



FICHE D'APPLICATION DE LA REGLEMENTATION ENERGETIQUE DES

BATIMENTS

EN POLYNESIE FRANCAISE

FICHE THEMATIQUE N°2 : PROTECTION SOLAIRE DES PAROIS OPAQUES HORIZONTALES (TOITURES)



Cette fiche synthétise de manière exhaustive les règles et les paramètres de calcul pour évaluer les performances des parois opaques horizontales des constructions, plus communément appelées toitures. Au travers de cette fiche, on apporte la réponse aux questions suivantes :

- À quel local s'applique la disposition de protection solaire de la toiture ?**
- Comment calculer le facteur solaire de ma toiture ?**
- Quelles sont les solutions techniques courantes pour atteindre le seuil ?**

Version juillet 2023

SOMMAIRE

| | | |
|------|--|----|
| I. | Enjeux de la protection solaire des toitures..... | 3 |
| II. | Textes de référence | 4 |
| 1. | Loi de Pays..... | 4 |
| 2. | Délibération | 4 |
| 3. | Arrêté CM | 4 |
| III. | Définitions..... | 5 |
| IV. | Périmètre d'application de la thématique | 7 |
| V. | Calcul du facteur solaire de la paroi horizontale opaque | 9 |
| 1. | Seuil et formule de calcul | 9 |
| 2. | Coefficient d'absorption (alpha) | 9 |
| A. | Détermination du coefficient d'absorption | 9 |
| B. | Cas des toitures ventilées | 12 |
| C. | Cas des écrans non continus | 12 |
| 3. | Résistance thermique (R) | 14 |
| A. | Présentation de la résistance thermique et de son principe | 14 |
| B. | Cas des lames d'air peu ventilées | 16 |
| C. | Cas des lames d'air assez ventilées, ventilées et très ventilées | 18 |
| D. | Cas des Produits Mince Réfléchissants (PMR) | 18 |
| 4. | Coefficient de réduction lié à la ventilation (Cv) | 20 |
| A. | Calcul du taux d'ouverture A_o/A_p | 21 |
| B. | Détermination du coefficient CV | 23 |
| C. | Écran continu ou non continu..... | 23 |
| 5. | Cas des toitures en bardeaux de bois | 25 |
| 6. | Cas des toitures végétalisées | 26 |
| VI. | Études de cas | 28 |
| 1. | Toitures considérées comme non ventilées | 28 |
| 2. | Toitures considérées comme ventilées | 32 |
| 3. | Contre-exemples..... | 36 |
| VII. | Exemples de dispositions conformes à la REBPf..... | 39 |
| 1. | Couverture en tôle « peu ou pas ventilée » | 39 |
| 2. | Couverture en tôle « assez ventilée » | 39 |
| 3. | Couverture en tôle « ventilée » | 39 |
| 4. | Couverture en tôle « très ventilée » | 40 |
| 5. | Toiture-terrace en béton « peu ou pas ventilée »..... | 40 |
| 6. | Couverture en matériaux naturels « peu ou pas ventilée »..... | 40 |
| 7. | Couverture en matériaux naturels « ventilée »..... | 40 |

I. ENJEUX DE LA PROTECTION SOLAIRE DES TOITURES

Les thématiques liées à l'enveloppe du bâtiment (protection solaire des toitures, murs et baies) permettent de réduire les consommations de climatisation, qui diminuent dès lors que la chaleur accumulée dans les bâtiments est réduite.

Les apports de chaleur solaire depuis la toiture peuvent représenter plus de la moitié des apports totaux sur un bâtiment. La protection solaire des toitures constitue donc un enjeu majeur pour améliorer la sobriété énergétique des bâtiments en Polynésie française.

Cette thématique traite des dispositifs destinés à **protéger la couverture** d'un bâtiment des effets du rayonnement solaire. Elle est tellement importante qu'elle est la seule à s'appliquer à l'ensemble du Territoire de la Polynésie française et pour tous les bâtiments.

Les dispositifs tels que l'isolation ou la couleur de revêtement, permettent de limiter efficacement et à moindre coût ces apports solaires et améliorent le confort dans le bâtiment.

Il existe d'innombrables solutions techniques pour protéger un bâtiment des apports solaires, c'est pourquoi la réglementation est élaborée pour garantir une grande liberté architecturale quant au choix des processus constructifs.

Cette liberté est rendue possible par la mise en place d'une méthodologie de calcul permettant de déterminer l'efficacité de la protection thermique des complexes de couverture.

Celle-ci est basée sur le calcul du **facteur solaire** qui correspond à la capacité de la couverture à transmettre, à l'intérieur du bâtiment, tout ou partie de l'énergie solaire qu'elle reçoit. Un tel indicateur implique une exigence de résultat, plutôt qu'une exigence de moyens, pour se conformer à la réglementation.

II. TEXTES DE REFERENCE

1. Loi de Pays

Loi de Pays n°2022-8 du 24 janvier 2022 portant création de la réglementation énergétique des bâtiments et modifiant le livre II du code de l'aménagement de la Polynésie française

L'article LP 212-1 présente les définitions applicables à la réglementation. Certaines sont développées dans le **chapitre III** de la présente fiche.

2. Délibération

Délibération n°2022-46 APF du 26 avril 2022 complétant les titres 2 à 6 du livre II de la première partie du code de l'aménagement de la Polynésie française, relatif à la réglementation énergétique des bâtiments

Les dispositions relatives aux performances thermiques de la protection solaire des parois opaques horizontales sont précisées dans les articles suivants :

- L'article D. 221-1 fixe le facteur solaire maximal des parois opaques horizontales à 2,5% et les zones géographiques concernées ;
- L'article D. 221-2 précise les bâtiments et les locaux concernés.

