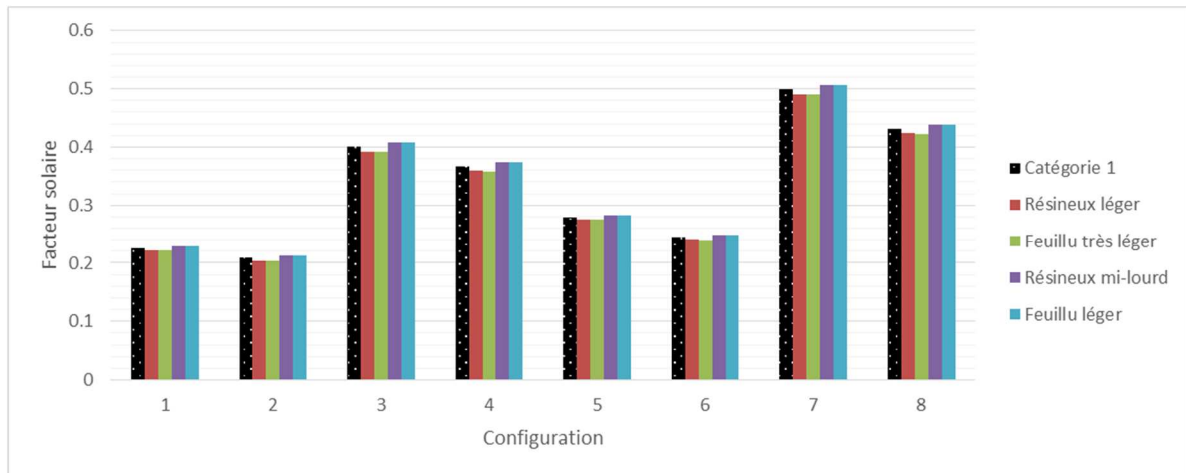
- 1- Résineux léger ; Feuillu très léger ; Résineux mi-lourd ; Feuillu léger
- 2- Résineux lourd ; Feuillu mi-lourd ; Résineux très lourd
- 3- Feuillu lourd ; Feuillu très lourd

Pour chacune de ces catégories les propriétés du matériau sont prises comme étant une moyenne des propriétés de chaque type de bois qu'elle comprend. Le tableau suivant présente les propriétés retenues pour chaque catégorie.

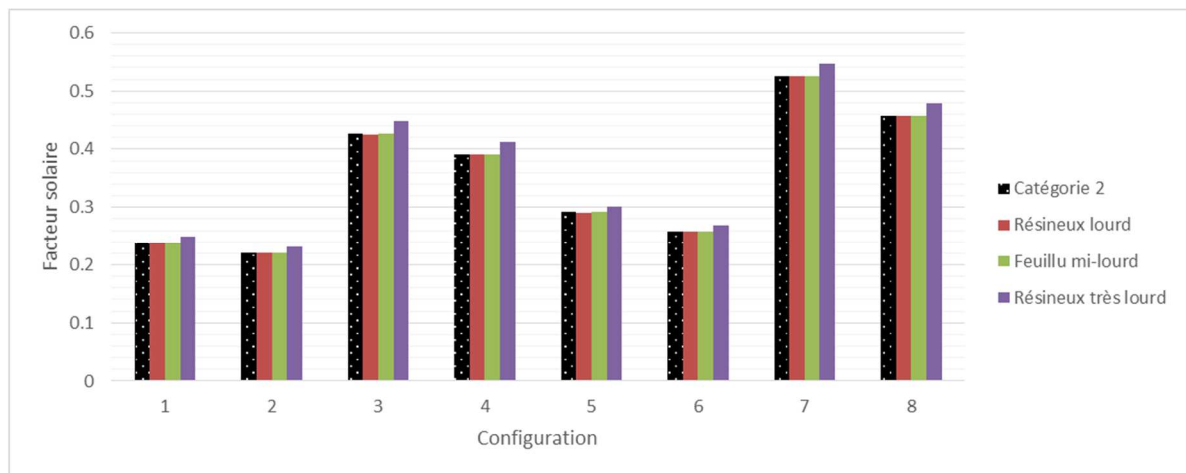
Tableau 19 : Propriétés pour les différentes catégories de bois

Catégorie de bois	λ [W/(m.K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg.K)]
Catégorie 1	0,14	434	1600
Catégorie 2	0,18	612	1600
Catégorie 3	0,26	840	1600

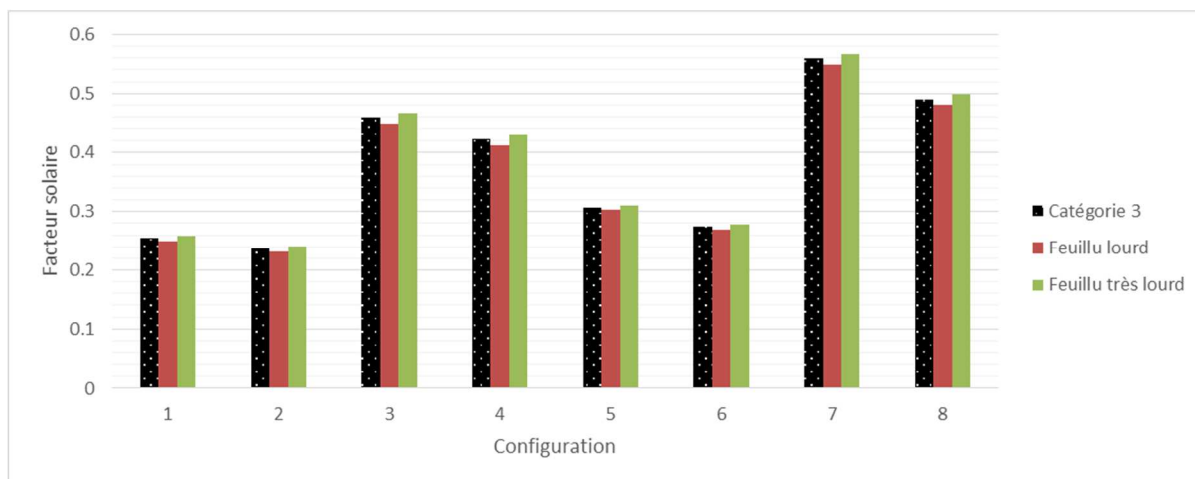
Les graphiques suivants présentent une comparaison pour chaque catégorie entre les facteurs solaires obtenus en considérant les types de bois qui composent la catégorie et les valeurs obtenues en considérant les propriétés moyennes de la catégorie présentées dans le Tableau 19.



Graphique 7 : Facteurs solaires pour les bois de la catégorie 1



Graphique 8 : Facteurs solaires pour les bois de la catégorie 2



Graphique 9 : Facteurs solaires pour les bois de la catégorie 3

Les graphiques précédents montrent qu'il est possible de retenir 3 catégories de bois pour le calcul du facteur solaire du bardage. La prise en compte de propriétés moyennes permet d'obtenir des valeurs du facteur solaire qui sont proches des valeurs obtenues avec les propriétés réelles des types de bois contenus dans chaque catégorie. Pour la catégorie 1, ce sont les facteurs solaire obtenus avec les propriétés du feuillu très léger qui s'écartent le plus des valeurs obtenues avec les propriétés moyennes. Cet écart est au maximum de 2,21 % pour la configuration de bardage 4. Pour la catégorie 2, l'écart le plus important est obtenu avec les propriétés du résineux très lourd. Il est de 5,53 % toujours pour la configuration de bardage 4. Enfin, pour la troisième catégorie de bois, ce sont les facteurs solaires obtenus pour du feuillu lourd qui s'écartent le plus des valeurs obtenues avec les propriétés moyennes. L'écart maximum est de 2,31 % pour la configuration de bardage 4. Vu les faibles écarts obtenus, dans la suite de cette étude les propriétés du bois constituant le bardage seront définies par le choix d'une des 3 catégories proposées. Les propriétés du matériau sont alors celles présentées dans le Tableau 19.

1.2. Géométrie

Les paramètres géométriques du bardage sont ceux présentés dans le Tableau 7. Le facteur d'ouverture de la lame d'air va dépendre en grande partie de la grille anti-rongeur mise en œuvre. Le DTU 41.2 préconise une ouverture minimale qui dépend de la hauteur du bardage et qui est comprise entre 50 et 120 cm²/ml. Connaissant l'épaisseur de la lame d'air il est possible de déduire de cette ouverture exprimée en cm²/ml un facteur d'ouverture. Dans le chapitre 1 de ce document, l'analyse des règles de l'art et de mise en œuvre des bardages a permis de mettre en évidence les plages de variations suivantes.

Tableau 20 : Plages de variation retenues pour les paramètres géométriques

Notation	Description	Unité	Plage de variation
ep_{ps}	Épaisseur du bardage	[m]	[0,01 ; 0,03]
ep_{la}	Épaisseur de la lame d'air	[m]	[0,02 ; 0,05]
H_{la}	Hauteur de la lame d'air	[m]	[2 ; 24]
o_{la}	Facteur d'ouverture de la lame d'air	[1]	[0,1 ; 1]
o_{ps}	Ouverture des joints entre lames	[m]	[0 ; 0,01]
t_{oss}	Type de l'ossature support du bardage	[1]	{1 : bardage sur ossature verticale ; 2 : bardage sur contre ossature horizontale}

Mis à part le facteur d'ouverture de la lame d'air, L'ensemble de ces paramètres semblent à priori facilement accessibles par le concepteur. Pour le facteur d'ouverture de la lame d'air il est proposé dans la suite de cette étude, par le biais de l'analyse de sensibilité, d'évaluer l'importance de ce paramètre. Les résultats obtenus permettront soit de fixer une valeur par défaut pour ce paramètre soit de proposer une plage de variation réduite.

1.3. Propriétés radiatives

Les propriétés radiatives du bardage sont celles présentées dans le tableau suivant.

Tableau 21 : Propriétés radiatives du bardage

Notation	Description	Unité
$\tau_{ps,CLO}$	Coefficient de transmission du bardage pour les courtes longueurs d'onde	[1]
$\tau_{ps,GLO}$	Coefficient de transmission du bardage pour les grandes longueurs d'onde	[1]
$\alpha_{ps,CLO}$	Coefficient d'absorption solaire du bardage	[1]
$\varepsilon_{ps,GLO}$	Emissivité du bardage pour les grandes longueurs d'onde	[1]

Les bardages bois étant opaques les coefficients de transmission seront pris égal à $\tau_{ps,CLO} = \tau_{ps,GLO} = 0$. Le coefficient d'absorption solaire dépend en grande partie de la couleur du bardage. Dans les Règles Th-S ce coefficient est une donnée utilisée pour caractériser l'impact du bardage sur le facteur solaire d'une paroi. Le Tableau 4 issu de ces règles associe un coefficient d'absorption à différentes couleurs. Dans cette étude, il est proposé de s'appuyer sur ces valeurs comprises entre 0,4 et 1. L'émissivité du bardage pour les grandes longueurs d'onde est une donnée beaucoup plus difficile d'accès que les précédentes. Cependant pour une surface de bois brute ou peinte l'émissivité s'écarte que très faiblement de la valeur $\varepsilon_{ps,GLO} = 0,9$. Pour cette étude, la valeur d'émissivité mesurée dans le cadre du travail de Thèse d'Antoine Dugué pour un bardage en Pin couleur « calcaire » est retenue ; soit $\varepsilon_{ps,GLO} = 0,86$.