3. Arrêté CM

Arrêté n°2028 CM du 30 septembre 2022 portant dispositions d'application du livre II du code de l'aménagement de la Polynésie française relatif à la réglementation énergétique des bâtiments

Les conditions de mise en œuvre et de calcul des procédés techniques relatives à la protection solaire des parois opaques horizontales des bâtiments sont fixées au travers des articles suivants :

- L'article A.212-1, et plus précisément l'annexe 2, fixe le caractère occupé ou non occupé d'une liste non exhaustive de locaux ;
- L'article A. 221-1 précise la formule de calcul du facteur solaire ;
- L'article A. 221-2 cadre les dispositions relatives au calcul du coefficient d'absorption (alpha) des matériaux ;
- L'article A. 221-3 cadre les dispositions relatives au calcul de la résistance thermique des matériaux ;
- L'article A. 221-4 cadre les dispositions relatives au calcul du coefficient de ventilation (Cv) pour les toitures dites « ventilées » ;
- L'article A. 221-5 traite des modalités de calcul pour les toitures en bardeau de bois avec sous-face apparente ;
- L'article A. 221-6 cadre des modalités de calcul pour l'utilisation des Produits Mince Réfléchissants (PMR).

III.DEFINITIONS

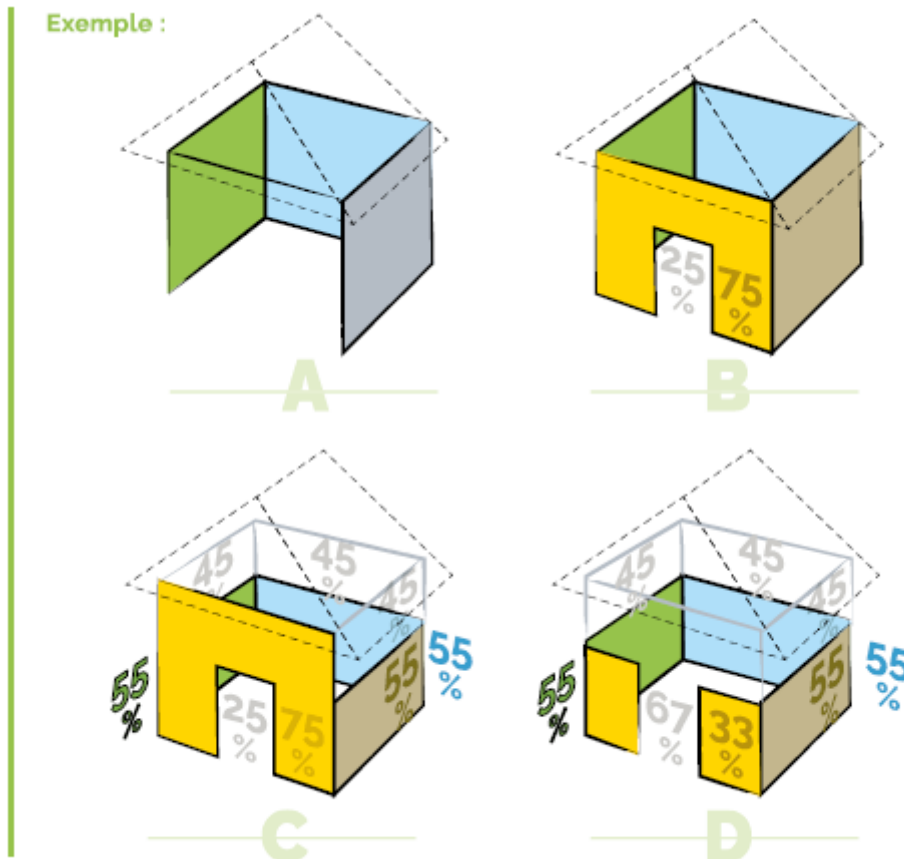
« Local non occupé »

Un local non occupé est défini comme étant « occupé de façon non temporaire ». C'est un local qui, par destination, n'implique pas une durée de séjour consécutive pour un occupant supérieure à une heure.

Un tableau précisant le caractère occupés ou non occupés de certains locaux est présenté au **chapitre IV**.

« Local clos »

Un local clos est un local disposant d'une couverture dont chaque paroi verticale donnant sur l'extérieur est obstruée ou obturable par un dispositif de fermeture, fixe ou mobile, sur plus de 50% de sa surface (hors éléments de structure porteuse).



- A : Local non clos car au moins une paroi est ouverte sur plus de 50% de sa surface
- B : Local clos car toutes les parois sont ouvertes sur moins de 50% de leur surface
- C : Local clos car les 4 parois sont ouvertes sur moins de 50% de leur surface
- D : Local non clos car au moins une paroi est ouverte sur plus de 50% de sa surface

« Local en contact avec l'extérieur »

Un local en contact avec l'extérieur a une partie de son enveloppe en contact avec l'extérieur ou un local considéré comme extérieur, c'est-à-dire non clos. L'enveloppe d'un local est composée du plancher haut (ou couverture) et des murs périphériques. Les combles de toiture, non occupés ou non climatisés, ne sont considérés ni comme des locaux ni comme l'extérieur, si bien qu'un plancher haut donnant sur un comble est considéré comme formant une unique paroi avec la couverture située au-dessus du comble, autrement appelé « complexe de toiture ».

« Paroi opaque »

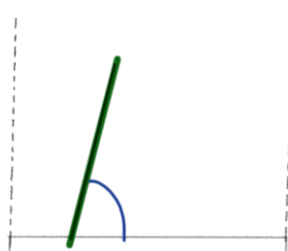
Une paroi verticale (mur) ou horizontale (toiture) est dite opaque lorsqu'elle n'est ni transparente ni translucide. Une paroi est transparente ou translucide si son facteur de transmission lumineuse (hors protection mobile éventuelle) est égal ou supérieur à 0,05.

« Transmission lumineuse »

La transmission lumineuse est un facteur qui caractérise la quantité de lumière transmise à travers un matériau. Plus il est élevé, meilleur est le passage de la lumière.

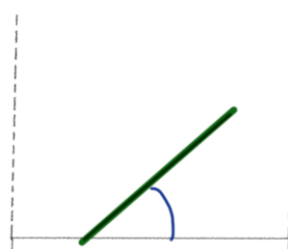
« Paroi ou baie verticale ou horizontale »

Une baie ou une paroi est dite verticale lorsque l'angle de cette baie ou paroi vue de l'intérieur avec le plan horizontal est égal ou supérieur à 60 degrés, elle est dite horizontale lorsque cet angle vu de l'intérieur est inférieur à 60 degrés.



ANGLE $\geq 60^\circ$

PAROI OU BAIE VERTICALE



ANGLE $< 60^\circ$

PAROI OU BAIE HORIZONTALE

« Facteur solaire »

Le facteur de transmission solaire ou FS caractérise la capacité d'une paroi horizontale ou verticale, ou d'une baie à transmettre tout ou partie de l'énergie qu'elle reçoit et correspond au rapport entre l'énergie transmise à l'intérieur du local et l'énergie solaire reçue sur la face extérieure de cette paroi ou de cette baie.

« Coefficient de masque Cm »

Le coefficient de masque ou Cm est un coefficient de réduction qui correspond à la présence d'un masque architectural ou naturel créant un effet d'ombrage sur une paroi opaque verticale ou une baie.

« Écran continu ou non continu »

Un écran est une paroi opaque. Il est continu dès lors qu'il est intégralement opaque sur l'ensemble de sa surface. Il est non continu dès lors qu'il existe, à un ou plusieurs endroits de sa surface, sans limite de taille, une absence de matériau.

« Toiture ventilée »

Une toiture est considérée comme ventilée à partir du moment où des ouvertures permanentes sous la toiture sont créées et que celles-ci sont suffisamment grandes pour assurer une circulation d'air. Cette taille minimale est indiquée dans le tableau présentant les coefficients de réduction liés à la ventilation.

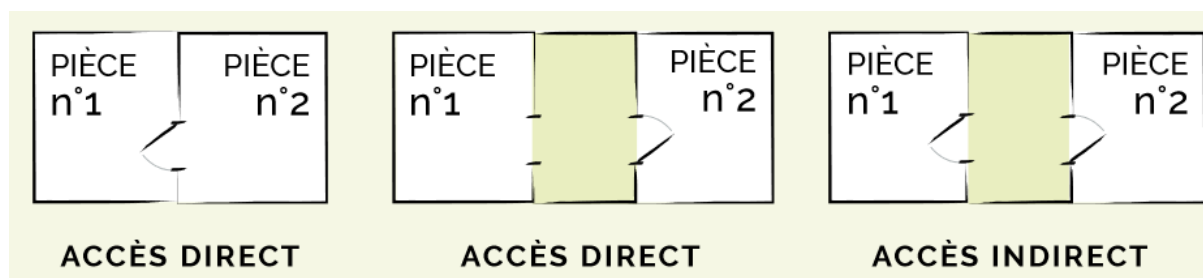
Une ouverture correspond à l'absence de dispositif constructif pour empêcher la circulation de l'air entre l'intérieur et l'extérieur du local. Elle est considérée comme permanente en cas d'absence de tout dispositif fixe ou mobile entravant la circulation d'air ; dans les autres cas l'ouverture est considérée comme non permanente.

IV. PERIMETRE D'APPLICATION DE LA THEMATIQUE

L'ensemble des constructions neuves et extensions de bâtiments doit appliquer les dispositions relatives à la protection solaire des toitures

Les dispositions relatives à la protection solaire des toitures s'appliquent à l'ensemble des **locaux clos et occupés ou climatisés**, en contact avec l'extérieur. Les locaux **non occupés** bénéficiant d'un accès direct vers un ou plusieurs locaux clos et occupés ou climatisés sont également soumis à ces dispositions, à l'exception des locaux techniques, stationnements et espaces de stockage.

Un accès indirect entre deux locaux est caractérisé par la présence d'un local clos tiers entre les deux locaux considérés, disposant d'une porte le séparant de chacun des deux locaux considérés.



Le tableau ci-dessous, non exhaustif, présente les types de locaux concernés ou non dans le périmètre d'application des thématiques de la protection solaire :