2. ANALYSE DE SENSIBILITE

2.1. Description

Selon (Bertrand IOOSS, 2011) : « L'analyse de sensibilité 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 ». L'analyse de sensibilité peut donc être utilisée pour hiérarchiser les entrées les plus influentes et déterminer les entrées non influentes afin de les rendre constantes.

Dans cette étude, l'analyse de sensibilité est utilisée afin de guider le choix des paramètres à retenir pour la description d'un bardage en vue de définir son facteur solaire. Les données d'entrées du modèle les moins influentes pourront ainsi être considérées comme des constantes. Les plus influentes verront au contraire leur plage de variation discrétisée de manière plus fine.

Il existe de nombreuses méthodes d'analyse de sensibilité. Dans le cadre de cette étude 3 méthodes sont retenues. La comparaison des résultats obtenus suivant celles-ci permet d'assurer un résultat fiable. Ces méthodes sont les suivantes :

- Méthode des indices de Sobol
- Méthode des indices Standardise Regression Coefficients (SRC)
- Méthode des indices Partial Ranked Correlation Coefficient (PRCC)

2.1.1. Indices de Sobol

Ces indices également nommés « mesures d'importance basées sur la variance » sont compris entre 0 et 1 et leur somme est égale à l'unité. Ils présentent l'avantage d'être particulièrement faciles à interpréter en termes de pourcentage de la variance de la réponse. Contrairement aux deux autres méthodes présentées en suivant, en plus de permettre la hiérarchisation des paramètres les indices de Sobol permettent d'évaluer simplement la différence d'importance entre deux paramètres.

La détermination des indices de Sobol repose sur la construction d'une surface de réponse (ou métamodèle) capable de représenter le modèle. Dans cette étude la construction du métamodèle fait appel à la méthode des polynômes du chaos.

2.1.2. Indices SRC

Les indices SRC peuvent être employés comme indices de sensibilité dans le cas où les paramètres peuvent être considérés comme indépendants les uns des autres. Ils quantifient l'effet de la déviation d'un paramètre par rapport à sa moyenne tout en maintenant les autres à leur valeur initiale.

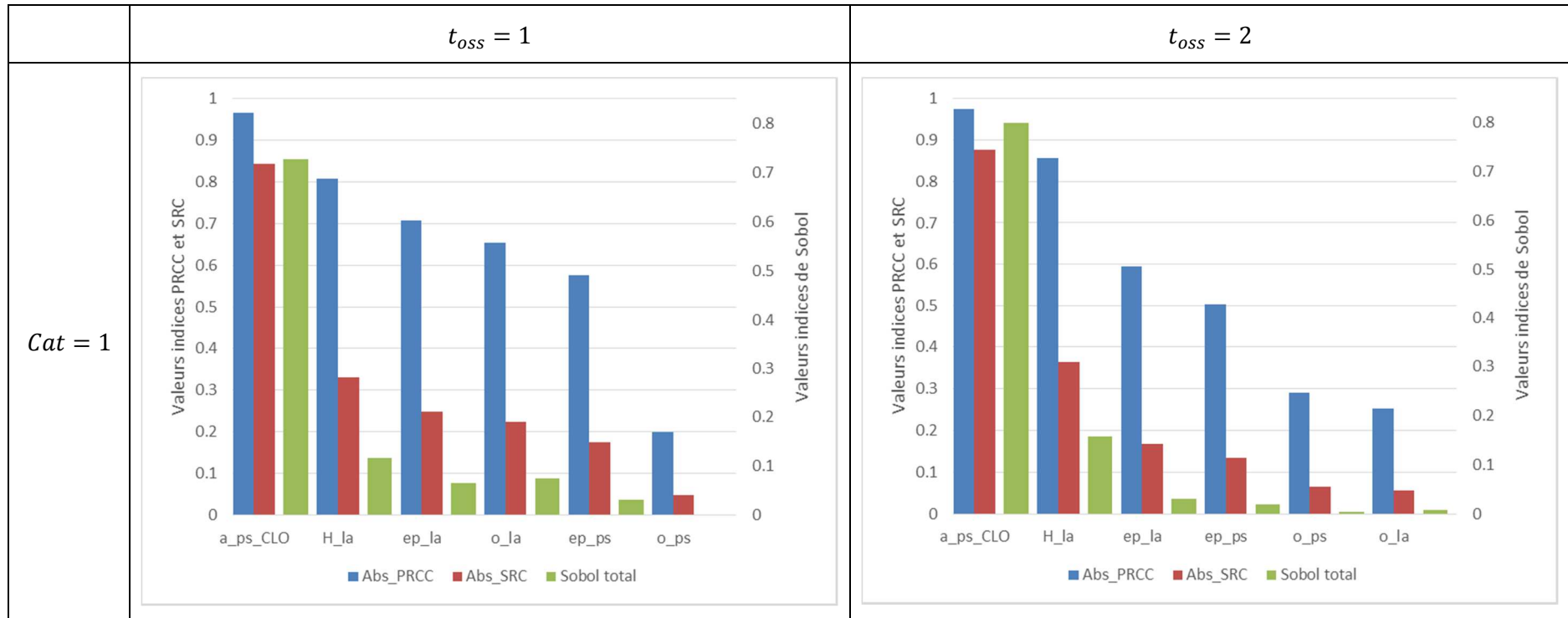
2.1.3. Indices PRCC

Ces indices sont des indicateurs robustes adaptés à la caractérisation de systèmes non linéaires mais monotones. Ils sont calculés à partir de coefficients de corrélation (ou coefficients de Pearson) qui définissent la correspondance linéaire entre les paramètres d'entrée du modèle et sa sortie.

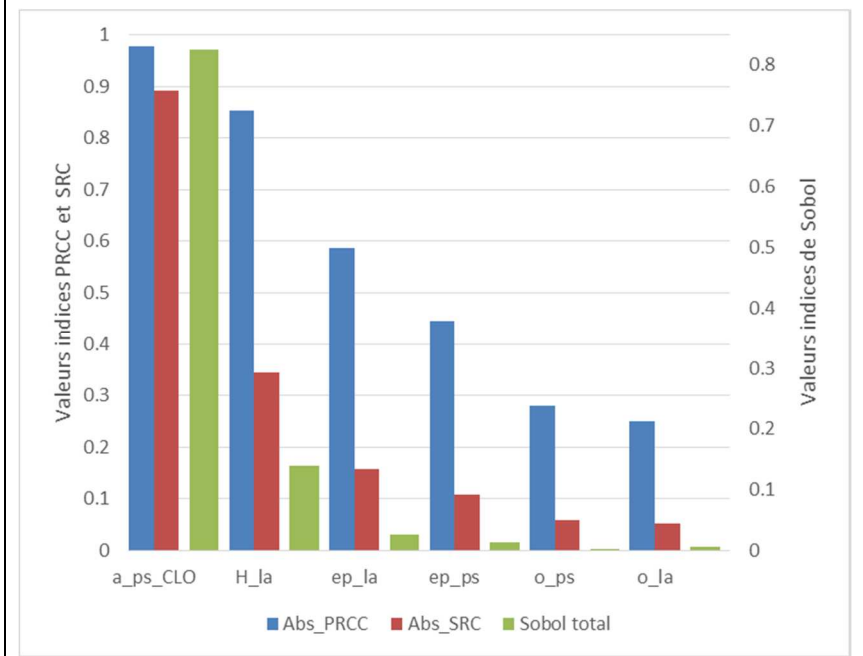
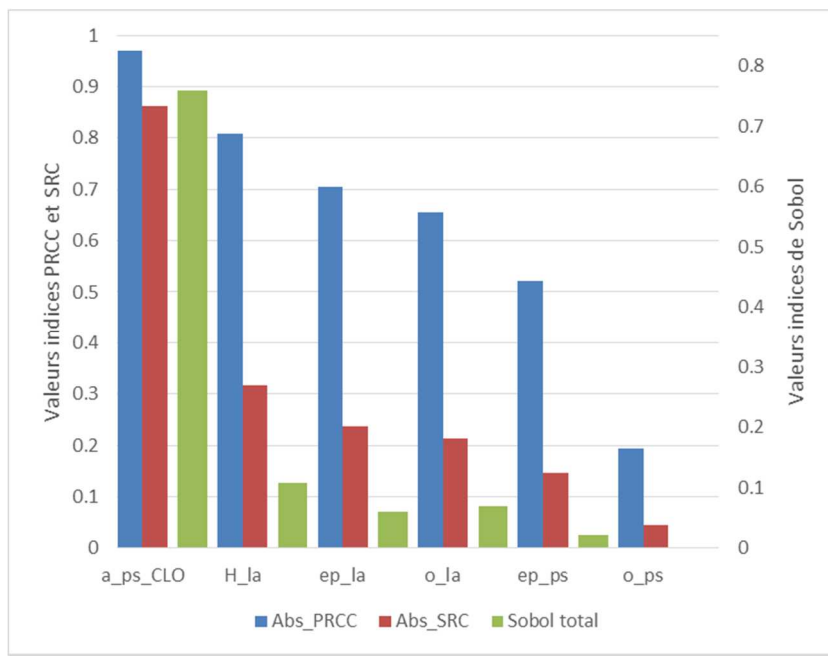
2.2. Résultats

La majorité des paramètres d'entrée du modèle présentés précédemment sont des variables continues. Seuls la catégorie du bois utilisé pour le bardage notée par la suite *Cat* et le type de l'ossature support du bardage t_{OSS} sont des variables discrètes qui peuvent respectivement prendre les valeurs suivantes {1 ; 2 ; 3} et {1 ; 2}. Puisque les méthodes d'analyse de sensibilité utilisées sont peu adaptées à la prise en compte de variables discrètes, 6 analyses de sensibilité différentes sont réalisées. Une analyse pour chaque combinaison possible *Cat* / t_{OSS} . Les résultats obtenus sont présentés sur les pages suivantes.