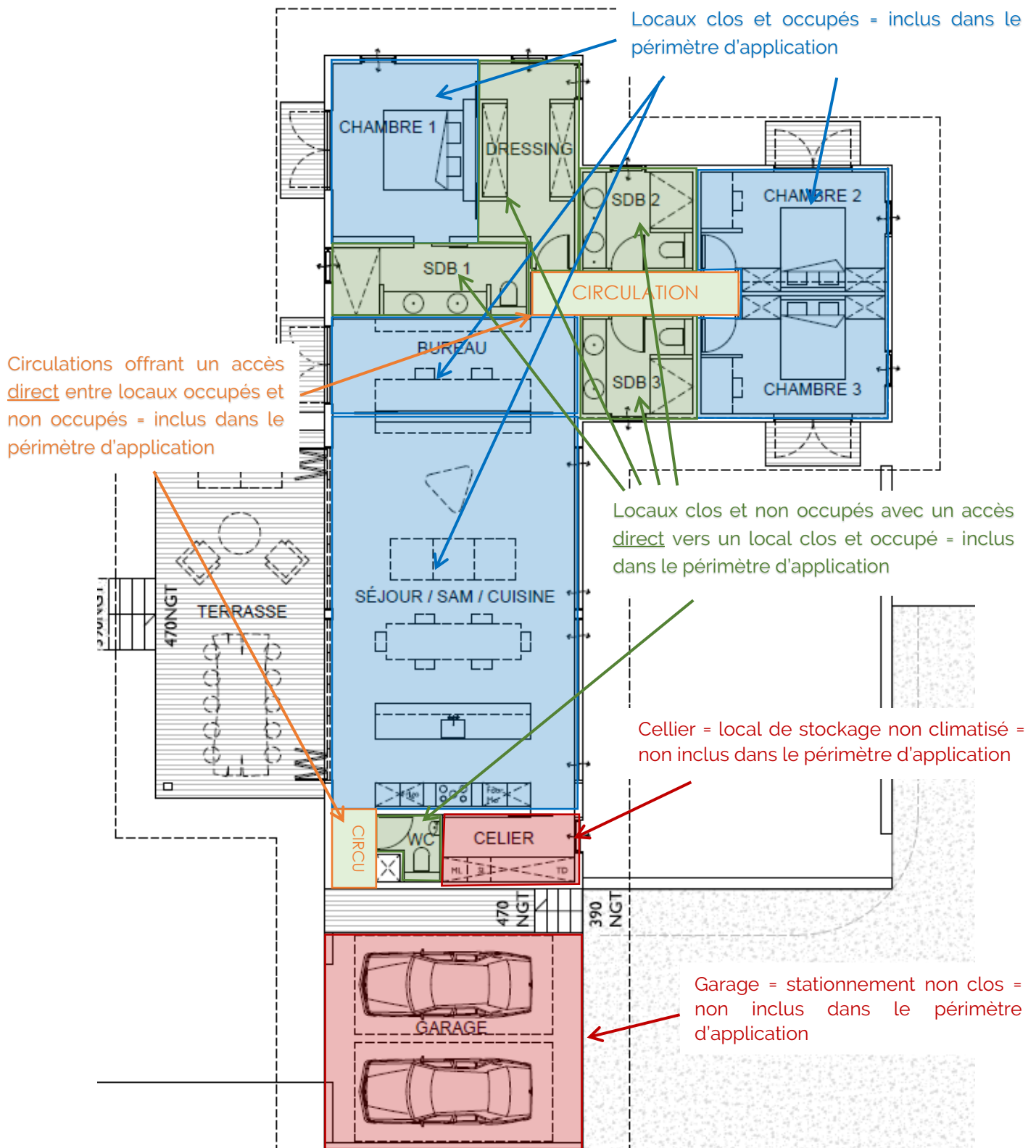
| Types de locaux | Concerné |
|--|---|
| Chambres et séjours (y compris salle à manger) | OUI |
| Locaux d'activités diverses : atelier, détente, cafétéria, espace polyvalent, bibliothèque, informatique, salle de massage, cuisine/restauration, commerces, salles de spectacle, salle jeux, salle de réunion, salle de sport, etc. | OUI |
| Cuisine privative | OUI |
| Espaces de travail (bureau) y compris espaces d'accueil avec personnel permanent | OUI |
| Buanderie professionnelle (dès lors qu'elle constitue un lieu de travail) | OUI |
| Espace d'attente | OUI |
| Réfectoire et cuisine | OUI |
| Salle de bain & sanitaire (privatifs et collectifs) | Si climatisé ou si accès direct à un local occupé/climatisé |
| Buanderie privative et collective en « self-service » | |
| Dégagements privatifs ou communs (circulations, escaliers, dressing, couloirs, escaliers, paliers, halls, etc.) | |
| Vestiaires (privatifs et collectifs) | Si climatisé |
| Cellier, débarras, stockage | |
| Parking clos | |
| Local poubelle | |
| Locaux techniques | |

En gris les locaux non occupés

En vert les locaux occupés

Exemple

Le projet consiste en la construction d'une maison individuelle de type T5 associée à la typologie « Logement individuel ».



Seuls, les locaux en vert et bleu sont soumis à la thématique de protection solaire de la toiture, à savoir les chambres, leurs salles de bain et dressing, le bureau, le séjour et la cuisine, ainsi que les sanitaires et l'entrée. Le cellier n'étant pas climatisé et le garage n'étant pas clos, ils ne sont pas inclus dans le périmètre de la thématique. Cependant, compte tenu de l'emplacement du cellier et de sa surface, il sera pertinent de le protéger au même titre que les autres locaux.

V. CALCUL DU FACTEUR SOLAIRE DE LA TOITURE (PAROI HORIZONTALE OPAQUE)

1. Seuil et formule de calcul

Les toitures de bâtiments devront respecter le seuil de performance suivant :

| Indicateur | Seuil |
|-------------------------|---------------------|
| Facteur solaire maximal | $FS_{\max} = 2,5\%$ |

Le facteur solaire FS d'une toiture est défini selon la formule suivante :

$$FS = \frac{0,07 \times \alpha \times Cv}{(R + 0,2)}$$

Où :

- α est le coefficient d'absorption de la paroi ;
- R est la résistance thermique de la paroi en $m^2.K/W$;
- Cv est un coefficient de réduction correspondant aux toitures ventilées ;
- $0,2$: somme des résistances d'échanges superficiels R_{si} et R_{se} (en $W/m^2.K$).