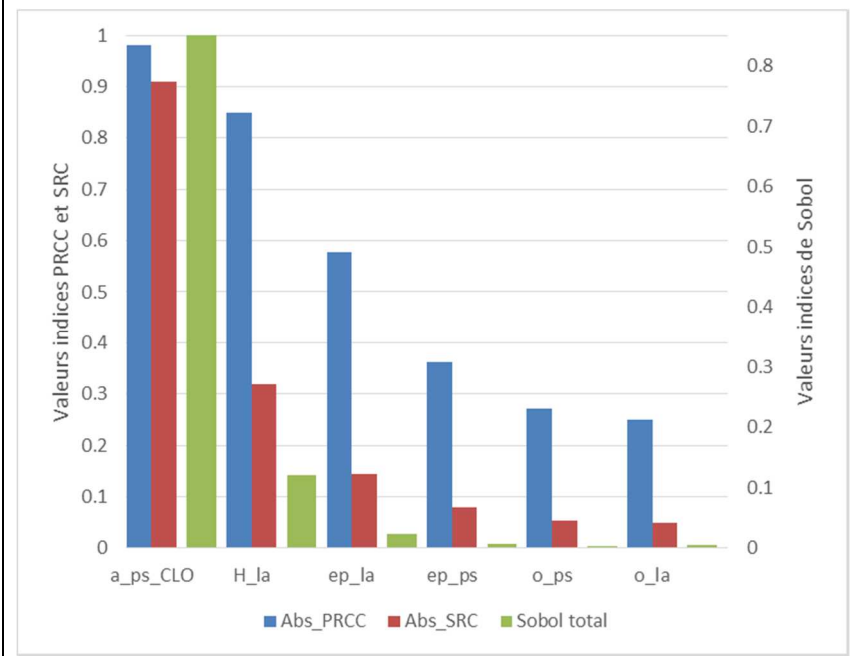
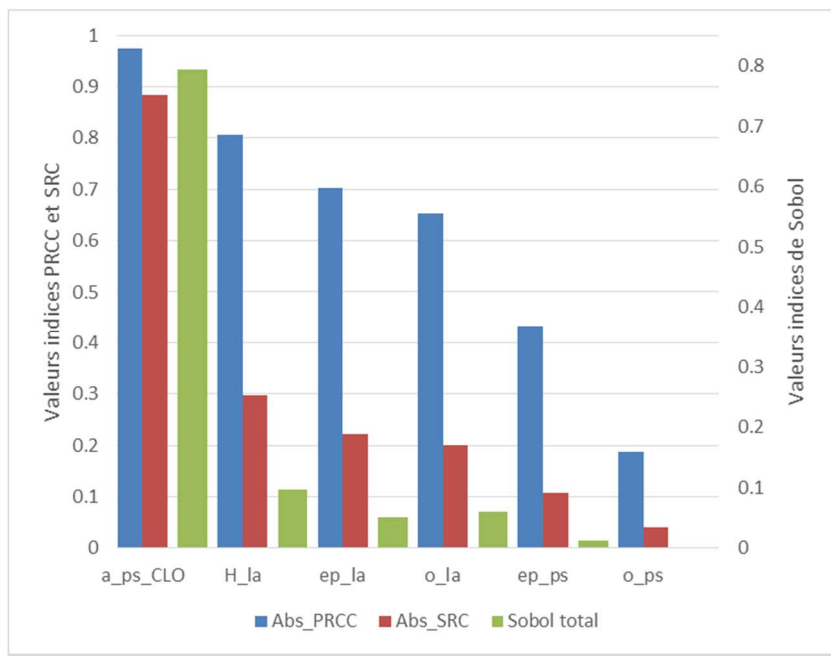
Tableau 22 : Résultats des analyses de sensibilité



Cat = 2



Cat = 3



Les graphiques précédents permettent de visualiser, suivant les trois méthodes utilisées, la sensibilité du facteur solaire du bardage aux différents paramètres. La hiérarchisation des paramètres est identiques pour les méthodes PRCC et SRC. La méthode des indices de Sobol donne des résultats qui sont quelque peu différents. Pour les analyses menées avec $t_{oss} = 1$ les méthodes PRCC et SRC donnent le paramètre ep_{la} plus influent que l'ouverture de la lame d'air o_{la} . Les indices de Sobol inverse l'importance de ces deux paramètres. Lorsque $t_{oss} = 2$, c'est la hiérarchisation des paramètres o_{ps} et o_{ps} donnée par les méthodes PRCC et SRC qui n'est pas identique à celle obtenue avec les indices de Sobol. Toutefois, puisque dans les deux cas les indices de Sobol des deux paramètres sont très proches l'un de l'autre, de telles différences de classement ne remettent pas en question les résultats obtenus.

Les analyses de sensibilité mettent en avant que le coefficient d'absorption solaire du bardage est de loin le plus influent. L'indice de Sobol qui permet d'évaluer la différence d'importance entre deux paramètres est en moyenne égal à 0,793 pour ce paramètre alors qu'il n'est en moyenne que de 0,123 pour le deuxième paramètre le plus influent qui est la hauteur de la lame d'air H_{la} . Finalement, il est possible de remarquer que les analyses de sensibilité menées présentent le coefficient d'absorption solaire $\alpha_{ps,CLO}$, la hauteur de la lame d'air H_{la} et l'épaisseur de la lame d'air ep_{la} comme étant les paramètres ayant le plus d'influence sur la valeur du facteur solaire du bardage. Ce sont ces mêmes paramètres qui sont utilisés dans les Règles Th-S pour définir l'influence du bardage sur le facteur solaire d'une paroi. A noter que dans le cas d'un bardage à lames horizontales l'ouverture de la lame d'air o_{la} est également identifiée comme influente. Ce paramètre n'est quant à lui pas une donnée d'entrée de la méthode proposée dans les Règles Th-S.

Les graphiques présentés dans le Tableau 22 montrent que pour une orientation des lames de bardage donnée la hiérarchisation des paramètres est identique pour toutes les catégories de bois. En revanche, cette hiérarchisation n'est pas la même pour les deux types d'ossature support du bardage. La différence la plus marquée s'observe pour le paramètre o_{la} qui, selon les méthodes PRCC et SRC, est classé à la 4^e position (3^e position selon les indices de Sobol) pour $t_{oss} = 1$ alors qu'il se retrouve en 6^e et dernière position (5^e position selon les indices de Sobol) pour $t_{oss} = 2$.

Les résultats obtenus montrent qu'il convient de ne pas négliger l'importance des paramètres $\alpha_{ps,CLO}$, H_{la} et ep_{la} . L'ouverture de la lame d'air o_{la} apparaît également comme étant un paramètre influent notamment dans le cas d'un bardage à lames horizontales. Enfin, les deux derniers paramètres ep_{ps} et o_{ps} apparaissent comme étant peu influents.

3. SYNTHÈSE

Le modèle physique présenté dans les paragraphes précédents est dans un premier temps appliqué au cas des bardages bois. Si les résultats obtenus s'avèrent concluant il pourra alors être envisagé d'étendre cette application à d'autres matériaux utilisés en bardage comme le métal, les matières plastiques et minérales.

Les propriétés du matériau de la peau de bardage constituent des données d'entrée du modèle physique. Celles-ci sont difficilement appréciables lors d'un calcul réglementaire thermique. Il est donc proposé de définir ces propriétés à partir d'une catégorie de bois. Basées sur le fascicule 2/5 des Règles Th-U, trois catégories de bois ont été définies.

Les simplifications adoptées aboutissent à 8 variables dont les plages de variation ont été définies. Trois méthodes d'analyse de sensibilité sont alors employées afin de mettre en évidence les variables

les plus influentes et celles qui le sont moins. L'objectif est de proposer un nombre réduit de valeurs du facteur solaire du bardage qui tiennent compte de l'influence des variables. De la sorte les variables les plus influentes verront leur plage de variation finement discrétisée alors que les variables peu influentes pourront être considérées comme constantes sans que cela n'affecte de manière significative les résultats obtenus. 6 des 8 variables sont continues alors que les deux autres, Cat et t_{oss} qui représentent respectivement la catégorie de bois utilisé et le type d'ossature support du bardage, sont des variables discrètes. Il s'avère que l'analyse de sensibilité est une méthode peu adaptée à de telles variables. Une analyse de sensibilité est donc menée pour chaque couple de valeur Cat/t_{oss} possible. Les analyses de sensibilité ne permettent donc pas d'évaluer l'influence de ces deux variables. C'est seulement dans la partie suivante de ce chapitre que la sensibilité du facteur solaire à ces variables pourra être définie.

Les analyses de sensibilité menées montrent que le coefficient d'absorption solaire du bardage $\alpha_{ps,CLO}$ est de loin le plus influant suivi de la hauteur du bardage H_{la} et de l'épaisseur de la lame d'air ep_{la} . Ce sont d'ailleurs ces mêmes variables qui sont retenues dans les Règles Th-S pour définir l'influence d'un bardage. Pour celles-ci il est alors proposé d'opter pour une discrétisation fine de leur plage de variation. La plage de variation de l'épaisseur de la lame d'air définie précédemment s'étend jusqu'à une valeur de 0,05 m alors que dans les Règles Th-S des valeurs du facteur solaire sont proposées pour une épaisseur de la lame d'air au maximum égale à 0,5 m. Une telle valeur ne semble pas traduire les pratiques de mise en œuvre courantes. Toutefois afin de ne pas limiter l'utilisation des valeurs fournies, la borne supérieure de la plage de variation de l'épaisseur de la lame d'air est prise égale à 0,1 m. Il s'agit d'une valeur inférieure à celle proposée dans les Règles Th-S mais qui paraît suffisante au regard des pratiques de mise en œuvre. Dans le cas d'un bardage à lames horizontales l'ouverture de la lame d'air o_{la} est également identifiée comme influente. Toutefois, il s'agit d'une donnée difficile d'accès pour le concepteur (fortement dépendante de la grille anti-rongeur mise en place en pied du bardage) au moment où est réalisée l'étude thermique réglementaire. Une valeur par défaut $o_{la} = 0,25$ est retenue après analyse de quelques références de grilles anti-rongeur. Les analyses de sensibilité montrent que les paramètres ep_{ps} et o_{ps} , qui représentent respectivement l'épaisseur du bardage et l'ouverture des joints dans le cas d'un bardage ajouré, n'influencent que faiblement le facteur solaire du bardage. Ces deux paramètres seront donc considérés constants. Les valeurs retenues pour les différents paramètres sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 23 : Valeurs des paramètres du bardage pour le calcul des coefficients correctifs sur facteur solaire

Notation	Description	Unité	Valeurs retenues	Commentaire
$\alpha_{ps,CLO}$	Coefficient d'absorption solaire du bardage	[1]	{0,4 ; 0,6 ; 0,8 ; 1}	Correspondance avec le tableau XXII des Règles Th-S
H_{la}	Hauteur de la lame d'air	[m]	{9 ; 16 ; 24}	9 : [2 ; 9] 16 :]9 ; 16] 24 :]16 ; 24]
e_{pta}	Epaisseur de la lame d'air	[m]	{0,02 ; 0,05 ; 0,08}	0,02 : [0,02 ; 0,05[0,05 : [0,05 ; 0,08[0,08 : [0,08 ; 1]
e_{pps}	Epaisseur du bardage	[m]	0,02	
o_{la}	Facteur d'ouverture de la lame d'air	[1]	0,25	
o_{ps}	Ouverture des joints entre lames	[m]	0	
t_{oss}	Type de l'ossature support du bardage	[1]	{1 ; 2}	
Cat	Catégorie de bois pour le bardage	[1]	{1 ; 2 ; 3}	

Dans le Tableau 23, les valeurs pour le coefficient d'absorption solaire correspondent à celles données dans le tableau XXII des Règles Th-S. Ce tableau donne la correspondance entre couleur et coefficient d'absorption solaire. Pour la hauteur de la lame d'air et l'épaisseur de la lame d'air les valeurs du Tableau 23 définissent les bornes inférieures ou supérieures d'intervalles de manière à ne pas surestimer le facteur solaire du bardage. Puisque l'augmentation de la hauteur de la lame d'air a tendance à augmenter la valeur du facteur solaire, les valeurs fournies dans le tableau précédent correspondent aux bornes inférieures des intervalles. Pour l'épaisseur de la lame d'air, les valeurs correspondent quant à elles aux bornes supérieures puisque une augmentation de ce paramètre à tendance à diminuer le facteur solaire.