2. Coefficient d'absorption (alpha)

Ce coefficient caractérise la capacité du matériau à absorber le rayonnement solaire. Il correspond principalement à la teinte du **revêtement de la couverture** considérée en contact avec l'extérieur.

A. DETERMINATION DU COEFFICIENT D'ABSORPTION

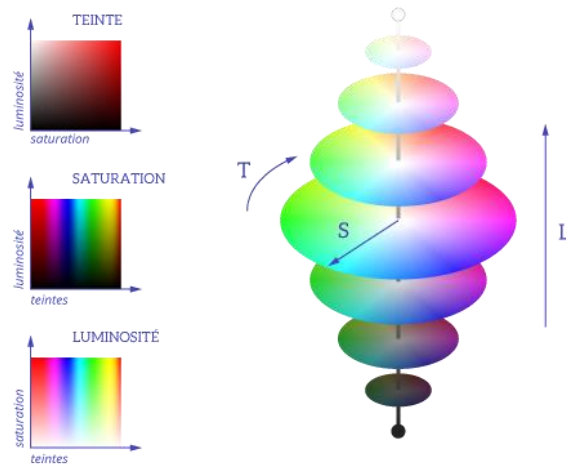
Pour les revêtements colorés de couverture, le texte permet différentes approches pour associer une couleur ou une teinte à une valeur de coefficient d'absorption.

La première approche consiste à regrouper les couleurs par catégories de teintes. Le tableau suivant présente les valeurs indicatives de coefficient en fonction de la catégorie de teinte, celle-ci étant caractérisée par la couleur :

| CATEGORIES DE TEINTES | COULEURS | Coefficient |
|-----------------------|---|-------------|
| Claire | Blanc, jaune, orange clair, beige, crème, rouge clair | 0,4 |
| Moyenne | Rouge sombre, vert clair, bleu clair, gris clair, orange sombre | 0,6 |
| Sombre | Brun, vert sombre, bleu vif, gris moyen | 0,8 |
| Noire | Gris sombre, bleu sombre, brun sombre, noir | 1 |

La deuxième approche permet de préciser d'avantage les valeurs de coefficient en fonction de la couleur. Ainsi, la réglementation intègre un tableau de conversion selon les valeurs « TSL » (Teinte, Saturation Luminosité). Chaque couleur est caractérisée par un nombre unique de 7 chiffres où les 3 premiers désignent la teinte (T), les deux suivants la luminosité (L) et les deux derniers la saturation (S).

Toute couleur présentant une luminosité supérieure à 80 % est considérée comme « couleur claire ». Inversement toute couleur présentant une luminosité inférieure à 20 % est considérée comme « couleur noire ». Le coefficient d'absorption des couleurs dont la luminosité est comprise entre 30 % et 70 % est donné dans le tableau 2 ci-dessous en fonction de la teinte (T) de la luminosité (L) et de la saturation (S).



Afin de se rapprocher le plus possible de la valeur exacte du coefficient d'absorption, il est possible de réaliser des interpolations linéaires pour les paramètres S et L, lorsque les valeurs sont comprises entre les valeurs maximum et minimum du tableau

| S = 80 % | Teinte (T) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 360 | 340 | 320 | 300 | 280 | 260 | 240 | 220 | 200 | 180 | 160 | 140 | 120 | 100 | 80 | 60 | 40 | 20 | 0 |
| L = 70 % | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| L = 50 % | 0,4 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| L = 30 % | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,6 |

| S = 40 % | Teinte (T) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 360 | 340 | 320 | 300 | 280 | 260 | 240 | 220 | 200 | 180 | 160 | 140 | 120 | 100 | 80 | 60 | 40 | 20 | 0 |
| L = 70 % | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| L = 50 % | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| L = 30 % | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |

| S = 10 % | Teinte (T) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 360 | 340 | 320 | 300 | 280 | 260 | 240 | 220 | 200 | 180 | 160 | 140 | 120 | 100 | 80 | 60 | 40 | 20 | 0 |
| L = 70 % | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| L = 50 % | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| L = 30 % | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

Le code RAL « design » indique les valeurs de teinte, luminosité et saturation. Celui-ci est différent du code RAL « classic » qui est composé d'un nombre à 4 chiffres.