PARTIE 4 : CALCUL DES COEFFICIENTS CORRECTIFS SUR FACTEUR SOLAIRE

Les résultats des analyses de sensibilité menées ont conduit à retenir les valeurs des paramètres renseignées dans le Tableau 23. Ces valeurs aboutissent à 216 combinaisons possibles, chacune représentant une configuration de bardage. Pour chacune de ces configurations, le modèle physique est utilisé pour calculer le facteur solaire du bardage correspondant. Les tableaux suivants présentent les résultats pour les différentes catégories de bois.

Tableau 24 : Valeurs des coefficients correctifs sur facteur solaire pour un bardage bois de catégorie 1

Catégorie 1	H_{ia} [m]											
	[2;9]				]9;16]				]16;24]			
e_{ia} [m]	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$
[0,02;0,05[	0.35 <i>0.36</i>	0.50 <i>0.53</i>	0.64 <i>0.68</i>	0.78 <i>0.84</i>	0.36 <i>0.38</i>	0.52 <i>0.55</i>	0.68 <i>0.72</i>	0.83 <i>0.89</i>	0.37 <i>0.39</i>	0.54 <i>0.57</i>	0.70 <i>0.75</i>	0.86 <i>0.92</i>
[0,05;0,08[	0.29 <i>0.31</i>	0.41 <i>0.45</i>	0.52 <i>0.58</i>	0.63 <i>0.70</i>	0.30 <i>0.34</i>	0.44 <i>0.49</i>	0.56 <i>0.63</i>	0.68 <i>0.77</i>	0.32 <i>0.36</i>	0.46 <i>0.52</i>	0.59 <i>0.67</i>	0.71 <i>0.82</i>
[0,08;0,1]	0.26 <i>0.29</i>	0.37 <i>0.41</i>	0.47 <i>0.53</i>	0.57 <i>0.64</i>	0.28 <i>0.32</i>	0.40 <i>0.45</i>	0.51 <i>0.58</i>	0.61 <i>0.71</i>	0.29 <i>0.34</i>	0.42 <i>0.48</i>	0.53 <i>0.63</i>	0.64 <i>0.76</i>

En gris les valeurs pour un bardage sur contre ossature horizontale

L'épaisseur de la lame d'air comprend l'ossature principale et la contre ossature

Tableau 25 : Valeurs des coefficients correctifs sur facteur solaire pour un bardage bois de catégorie 2

Catégorie 2	H_{ia} [m]											
	[2;9]				]9;16]				]16;24]			
e_{ia} [m]	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$
[0,02;0,05[	0.35 <i>0.37</i>	0.51 <i>0.54</i>	0.66 <i>0.70</i>	0.80 <i>0.85</i>	0.37 <i>0.38</i>	0.53 <i>0.56</i>	0.69 <i>0.74</i>	0.85 <i>0.90</i>	0.38 <i>0.39</i>	0.55 <i>0.58</i>	0.71 <i>0.76</i>	0.87 <i>0.93</i>
[0,05;0,08[	0.30 <i>0.32</i>	0.42 <i>0.46</i>	0.54 <i>0.60</i>	0.65 <i>0.73</i>	0.31 <i>0.35</i>	0.45 <i>0.50</i>	0.58 <i>0.65</i>	0.70 <i>0.80</i>	0.33 <i>0.36</i>	0.47 <i>0.53</i>	0.61 <i>0.69</i>	0.74 <i>0.84</i>
[0,08;0,1]	0.27 <i>0.30</i>	0.39 <i>0.43</i>	0.49 <i>0.55</i>	0.60 <i>0.66</i>	0.29 <i>0.32</i>	0.41 <i>0.47</i>	0.53 <i>0.60</i>	0.64 <i>0.73</i>	0.30 <i>0.34</i>	0.43 <i>0.50</i>	0.55 <i>0.64</i>	0.67 <i>0.79</i>

En gris les valeurs pour un bardage sur contre ossature horizontale

L'épaisseur de la lame d'air comprend l'ossature principale et la contre ossature

Tableau 26 : Valeurs des coefficients correctifs sur facteur solaire pour un bardage bois de catégorie 3

Catégorie 3	H_{la} [m]											
	[2;9]				]9;16]				]16;24]			
e_{la} [m]	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,6$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 1$
[0,02;0,05[	0.36	0.52	0.68	0.83	0.38	0.55	0.71	0.87	0.38	0.56	0.73	0.89
	<i>0.37</i>	<i>0.55</i>	<i>0.71</i>	<i>0.88</i>	<i>0.39</i>	<i>0.57</i>	<i>0.75</i>	<i>0.92</i>	<i>0.40</i>	<i>0.59</i>	<i>0.77</i>	<i>0.95</i>
[0,05;0,08[	0.31	0.44	0.57	0.69	0.32	0.47	0.60	0.73	0.34	0.49	0.63	0.77
	<i>0.33</i>	<i>0.48</i>	<i>0.62</i>	<i>0.76</i>	<i>0.36</i>	<i>0.52</i>	<i>0.67</i>	<i>0.82</i>	<i>0.37</i>	<i>0.54</i>	<i>0.71</i>	<i>0.87</i>
[0,08;0,1]	0.29	0.41	0.52	0.63	0.30	0.43	0.55	0.67	0.31	0.45	0.58	0.70
	<i>0.31</i>	<i>0.45</i>	<i>0.57</i>	<i>0.70</i>	<i>0.33</i>	<i>0.48</i>	<i>0.63</i>	<i>0.76</i>	<i>0.35</i>	<i>0.51</i>	<i>0.66</i>	<i>0.81</i>

En gris les valeurs pour un bardage sur contre ossature horizontale

L'épaisseur de la lame d'air comprend l'ossature principale et la contre ossature

Les résultats obtenus montrent que le type d'ossature support t_{oss} a une influence significative sur la valeur du facteur solaire du bardage (ou coefficient correctif). Dans le cas d'une contre ossature ($t_{oss} = 2$), les pertes de charge au sein de lame d'air sont plus importantes que dans le cas d'une seule ossature principale ($t_{oss} = 1$). Il en résulte une augmentation du coefficient correctif qui traduit la diminution du renouvellement d'air et donc la diminution de l'évacuation de la chaleur accumulée. Au maximum le passage de $t_{oss} = 1$ à $t_{oss} = 2$ entraîne une augmentation du facteur solaire de 19 %. En moyenne cette augmentation est d'environ 10 %.

Le facteur solaire du bardage (ou coefficient correctif) est moins sensible à la catégorie de bois utilisé qu'au type d'ossature. Plus le bois est lourd et sa conductivité thermique grande, plus le coefficient correctif est élevé. De la sorte les valeurs obtenues avec une catégorie de bois 2 sont plus élevées que celles obtenues avec une catégorie 1. De même, les facteurs solaires obtenus avec une catégorie 3 sont plus élevés que ceux obtenus avec une catégorie 2. Le passage d'une catégorie 1 à 3 entraîne une augmentation maximale du facteur solaire d'environ 11 %. Cette augmentation est en moyenne d'environ 6 %.

Le tableau suivant présente une comparaison entre les coefficients de correction fournis par les Règles Th-S ($\alpha_k K_{corr_{ia}}$) et les coefficients correctifs calculés ($F_{S,ps}$). Pour cette comparaison, les valeurs calculées retenues sont celles pour une catégorie de bois 1 (celle qui donne les valeurs les plus faibles) et avec une simple ossature support du bardage ($t_{oss} = 1$). Le Tableau 27 montre que les valeurs calculées à partir du modèle physique se trouvent être très proches de celles fournies par les Règles Th-S.

Tableau 27 : Comparaison entre Règles Th-S et modèle physique

e_{ia} [m]	H_{ia} [m]			
	2 ou moins		10 ou plus	
	$\alpha_k = 0.4$	$\alpha_k = 0.8$	$\alpha_k = 0.4$	$\alpha_k = 0.8$
0.05	0.28 / 0.29	0.52 / 0.52	0.28 / 0.30	0.56 / 0.56
0.1	0.26 / 0.26	0.48 / 0.47	0.26 / 0.28	0.48 / 0.51

D'après les résultats obtenus il semble pertinent de considérer le type d'ossature comme un paramètre de caractérisation du bardage. Celui-ci influence de manière non négligeable la valeur du coefficient correctif. En revanche, la catégorie de bois utilisé est quant à elle moins influente et à des fins de simplification il pourrait être envisageable de considérer seulement les valeurs obtenues pour l'une des catégories. Dans la partie suivante qui s'intéresse aux indicateurs réglementaires, la pertinence de considérer 3 catégories de bois est évaluée. Vu la comparaison présentée dans le Tableau 27 l'utilisation des valeurs fournies par les Règles Th-S ou des valeurs calculées ne devrait engendrer qu'une différence insignifiante sur les indicateurs réglementaires. En revanche, l'utilisation des valeurs calculées permettra de considérer un nombre plus important de configurations de bardage. Dans la partie suivante il s'agit alors d'observer quel est l'impact de la prise en compte de ces configurations supplémentaires sur les indicateurs réglementaires.

PARTIE 5 : IMPACT SUR LES INDICATEURS REGLEMENTAIRES

L'objectif principal de cette 5^e partie est de comparer les valeurs des indicateurs réglementaires *Tic* et *Bbio* obtenues avec les coefficients de correction donnés dans les Règles Th-S à celles obtenues avec les coefficients correctifs calculés dans la partie précédente de ce document. Ces coefficients, obtenus par application d'un modèle physique fin, sont très proches de ceux fournis par les Règles Th-S. En revanche, ils permettent de considérer un nombre plus important de configurations de bardage. Dans cette partie, l'impact de la mise en place d'un bardage sur les valeurs des indicateurs réglementaires est également évalué.

Dans la partie précédente, les coefficients correctifs ont été calculés pour trois catégories de bois différentes. Il a été montré que le passage d'une catégorie 1 à 3 entraîne en moyenne une augmentation du coefficient correctif de seulement 6 %. L'un des objectifs de cette 5^e partie est également d'évaluer la pertinence de considérer la catégorie de bois comme un paramètre de caractérisation du bardage.

Pour répondre aux objectifs, 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 en considérant les valeurs des coefficients de correction fournies dans les Règles Th-S et les coefficients correctifs calculés précédemment. Une configuration de cette maison individuelle pour laquelle les murs extérieurs ne sont pas revêtus d'un bardage est également étudiée vis-à-vis de la RT.

La méthodologie adoptée consiste, dans un premier temps, à définir différentes configurations de bardage. La comparaison entre l'application des coefficients fournis par les Règles Th-S et l'application de ceux calculés précédemment est dans premier temps réalisée à l'échelle de la paroi. L'indicateur observé est alors le facteur solaire de la paroi complète. Ces facteurs solaires sont également comparés à celui d'une paroi sans bardage extérieur. Ensuite cette comparaison est faite à l'échelle du bâtiment et les indicateurs observés sont les grandeurs réglementaires *Tic* et *Bbio*. Pour cette étude d'impact seule change la configuration du bardage. Les autres paramètres tels que la typologie du bâtiment, la nature des parois, la localisation et l'orientation ne varient pas. Il s'agit donc seulement d'une étude partielle qui permet d'appréhender l'intérêt d'utiliser les valeurs des coefficients correctifs issues du modèle physique fin.

1. CAS D'ETUDE

1.1. 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.

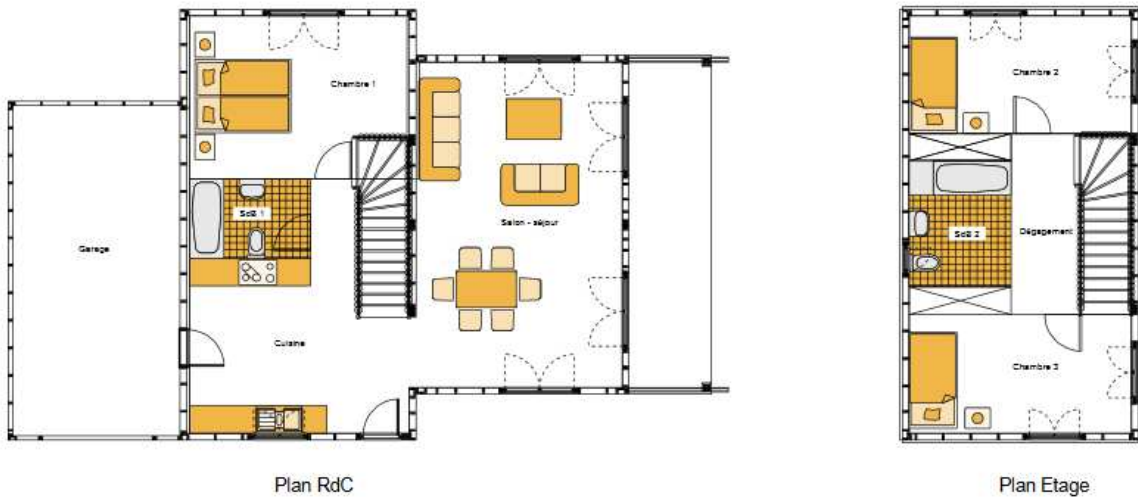


Illustration 23 : Cas d'étude « maison individuelle », catalogue-construction-bois.fr

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.


1.2. Caractéristiques des portes et fenêtres

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

Hauteur m Largeur m Nb de vitrages

Sans protection

Jw vertical W/(m².K) Jw horizontal W/(m².K)

 Coefficient solaire (Sw)


	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C		Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E
Hiver	<input type="text" value="0.04"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.04"/>	<input type="text" value="0"/>	Eté	<input type="text" value="0.14"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.14"/>	<input type="text" value="0"/>

Illustration 24 : Caractéristiques de la porte d'entrée, Pléiades

Hauteur m Largeur m Nb de vitrages

Sans protection

Jw vertical W/(m².K) Jw horizontal W/(m².K)

 Coefficient solaire (Sw)

	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C		Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E
Hiver	<input type="text" value="0.12"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.12"/>	<input type="text" value="0"/>	Eté	<input type="text" value="0.22"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0.22"/>	<input type="text" value="0"/>

Illustration 25 : Caractéristiques de la porte donnant sur le garage, Pléiades

Hauteur m Largeur m Nb de vitrages

Sans protection

Jw vertical W/(m².K) Jw horizontal W/(m².K) Tl global

 Coefficient solaire (Sw) Vitrage spécia

	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C		Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	Tl diffus
Hiver	<input type="text" value="0.51"/>	<input type="text" value="0.427"/>	<input type="text" value="0.084"/>	<input type="text" value="0"/>	Eté	<input type="text" value="0.51"/>	<input type="text" value="0.427"/>	<input type="text" value="0.084"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Illustration 26 : Caractéristiques des portes-fenêtres, Pléiades

Hauteur m Largeur m Nb de vitrages

Sans protection

Jw vertical W/(m².K) Jw horizontal W/(m².K) Tl global

 Coefficient solaire (Sw) Vitrage spécia

	Sw-C	Sw1-C	Sw2-C	Sw3-C		Sw-E	Sw1-E	Sw2-E	Sw3-E	Tl 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"/>	Eté	<input type="text" value="0.493"/>	<input type="text" value="0.41"/>	<input type="text" value="0.083"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

Illustration 27 : Caractéristiques des fenêtres, Pléiades

1.3. Caractéristiques des parois opaques

Les compositions retenues pour les parois de la maison présentent une faible inertie ce qui s'avère défavorable vis-à-vis du confort estival. Ce choix permet notamment d'observer si la prise en compte des coefficients correctifs calculés permet une amélioration de la caractérisation du confort estival pour de tels cas. Ces compositions sont issues du Catalogue Construction Bois et sont présentées en suivant.

Tableau 28 : Composition des murs extérieurs

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		

Tableau 29 : Composition 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		

Tableau 30 : Composition du plancher 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		

Tableau 31 : Composition des murs intérieurs

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		

Tableau 32 : Composition du plancher intermédiaire

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		

Pour le cas des murs extérieurs sans bardage, la composition suivante avec enduit extérieur est retenue.

Tableau 33 : Composition des murs extérieurs avec enduit

ME6 : Isolant en âme et en doublage extérieur avec enduit

	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		
Enduit extérieur	0.03	1.15	1700	1000		

1.4. Configurations

Les variantes retenues pour la configuration du bardage sont celles présentées dans le tableau suivant.

Tableau 34 : Configurations de bardage étudiées

N° Config	Coefficient d'absorption solaire α	Epaisseur de la lame d'air $e_{la} [m]$	Catégorie de bois <i>Cat</i>	Type d'ossature t_{oss}
1	0.4	0.02	1	1
2	0.4	0.02	1	2
3	0.4	0.02	3	1
4	0.4	0.02	3	2
5	0.4	0.05	1	1
6	0.4	0.05	1	2
7	0.4	0.05	3	1
8	0.4	0.05	3	2
9	0.4	0.1	1	1
10	0.4	0.1	1	2
11	0.4	0.1	3	1
12	0.4	0.1	3	2
13	0.6	0.02	1	1
14	0.6	0.02	1	2
15	0.6	0.02	3	1
16	0.6	0.02	3	2
17	0.6	0.05	1	1
18	0.6	0.05	1	2
19	0.6	0.05	3	1
20	0.6	0.05	3	2
21	0.6	0.1	1	1
22	0.6	0.1	1	2
23	0.6	0.1	3	1
24	0.6	0.1	3	2
25	0.8	0.02	1	1
26	0.8	0.02	1	2
27	0.8	0.02	3	1
28	0.8	0.02	3	2
29	0.8	0.05	1	1
30	0.8	0.05	1	2
31	0.8	0.05	3	1
32	0.8	0.05	3	2
33	0.8	0.1	1	1
34	0.8	0.1	1	2
35	0.8	0.1	3	1
36	0.8	0.1	3	2

2. IMPACT A L'ECHELLE DE LA PAROI

La comparaison entre l'utilisation des valeurs fournies par les Règles Th-S et l'utilisation de celles calculées dans le cadre de cette étude est dans un premier temps réalisée à l'échelle de la paroi. L'indicateur observé est donc le facteur solaire de la paroi munie du bardage.

Lors d'un calcul réglementaire, l'utilisation des coefficients de correction intervient lors de la définition du facteur solaire des parois opaques avec bardage. Le facteur solaire de la paroi complète F_S est calculé à partir des équations (25.1) et (25.2). La méthode de calcul réglementaire fait la distinction entre le facteur solaire en condition estivale $F_{S,E}$ et le facteur solaire en condition hivernale $F_{S,C}$.

$$F_{S,E} = \alpha_{bardage} \times K_{corr_{la}} \times R_{se-E} \times U_{k-E} \quad (25.1)$$

$$F_{S,C} = \alpha_{bardage} \times K_{corr_{la}} \times R_{se-C} \times U_{k-C} \quad (25.2)$$

Où :

$K_{corr_{la}}$ [1] est le coefficient de correction associé à la prise en compte de la lame d'air extérieure ventilée

$\alpha_{bardage}$ [1] est le coefficient d'absorption solaire de la peau du bardage

R_{se-E} [$m^2.K/W$] est la résistance thermique superficielle extérieure en condition estivale (convection et rayonnement)

R_{se-C} [$m^2.K/W$] est la résistance thermique superficielle extérieure en condition hivernale (convection et rayonnement)

U_{k-E} [$W/(m^2.K)$] est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en condition estivale

U_{k-C} [$W/(m^2.K)$] est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en condition hivernale

Lorsque les valeurs des coefficients correctifs issues du modèle physique sont utilisées il convient d'utiliser les équations (26.1) et (26.2) pour déterminer les facteurs solaires de la paroi complète pour les périodes estivale et hivernale.

$$F_{S,E} = F_{S,ps} \times R_{se-E} \times U_{k-E} \quad (26.1)$$

$$F_{S,C} = F_{S,ps} \times R_{se-C} \times U_{k-C} \quad (26.2)$$

2.1. Coefficients de prise en compte du bardage

Pour les différentes configurations de bardage le tableau suivant présente les valeurs des coefficients $\alpha_{bardage}K_{corr_{la}}$ et $F_{S,ps}$ qui permettent de calculer les facteurs solaires de la paroi avec bardage. Ces valeurs sont issues respectivement des Règles Th-S et des Tableau 24 et Tableau 26.