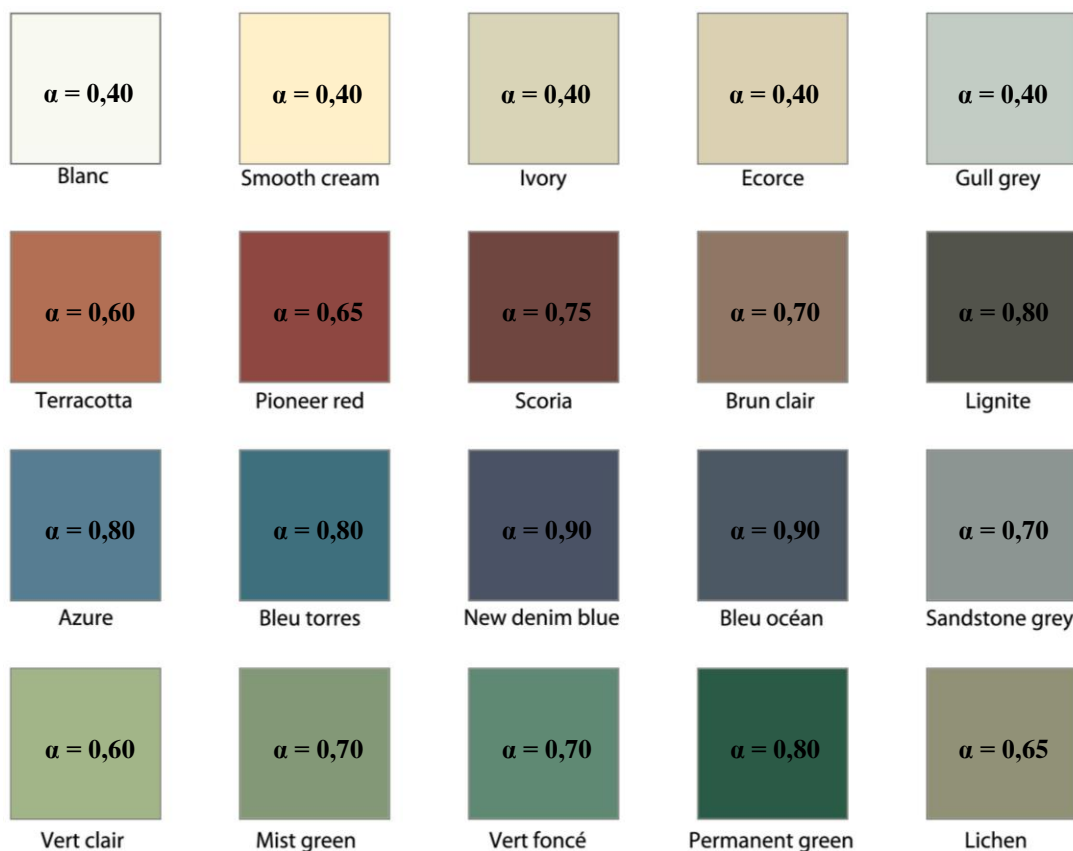
Exemple

- RAL 210 60 30 = teinte 210/360 + luminosité 60/100 + saturation 30/100
- RAL 6026 = Vert Opale

Il n'y a aucune correspondance entre le code RAL « design » et « classic », cependant des sites internet établissent des équivalences entre le code RAL « classic » et les valeurs « TSL » mais qui ne sont pas normées ni officielles.

Ces mêmes sites proposent des équivalences entre les coordonnées « TSL » et d'autres nuanciers (RGB, PANTONE, TOLLENS, etc.), par exemple : <https://encycolorpedia.fr/> ou <https://www.gayartitang.fr/codes-couleur/index.php>

Pour les tôles, un nuancier a été réalisé à partir des références commercialisées à l'heure actuelle, permettant d'attribuer une valeur de coefficient d'absorption plus précise. Les valeurs sont indiquées sur l'image ci-dessous.



Les matériaux de couverture naturels présenteront un coefficient d'absorption fixé dans le tableau suivant :

| Matériau | Valeur α |
|---------------------------|-----------------|
| Bardeau de bois | 0,7 |
| Pandanus | 0,6 |
| Palmex (teinte naturelle) | 0,6 |
| Couverture végétalisée | 0,6 |

Exemple : cas d'une toiture tôle

Une maison est équipée d'une toiture en tôle dont le choix de couleur se porte sur la référence « Vert foncé ». La valeur du coefficient d'absorption alpha à intégrer au calcul du facteur solaire est alors 0,7.

Si le choix s'était porté sur une référence de vert non présente dans le nuancier ci-dessus, alors d'après le tableau des catégories de teinte, la valeur du coefficient d'absorption alpha à intégrer au calcul du facteur solaire serait 0,8 (« vert sombre »).

Exemple : cas d'une toiture terrasse en béton avec revêtement d'étanchéité autoprotégée

Une maison est équipée d'une toiture terrasse étanchée.

Si le choix se porte sur un revêtement bitumineux non coloré. En l'absence de donnée sur la couleur, le revêtement sera considéré comme de couleur noire et la valeur du coefficient d'absorption à prendre en compte sera 1.

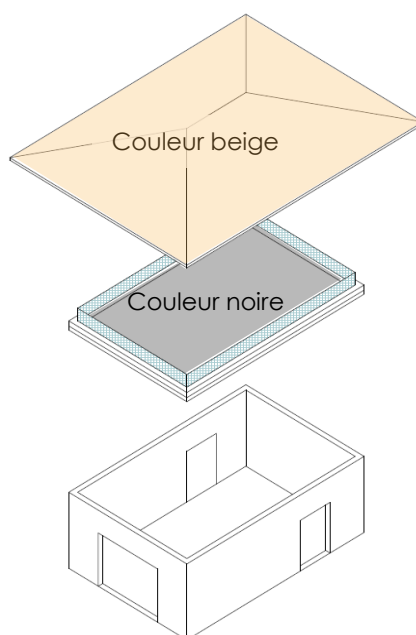
Si le choix se porte sur une étanchéité bitumineuse ou liquide teintée, la méthodologie est différente selon la base de référence du choix de la teinte :

- La teinte est sélectionnée sur un nuancier **RAL « Design », référence 180 70 40**, soit T=180°, L=70% et S=40% : D'après le tableau de correspondance TLS, la valeur à prendre en compte dans le calcul du facteur solaire est **0,6**.
- La teinte est sélectionnée sur un nuancier **RAL « Classic », référence 7000** (« Gris petit ») qui peut être considérée comme :
 - o Correspondant à une référence « TSL » :
 - T = 198° / S = 8% / L = 52% d'après le site <https://encycolorpedia.fr/>
 - La valeur la plus proche du tableau de correspondance « TSL » est T = 200° / S = 10% / L = 50%, correspondant à un coefficient d'absorption **alpha = 0,8**
 - o Correspondant à un « gris sombre » dans le tableau de correspondance des teintes soit un coefficient d'absorption **alpha = 0,8**
- La teinte est sélectionnée sur un nuancier du fabricant, sans rapport avec le code RAL, **teinte « beige »** : d'après le tableau de correspondance des catégories de teinte, la valeur à prendre en compte dans le calcul du facteur solaire est **0,4**.