Tableau 35 : Coefficients pour la prise en compte du bardage

N° Config	α	e_{la} [m]	Cat	t_{oss}	$\alpha K_{corr\ la}$	$F_{S,ps}$
1	0.4	0.02	1	1	0.28	0.35
2	0.4	0.02	1	2	0.28	0.36
3	0.4	0.02	3	1	0.28	0.36
4	0.4	0.02	3	2	0.28	0.37
5	0.4	0.05	1	1	0.28	0.29
6	0.4	0.05	1	2	0.28	0.31
7	0.4	0.05	3	1	0.28	0.31
8	0.4	0.05	3	2	0.28	0.33
9	0.4	0.1	1	1	0.26	0.26
10	0.4	0.1	1	2	0.26	0.29
11	0.4	0.1	3	1	0.26	0.29
12	0.4	0.1	3	2	0.26	0.31
13	0.6	0.02	1	1	0.28	0.5
14	0.6	0.02	1	2	0.28	0.53
15	0.6	0.02	3	1	0.28	0.52
16	0.6	0.02	3	2	0.28	0.55
17	0.6	0.05	1	1	0.28	0.41
18	0.6	0.05	1	2	0.28	0.45
19	0.6	0.05	3	1	0.28	0.44
20	0.6	0.05	3	2	0.28	0.48
21	0.6	0.1	1	1	0.26	0.37
22	0.6	0.1	1	2	0.26	0.41
23	0.6	0.1	3	1	0.26	0.41
24	0.6	0.1	3	2	0.26	0.45
25	0.8	0.02	1	1	0.52	0.64
26	0.8	0.02	1	2	0.52	0.68
27	0.8	0.02	3	1	0.52	0.68
28	0.8	0.02	3	2	0.52	0.71
29	0.8	0.05	1	1	0.52	0.52
30	0.8	0.05	1	2	0.52	0.58
31	0.8	0.05	3	1	0.52	0.57
32	0.8	0.05	3	2	0.52	0.62
33	0.8	0.1	1	1	0.48	0.47
34	0.8	0.1	1	2	0.48	0.53
35	0.8	0.1	3	1	0.48	0.52
36	0.8	0.1	3	2	0.48	0.57

Pour les valeurs $\alpha_{bardage}K_{corr\ la}$ issues des Règles Th-S aucune interpolation n'a été utilisée pour déterminer le coefficient de correction. Pour une épaisseur de lame d'air de 0,02 m les valeurs du Tableau 3 pour une épaisseur de 0,05 m ont été retenues. Pour un coefficient d'absorption solaire du bardage de 0,6 ce sont les coefficients de correction donnés pour une valeur de 0,4 qui sont utilisés. Enfin, les coefficients du Tableau 35 proviennent du Tableau 3 des Règles Th-S pour une hauteur de lame d'air de hauteur inférieure ou égale à 2 m et des Tableau 24 et Tableau 26 pour une hauteur de lame d'air comprise entre 2 et 9 m.

De manière générale les coefficients fournis par les Règles Th-S s'avèrent plus faibles que ceux obtenus par calcul. Cet écart est en moyenne d'environ 34 % et peut atteindre jusqu'à 96 % pour la configuration 15 où le coefficient donné par les Règles Th-S vaut 0.28 alors qu'il est égal à 0.55 d'après les valeurs calculées.

Les Règles Th-S ne déconseillent pas d'extrapoler les données du Tableau 3 pour des épaisseurs de lame d'air et des coefficients d'absorption solaire ne figurant dans le tableau. Pour déterminer les coefficients pour la prise en compte du bardage présentés dans le tableau précédent aucune interpolation n'a été utilisée. Les données auraient pu être déterminées en utilisant une interpolation linéaire. Le tableau suivant présente une extrapolation du Tableau 3 des Règles Th-S pour un coefficient d'absorption solaire $\alpha = 0.6$ et une épaisseur de lame d'air $e_{la} = 0.02 m$. Les données ont été extrapolées uniquement pour une hauteur de lame d'air de 2m ou moins.

Tableau 36 : Valeurs du coefficient $\alpha K_{corr,la}$ avec interpolation linéaire

		H_{la} [m]		
		2 ou moins		
e_{la} [m]	$\alpha_k = 0.4$	$\alpha_k = 0.6$	$\alpha_k = 0.8$	
0	0.40	0.60	0.80	
0.02	0.35	0.52	0.69	
0.05	0.28	0.40	0.52	
0.1	0.26	0.37	0.48	
0.5	0.24	0.34	0.44	

Le tableau suivant présente, à l'échelle des configurations de bardage, l'impact de l'utilisation de ces valeurs obtenues par interpolation en comparaison à une utilisation des valeurs strictement fournies par les Règles Th-S.

Tableau 37 : Impact de l'utilisation d'une interpolation sur les coefficients pour la prise en compte du bardage

N° Config	α	e_{la} [m]	Cat	t_{oss}	$\alpha K_{corr\ la\ simple}$	$\alpha K_{corr\ la\ interpolation}$	$F_{S,ps}$
1	0.4	0.02	1	1	0.28	0.35	0.35
2	0.4	0.02	1	2	0.28	0.35	0.36
3	0.4	0.02	3	1	0.28	0.35	0.36
4	0.4	0.02	3	2	0.28	0.35	0.37
13	0.6	0.02	1	1	0.28	0.52	0.50
14	0.6	0.02	1	2	0.28	0.52	0.53
15	0.6	0.02	3	1	0.28	0.52	0.52
16	0.6	0.02	3	2	0.28	0.52	0.55
17	0.6	0.05	1	1	0.28	0.40	0.41
18	0.6	0.05	1	2	0.28	0.40	0.45
19	0.6	0.05	3	1	0.28	0.40	0.44
20	0.6	0.05	3	2	0.28	0.40	0.48
21	0.6	0.1	1	1	0.26	0.37	0.37
22	0.6	0.1	1	2	0.26	0.37	0.41
23	0.6	0.1	3	1	0.26	0.37	0.41
24	0.6	0.1	3	2	0.26	0.37	0.45
25	0.8	0.02	1	1	0.52	0.69	0.64
26	0.8	0.02	1	2	0.52	0.69	0.68
27	0.8	0.02	3	1	0.52	0.69	0.68
28	0.8	0.02	3	2	0.52	0.69	0.71

En utilisant une interpolation linéaire des valeurs fournies par les Règles Th-S, de manière générale les coefficients obtenus restent inférieurs à ceux calculés. Il apparaît que le recours à une interpolation donne, pour les configurations du tableau précédent, une moyenne des écarts aux coefficients calculés de 6 % avec un écart maximum de 18 % contre respectivement 46 % et 86 % lorsque les valeurs des Règles Th-S sont utilisées sans interpolation. Puisque cela n'est pas proscrit par les Règles Th-S, cette comparaison montre qu'il est préférable de faire usage d'une interpolation pour définir les coefficients pour la prise en compte des bardages.

Pour la suite de cette étude, il est proposé de ne pas faire usage d'une interpolation lorsque les valeurs fournies par les Règles Th-S sont utilisées. Cela permettra d'analyser les écarts maximums qui peuvent être obtenus entre l'utilisation des coefficients issus du modèle physique et ceux fournis par les Règles Th-S.

2.2. Facteur solaire de la paroi avec bardage

Les facteurs solaires de la paroi avec bardage sont calculés à partir des équations (25.1), (25.2), (26.1) et (26.2). Celles-ci font intervenir les produits :

$$R_{se-E} \times U_{k-E} \quad (27.1)$$

$$R_{se-C} \times U_{k-C} \quad (27.2)$$

Où :

$R_{se-E} [m^2.K/W]$ est la résistance thermique superficielle extérieure en condition estivale (convection et rayonnement)

$R_{se-C} [m^2.K/W]$ est la résistance thermique superficielle extérieure en condition hivernale (convection et rayonnement)

$U_{k-E} [W/(m^2.K)]$ est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en période estivale

$U_{k-C} [W/(m^2.K)]$ est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque en période hivernale déterminé selon les Règles Th-U

D'après les Règles Th-S :

$$R_{se-E} = 0,07 m^2.K/W \quad (28.1)$$

$$R_{se-C} = 0,04 m^2.K/W \quad (28.2)$$

$$\frac{1}{U_{k-E}} = \frac{1}{U_{k-C}} + 0,03 \quad (28.3)$$

Dans le cas de la paroi étudiée dont la composition est présentée dans le Tableau 28, les Règles Th-U donnent :

$$U_{k-C} = 0,225 W/(m^2.K) \quad (29.1)$$

$$\frac{1}{U_{k-E}} = \frac{1}{0,225} + 0,03 = 4,474 m^2.K/W \quad (29.2)$$

Les équations (28.1), (28.2), (28.3), (29.1) et (29.2) donnent donc :

$$R_{se-E} \times U_{k-E} = 0,07 \times \frac{1}{4,474} = 0,01565 \quad (30.1)$$

$$R_{se-C} \times U_{k-C} = 0,04 \times 0,225 = 0,00900 \quad (30.2)$$

Le tableau présenté en suivant donne une comparaison entre les facteurs solaires des parois obtenus d'après les Règles Th-S et ceux obtenus en utilisant les coefficients correctifs calculés.

Tableau 38 : Facteurs solaire de paroi pour les différentes configurations de bardage

N° Config	α	e_{la} [m]	Cat	t_{oss}	Th-S		Modèle	
					$F_{S,E}$	$F_{S,C}$	$F_{S,E}$	$F_{S,C}$
1	0.4	0.02	1	1	0.44%	0.25%	0.55%	0.32%
2	0.4	0.02	1	2	0.44%	0.25%	0.56%	0.32%
3	0.4	0.02	3	1	0.44%	0.25%	0.56%	0.32%
4	0.4	0.02	3	2	0.44%	0.25%	0.58%	0.33%
5	0.4	0.05	1	1	0.44%	0.25%	0.45%	0.26%
6	0.4	0.05	1	2	0.44%	0.25%	0.49%	0.28%
7	0.4	0.05	3	1	0.44%	0.25%	0.49%	0.28%
8	0.4	0.05	3	2	0.44%	0.25%	0.52%	0.30%
9	0.4	0.1	1	1	0.41%	0.23%	0.41%	0.23%
10	0.4	0.1	1	2	0.41%	0.23%	0.45%	0.26%
11	0.4	0.1	3	1	0.41%	0.23%	0.45%	0.26%
12	0.4	0.1	3	2	0.41%	0.23%	0.49%	0.28%
13	0.6	0.02	1	1	0.44%	0.25%	0.78%	0.45%
14	0.6	0.02	1	2	0.44%	0.25%	0.83%	0.48%
15	0.6	0.02	3	1	0.44%	0.25%	0.81%	0.47%
16	0.6	0.02	3	2	0.44%	0.25%	0.86%	0.50%
17	0.6	0.05	1	1	0.44%	0.25%	0.64%	0.37%
18	0.6	0.05	1	2	0.44%	0.25%	0.70%	0.41%
19	0.6	0.05	3	1	0.44%	0.25%	0.69%	0.40%
20	0.6	0.05	3	2	0.44%	0.25%	0.75%	0.43%
21	0.6	0.1	1	1	0.41%	0.23%	0.58%	0.33%
22	0.6	0.1	1	2	0.41%	0.23%	0.64%	0.37%
23	0.6	0.1	3	1	0.41%	0.23%	0.64%	0.37%
24	0.6	0.1	3	2	0.41%	0.23%	0.70%	0.41%
25	0.8	0.02	1	1	0.81%	0.47%	1.00%	0.58%
26	0.8	0.02	1	2	0.81%	0.47%	1.06%	0.61%
27	0.8	0.02	3	1	0.81%	0.47%	1.06%	0.61%
28	0.8	0.02	3	2	0.81%	0.47%	1.11%	0.64%
29	0.8	0.05	1	1	0.81%	0.47%	0.81%	0.47%
30	0.8	0.05	1	2	0.81%	0.47%	0.91%	0.52%
31	0.8	0.05	3	1	0.81%	0.47%	0.89%	0.51%
32	0.8	0.05	3	2	0.81%	0.47%	0.97%	0.56%
33	0.8	0.1	1	1	0.75%	0.43%	0.74%	0.42%
34	0.8	0.1	1	2	0.75%	0.43%	0.83%	0.48%
35	0.8	0.1	3	1	0.75%	0.43%	0.81%	0.47%
36	0.8	0.1	3	2	0.75%	0.43%	0.89%	0.51%

Les valeurs des facteurs solaires présentées dans le Tableau 38 sont directement proportionnelles aux coefficients du Tableau 35. La seule observation supplémentaire qui peut être faite concerne la valeur du facteur solaire pour une paroi opaque. Dans la majorité des cas, moins de 1 % du flux solaire radiatif incident sur les parois opaques est transmis à l'intérieur du bâtiment. Ce facteur solaire est nettement inférieur à celui d'une paroi vitrée qui est d'environ 50 %. De ce fait, même si la surface de paroi vitrée est inférieure à celle des parois opaques, il apparaît que la grande majorité du flux solaire transmis au bâtiment le sera par le biais des parois vitrées. Les faibles différences observées sur les valeurs du facteur solaire du mur ne devraient avoir qu'une faible influence sur les indicateurs réglementaires.

Les facteurs solaires présentés dans le tableau précédent peuvent être comparés à ceux obtenus pour une paroi similaire sans bardage. La composition de cette paroi avec enduit est présentée dans le Tableau 33. Si pour sa face extérieure un coefficient d'absorption solaire $\alpha_k = 0.4$ est retenu (surface de couleur claire comme la plupart des enduits extérieurs), les Règles Th-S donnent les facteurs solaires suivants.

$$S_{f-C,k} = \alpha_k \times U_{k-C} \times R_{se-C} \quad (31.1)$$

$$S_{f-C,k} = 0.4 \times 0.225 \times 0.04 = 0.0036 \quad (31.2)$$

$$S_{f-E,k} = \alpha_k \times U_{k-E} \times R_{se-E} \quad (32.1)$$

$$S_{f-E,k} = 0.4 \times 0.223 \times 0.07 = 0.0062 \quad (32.2)$$

Comme attendu, la comparaison des valeurs précédentes à celles données dans le Tableau 38 pour un même coefficient d'absorption solaire ($\alpha_k = 0.4$) montre que la mise en place d'un bardage permet de réduire le facteur solaire de la paroi. En revanche, si le coefficient d'absorption solaire de la peau du bardage est plus important ($\alpha_k = 0.6$ ou 0.8), alors les facteurs solaires donnés par application du modèle physique sont plus élevés que ceux obtenus pour le mur enduit. Sur la configuration étudiée, il s'avère que la mise en place d'un bardage ne permet pas de réduire les facteurs solaires de la paroi comparativement à ceux d'un mur enduit si le coefficient d'absorption solaire de la peau de bardage est plus élevé que celui de l'enduit extérieur.

3. IMPACT SUR LES INDICATEURS REGLEMENTAIRES

A partir du logiciel PLEIADES + COMFIE un calcul RT est effectué pour chaque configuration de bardage. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Impact sur les indicateurs réglementaires

N° Config	α	e_{i0} [m]	Cat	t_{oss}	Th-S				Modèle			
					$Bbio$	$Bbio_{max}$	Tic	Tic_{ref}	$Bbio$	$Bbio_{max}$	Tic	Tic_{ref}
1	0.4	0.02	1	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.8	33.8
2	0.4	0.02	1	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.9	33.8
3	0.4	0.02	3	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.9	33.8
4	0.4	0.02	3	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.9	33.8
5	0.4	0.05	1	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.8	33.8
6	0.4	0.05	1	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.8	33.8
7	0.4	0.05	3	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.8	33.8
8	0.4	0.05	3	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.4	42.0	33.8	33.8
9	0.4	0.1	1	1	34.6	42.0	33.8	33.8	34.6	42.0	33.8	33.8
10	0.4	0.1	1	2	34.6	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.8	33.8
11	0.4	0.1	3	1	34.6	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.8	33.8
12	0.4	0.1	3	2	34.6	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.8	33.8
13	0.6	0.02	1	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.3	42.0	33.9	33.8
14	0.6	0.02	1	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.2	42.0	33.9	33.8
15	0.6	0.02	3	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.2	42.0	33.9	33.8
16	0.6	0.02	3	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.1	42.0	33.9	33.8
17	0.6	0.05	1	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.4	42.0	33.9	33.8
18	0.6	0.05	1	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.3	42.0	33.9	33.8
19	0.6	0.05	3	1	34.5	42.0	33.8	33.8	34.4	42.0	33.9	33.8
20	0.6	0.05	3	2	34.5	42.0	33.8	33.8	34.3	42.0	33.9	33.8
21	0.6	0.1	1	1	34.6	42.0	33.8	33.8	34.5	42.0	33.9	33.8
22	0.6	0.1	1	2	34.6	42.0	33.8	33.8	34.4	42.0	33.9	33.8
23	0.6	0.1	3	1	34.6	42.0	33.8	33.8	34.4	42.0	33.9	33.8
24	0.6	0.1	3	2	34.6	42.0	33.8	33.8	34.3	42.0	33.9	33.8
25	0.8	0.02	1	1	34.2	42.0	33.9	33.8	33.9	42.0	34	33.8
26	0.8	0.02	1	2	34.2	42.0	33.9	33.8	33.9	42.0	34	33.8
27	0.8	0.02	3	1	34.2	42.0	33.9	33.8	33.9	42.0	34	33.8
28	0.8	0.02	3	2	34.2	42.0	33.9	33.8	33.8	42.0	34	33.8
29	0.8	0.05	1	1	34.2	42.0	33.9	33.8	34.2	42.0	33.9	33.8
30	0.8	0.05	1	2	34.2	42.0	33.9	33.8	34.1	42.0	34	33.8
31	0.8	0.05	3	1	34.2	42.0	33.9	33.8	34.1	42.0	34	33.8
32	0.8	0.05	3	2	34.2	42.0	33.9	33.8	34	42.0	34	33.8
33	0.8	0.1	1	1	34.3	42.0	33.9	33.8	34.3	42.0	33.9	33.8
34	0.8	0.1	1	2	34.3	42.0	33.9	33.8	34.2	42.0	33.9	33.8
35	0.8	0.1	3	1	34.3	42.0	33.9	33.8	34.2	42.0	33.9	33.8
36	0.8	0.1	3	2	34.3	42.0	33.9	33.8	34.1	42.0	34	33.8

Les résultats présentés dans le Tableau 39 montre que de manière générale le type de bardage mis en place n'a que peu d'impact sur les indicateurs réglementaire $Bbio$ et Tic quelle que soit la méthode de caractérisation utilisée. Pour les configurations étudiées le $Bbio$ est compris entre 33,8 points et 34,6 points soit un intervalle de 0,8 point. La Tic est quant à elle comprise entre 33,8 °C et 34,0 °C soit un intervalle de seulement 0,2 °C. Malgré que le type de bardage mis en place ne modifie que peu les valeurs des indicateurs réglementaires, il est possible d'observer que son impact sur le facteur solaire de la paroi influence de manière plus significative le $Bbio$ que la Tic . Les résultats obtenus montrent également que la valeur de la Tic est dans tous les cas supérieure ou égale à la température intérieure conventionnelle de référence Tic_{ref} alors que la valeur du $Bbio$ reste nettement inférieure au $Bbio_{max}$. Un tel résultat est justifié par la faible inertie du bâtiment qui ne possède aucune paroi « lourde ».

Le Tableau 39 permet de comparer les valeurs des indicateurs réglementaires obtenues par application des Règles Th-S à celles obtenues par application du modèle physique. Comme pressenti, il n'apparaît que peu de différence d'une méthode à l'autre. Il est toutefois possible de remarquer que la température intérieure conventionnelle Tic obtenue par application des Règles Th-S est pour toutes les configurations étudiées inférieure ou égale à la Tic obtenue via le modèle physique. Cette différence est au maximum de seulement 0,1 °C. De manière similaire, le $Bbio$ calculés en appliquant les coefficients de correction des Règles Th-S sont dans tous les cas supérieurs à ceux obtenus par le biais des coefficients correctifs du modèle physique. Pour le besoin bioclimatique l'écart est au maximum de 0,4 point. Ces différences peuvent être expliquées par les valeurs des facteurs solaires

de la paroi qui sont dans la majorité des cas plus importantes lorsque les coefficients correctifs issus de l'application du modèle physique sont utilisés.

Les résultats des calculs réglementaires permettent d'observer que pour certaines configurations de bardage, le passage d'une catégorie de bois 1 à une catégorie 3 entraîne une diminution du B_{bio} qui est au maximum de 0,1 point. Ce passage d'une catégorie à l'autre a l'effet contraire sur la valeur de la T_{ic} qui augmente au maximum de 0,1 °C. De telles observations sont dues à l'impact de la catégorie de bois sur la valeur du facteur solaire de la paroi.

Pour ce qui est du type d'ossature support du bardage, pour une configuration de bardage donnée, le passage d'une ossature simple à une mise en œuvre sur contre ossature entraîne une diminution quasi systématique du B_{bio} de 0,1 point. Cette même différence de mise en œuvre entraîne au contraire une augmentation de la T_{ic} d'au maximum 0,1 °C. L'impact du type d'ossature sur les indicateurs réglementaires est dû à l'augmentation du facteur solaire de la paroi engendrée par le passage d'une ossature simple à une mise en œuvre sur contre ossature.