B. CAS DES TOITURES VENTILEES

En présence d'un complexe de toiture ventilée, on considère la couleur du revêtement en contact avec l'extérieur de la partie extérieure de la toiture.

Exemple : cas d'une toiture terrasse béton avec une couverture en tôle surélevée



Sur la toiture terrasse en béton, est appliquée une étanchéité bitumineuse noire. La couverture en tôle est de couleur beige sur le dessus. La valeur du coefficient d'absorption à prendre en compte est donc celle correspondant à une teinte beige. D'après le tableau des catégories de teintes, cette valeur est de 0,4.

C. CAS DES ECRANS NON CONTINUS

En cas d'écran non continu, le coefficient d'absorption pourra être calculé au prorata du taux de percement selon la formule suivante :

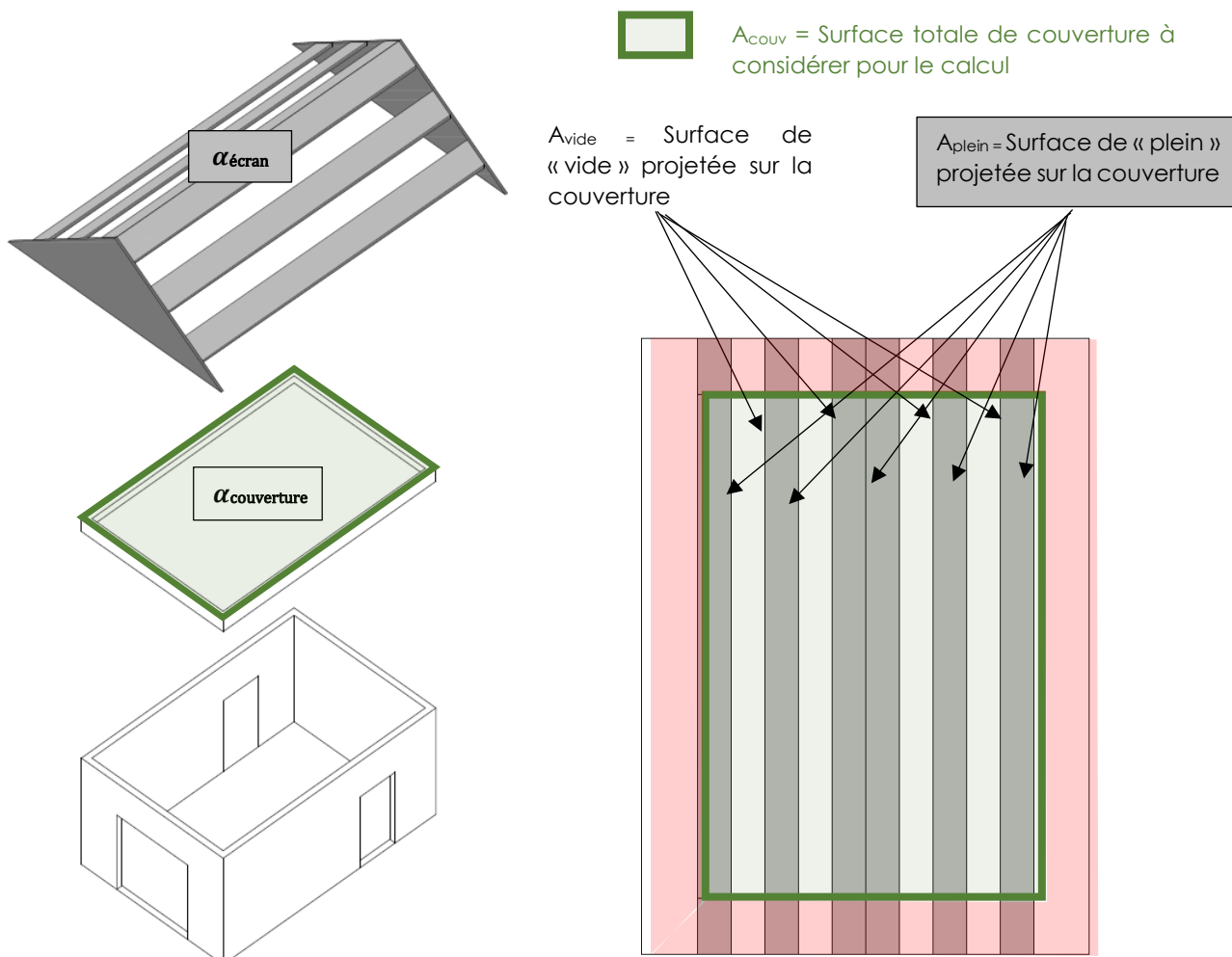
$$\alpha_{\text{équivalent}} = \alpha_{\text{couverture}} \times \text{taux}_{\text{percement}} + \alpha_{\text{écran}} \times (1 - \text{taux}_{\text{percement}})$$

Le taux de percement correspond à la surface d'absence de matériau rapportée à la surface totale de l'écran. En cas d'écran incliné, la surface est calculée sur la base d'une projection de l'écran dans le plan de la couverture, sur la couverture.

$$Taux_{\text{percement}} = \frac{A_{\text{vide}}}{A_{\text{couv}}}$$

Où :

- A_{vide} est la surface d'absence de matériau projetée sur la couverture ;
- A_{couv} est la surface de couverture.