Le contenu du Tableau 39 met en évidence que le type d'ossature support du bardage a plus d'influence sur les indicateurs réglementaires que la catégorie de bois. Comme proposé dans la partie 4 de ce chapitre et vu les résultats obtenus, il s'avère pertinent de ne conserver que les coefficients correctifs obtenus pour l'une des catégories de bois. En considérer plusieurs apporte finalement peu au regard de l'augmentation du nombre de coefficients correctifs à prendre en compte. De la sorte, il est proposé de ne retenir que les valeurs calculées pour la catégorie de bois 1. Pour la majorité des applications les caractéristiques des bois de bardage se rapprocheront de cette catégorie qui possède les propriétés données dans le Tableau 40. Dans ce cas ce sont les valeurs des coefficients correctifs données dans le Tableau 24 qui sont à prendre en compte.

Tableau 40 : Propriétés d'un bois de catégorie 1

λ [W/(m.K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg.K)]
0,14	434	1600

Aussi, pour les 36 configurations de bardage étudiées, les résultats obtenus montrent que la prise en compte du type d'ossature et la discrétisation plus fine des plages de variation des paramètres décrivant le bardage trouvent un intérêt notamment lorsque $\alpha_{bardage} = 0,8$. D'après les Règles Th-S, dans tous les cas étudiés avec cette valeur du coefficient d'absorption solaire, les indicateurs réglementaires prennent les valeurs $B_{bio} = 34,2$ points ou 34,3 et $T_{ic} = 33,9$ °C alors qu'avec l'utilisation des coefficients correctifs issus du modèle physique ces indicateurs sont respectivement compris entre 33,8 et 34,3 points et entre 33,9 et 34 °C.

Enfin, les valeurs présentées dans le Tableau 39 peuvent être comparées aux valeurs des indicateurs réglementaires obtenus pour une configuration dans laquelle les parois extérieures sont enduites. La composition considérée pour cette paroi sans bardage est présentée dans le Tableau 33 et les valeurs de ses facteurs solaires sont données par les équations (31) et (32). Pour la configuration sans bardage les indicateurs réglementaires prennent les valeurs $B_{bio} = 33,2$ points et $T_{ic} = 34,1$ °C. La valeur maximale atteinte pour la T_{ic} des configurations avec bardage est de 34 °C et la valeur minimale pour le B_{bio} est de 33,8 points. Il a été montré précédemment que les facteurs solaires de la paroi enduite ne sont pas forcément supérieurs à ceux des parois avec bardage. Pourtant, cette comparaison des indicateurs réglementaires montre que la paroi avec enduit est plus défavorable au confort estival que celles munies d'un bardage. Ce résultat s'explique par la modélisation des parois avec bardage de la RT qui consiste à ne pas prendre en compte la lame d'air ventilée et le bardage et à prendre la résistance thermique superficielle extérieure telle que $R_{se} = R_{si}$ (Figure 1 des Règles Th-U fascicule

4). Finalement, malgré les facteurs solaires des parois avec bardage parfois supérieurs à ceux des parois enduites, la mise en place d'un bardage peut s'avérer bénéfique pour le confort estival.

SYNTHESE

L'objectif de la sous tâche 2.3 du projet THERMIQUE ETE BOIS consiste à proposer une alternative de modélisation des bardages pour la méthode de calcul RT 2012 afin d'explorer la possibilité de valoriser les constructions bois vis-à-vis du confort estival. Pour le calcul du facteur solaire d'une paroi opaque, les Règles Th-S prennent en compte la présence d'une lame d'air ventilée par l'introduction d'un coefficient de correction. Celui-ci dépend alors de quelques paramètres du bardage. Dans cette étude, l'utilisation d'un coefficient correctif est proposée. Celui-ci considère un nombre plus important de paramètres et une discrétisation plus fine de leur intervalle de variation. Le calcul de ces coefficients correctifs est opéré par le biais d'un modèle physique qui a fait l'objet d'une validation expérimentale dans le cadre de travaux antérieurs au projet THERMIQUE ETE BOIS.

Les Règles Th-S proposent l'équation suivante pour le calcul du facteur solaire d'une paroi opaque avec lame d'air ventilée :

$$F_S = \alpha_{bardage} \times K_{corr_{la}} \times R_{se} \times U_k \quad (33)$$

Où :

$\alpha_{bardage}$ [1] est le coefficient d'absorption solaire de la peau du bardage

R_{se} [$m^2 \cdot K/W$] est la résistance thermique superficielle extérieure (convection et rayonnement)

U_k [$W/(m^2 \cdot K)$] est le coefficient de transmission thermique de la paroi opaque

$K_{corr_{la}}$ [1] est le coefficient de correction associé à la prise en compte de la lame d'air extérieure ventilée issu du tableau présenté en suivant.

Tableau 41 : Coefficients de correction, Règles Th-S

	H_{la} (m)			
	2 ou moins		10 ou plus	
e_{la} (m)	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$	$\alpha_k = 0,4$	$\alpha_k = 0,8$
0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,05	0,70	0,65	0,70	0,70
0,1	0,65	0,60	0,65	0,60
0,5	0,60	0,55	0,55	0,50

Le travail présenté de ce document propose l'utilisation d'un coefficient correctif afin de considérer l'impact du bardage sur le facteur solaire de la paroi. L'emploi de ce coefficient correctif est semblable à celui du coefficient de correction des Règles Th-S facilitant ainsi son appropriation et sa potentielle intégration au code de calcul RT 2012. L'équation donnant le facteur solaire de la paroi opaque est la suivante :

$$F_S = F_{S,ps} \times R_{se} \times U_k \quad (34)$$

Où :

$F_{S,ps}$ [1] est le coefficient correctif associé au bardage

Dans le cadre de cette étude, des coefficients correctifs ont été calculés pour les bardages à parement bois. Le recours à l'analyse de sensibilité a permis de proposer des valeurs pour ces coefficients qui dépendent uniquement des variables les plus influentes. De ce fait, en plus des paramètres employés dans les Règles Th-S, l'influence du type d'ossature support du bardage est considérée. Des valeurs des coefficients correctifs sont ainsi données pour des bardages mis en œuvre sur une ossature verticale et également sur une contre ossature horizontale. Le tableau suivant présente les valeurs calculées :

Tableau 42 : Valeurs des coefficients correctifs pour un bardage bois

Catégorie 1	H _{la} [m]											
	[2;9]				]9;16]				]16;24]			
e _{la} [m]	α _k = 0,4	α _k = 0,6	α _k = 0,8	α _k = 1	α _k = 0,4	α _k = 0,6	α _k = 0,8	α _k = 1	α _k = 0,4	α _k = 0,6	α _k = 0,8	α _k = 1
[0,02;0,05[	0.35 0.36	0.50 0.53	0.64 0.68	0.78 0.84	0.36 0.38	0.52 0.55	0.68 0.72	0.83 0.89	0.37 0.39	0.54 0.57	0.70 0.75	0.86 0.92
[0,05;0,08[	0.29 0.31	0.41 0.45	0.52 0.58	0.63 0.70	0.30 0.34	0.44 0.49	0.56 0.63	0.68 0.77	0.32 0.36	0.46 0.52	0.59 0.67	0.71 0.82
[0,08;0,1]	0.26 0.29	0.37 0.41	0.47 0.53	0.57 0.64	0.28 0.32	0.40 0.45	0.51 0.58	0.61 0.71	0.29 0.34	0.42 0.48	0.53 0.63	0.64 0.76

En gris les valeurs pour un bardage sur contre ossature horizontale

L'épaisseur de la lame d'air comprend l'ossature principale et la contre ossature

Différentes variantes de la maison individuelle du Catalogue Construction Bois ont été étudiées afin d'appréhender l'impact de l'utilisation de ces coefficients correctifs sur les indicateurs réglementaires. Les résultats s'avèrent semblables à ceux obtenus lorsque les coefficients de correction des Règles Th-S sont utilisés. Pour les configurations étudiées, l'emploi de la méthode proposée permet une réduction du *Bbio* d'au maximum 0,4 point et engendre une augmentation de la *Tic* d'au maximum 0,1 °C.

Aussi, lors de ce travail les résultats obtenus avec les différentes configurations de bardage ont été comparés à ceux obtenus pour une paroi enduite. Il s'avère que pour les parois avec bardage, les facteurs solaires peuvent être plus élevés que ceux obtenus pour la paroi avec enduit sans toutefois que cela nuise au confort estival. Au contraire, la comparaison effectuée montre que c'est avec la paroi enduite que la valeur maximale de la *Tic* est obtenue. Ce résultat peut-être expliqué par la prise en compte des résistances superficielles par le RT pour les parois avec bardage.

Finalement, les conclusions de ce travail confortent la pertinence des valeurs proposées dans les Règles Th-S pour les coefficients de correction. La prise en compte actuelle du bardage dans la méthode de calcul RT 2012 s'avère satisfaisante et l'évolution proposée dans cette étude ne permet pas une valorisation des constructions bois vis-à-vis du confort estival. Toutefois, le travail mené semble faciliter la prise en compte d'un bardage lors de l'application de la méthode de calcul réglementaire. Le Tableau 42 ne laisse pas de doute quant au choix de la valeur à retenir pour le coefficient correctif. Aussi les plages de variations des différents paramètres, définies selon les pratiques de mises en œuvre, couvrent la majorité des applications courantes.

REFERENCES

CSTB ; RT 2012 – Règles Th-S : Caractérisation du facteur solaire des parois du bâtiment, 2012

CSTB ; RT 2012 – Règles Th-U (fascicule 2/5) : Matériaux, 2012

CSTB ; RT 2012 – Règles Th-U (fascicule 4/5) : Parois opaques, 2012

AFNOR ; NF DTU 31.2 – Travaux de bâtiment – Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois, 2011

AFNOR ; NF DTU 41.2 – Travaux de bâtiment – Revêtements extérieurs en bois, 2015

Ministère de l'intérieur ; Instruction technique n°249 relative aux façades, 2010

CSTB ; Cahier du CSTB 3316 V2 – GS2 : Ossature bois et isolation thermique des bardages rapportés faisant l'objet d'un avis technique ou d'un constat de traditionnalité – Règles générales de conception et de mise en œuvre, 2010

RAGE ; Recommandations professionnelles : Bardages en acier protégé et en acier inoxydable, 2014

RAGE ; Recommandations professionnelles : Mise en œuvre des procédés de bardage rapporté à lame d'air ventilée, 2015

A. DUGUE ; Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations, 2013

I.E IDEL'CIK ; Mémento des pertes de charge, 1986

J. FALK, K. SANDIN ; Building and Environment 59 (2013), Ventilated rainscreen cladding : Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces

B. HELLSTROM, H. KVIST, H. HAKANSSON, H. BULOWHUBE ; Energy and Building 39 (2007), Description of ParaSol v3.0 and comparison with measurements

B. IOOSS ; Journal de la Société Française de Statistique, Vol. 152 No 1 3-25 (2011), Revue sur l'analyse de sensibilité globale de modèles numériques

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