Exemple : cas d'une toiture terrasse avec panneaux photovoltaïques

Un immeuble de bureaux dispose d'une toiture terrasse en béton de 2 000 m² sur laquelle sont posés des panneaux photovoltaïques représentant une surface de 700 m² projetée sur le plan horizontal. On a ainsi :

$$Taux_{\text{percement}} = (2000 - 700) / 2000 = \mathbf{0,65}$$

L'étanchéité de la toiture terrasse est colorée de couleur grise soit un coefficient d'absorption de 0,6. Les panneaux photovoltaïques sont de couleur noire soit un coefficient d'absorption de 1.

Le coefficient d'absorption équivalent de la toiture est donc :

$$\alpha_{\text{équivalent}} = 0,6 \times 0,65 + 1 \times (1 - 0,65) = \mathbf{0,74}$$

3. Résistance thermique (R)

A. PRESENTATION DE LA RESISTANCE THERMIQUE ET DE SON PRINCIPE

La résistance thermique R (en m².K/W) de la paroi est la somme des résistances thermiques de chacune des couches la constituant :

$$R = \frac{e1}{\lambda1} + \frac{e2}{\lambda2} + \dots + \frac{en}{\lambda n}$$

Où :

- e : épaisseur du matériau (en m)
- λ : conductivité thermique du matériau (en W/m.K)

Les valeurs de conductivité thermiques λ sont fixées par la réglementation pour les principaux matériaux :

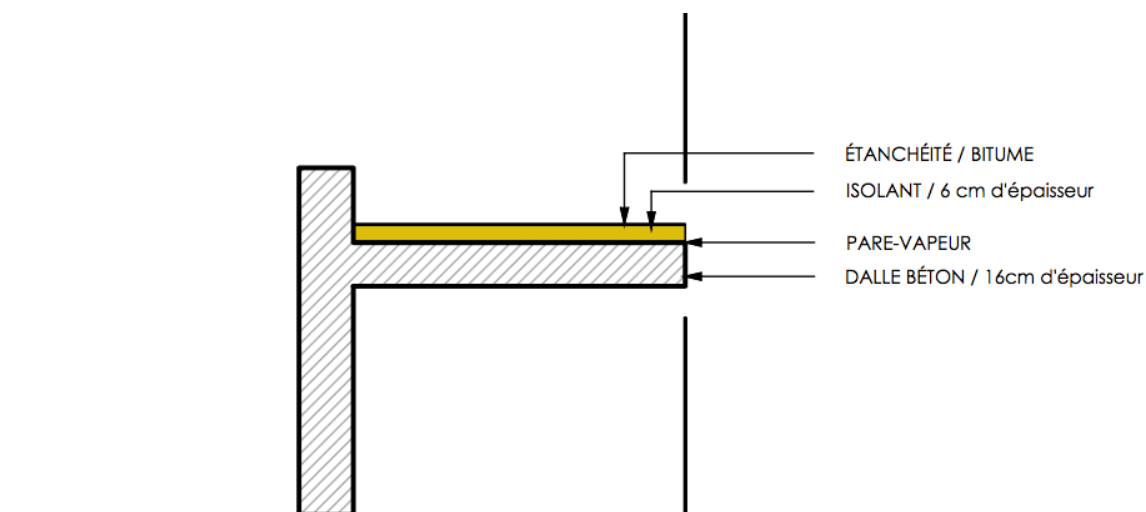
| Matériau | λ en W/m.K |
|---|------------|
| Béton armé | 2,00 |
| Béton plein | 1,65 |
| Blocs de béton aggloméré plein | 1,65 |
| Blocs de béton aggloméré creux | 0,95 |
| Béton cellulaire | 0,14 |
| Enduit ciment | 1,30 |
| Bois lourd (merbau, chêne, etc.) | 0,18 |
| Bois mi-lourd (pin des caraïbes, teck) | 0,15 |
| Bois léger (sapin, douglas, cèdre, etc.) | 0,13 |
| Panneaux de bois contreplaqué | 0,15 |
| Panneaux OSB | 0,12 |
| Panneaux de particules bois (MDF) | 0,15 |
| Plaque de fibrociment | 0,65 |
| PVC | 0,17 |
| Plaque de plâtre | 0,25 |
| Perlite expansée | 0,060 |
| Ouate de cellulose | 0,045 |
| Polystyrène expansé | 0,042 |
| Laine minérale (laine de verre, laine de roche) | 0,040 |
| Mousse de polyuréthane | 0,035 |
| Tôle acier | 52 |
| Tôle aluminium | 230 |
| Pierre de Moorea | 1,1 |
| Étanchéité bitumineuse | 0,17 |
| Étanchéité en résine synthétique | 0,25 |
| Tuiles en terre cuite | 0,85 |
| Bardeaux de bitume | 0,17 |
| Terre végétale (ép. ≤ 30 cm) | 0,75 |
| Terre végétale (ép. > 30 cm) | 1,25 |
| Pandanus | 0,065 |

Pour les matériaux ne figurant pas dans le tableau ou présentant des caractéristiques supérieures à celles indiquées dans le tableau, les pétitionnaires se reportent :

- Aux valeurs indiquées dans les fascicules des Règles « Th-bat » utilisées pour les calculs énergétiques réglementaires en France métropolitaine et plus particulièrement des valeurs tabulées au fascicule 2. *FASCICULE MATÉRIAUX de l'Annexe III : Règles « Th-Bat 2020 » - données d'entrée au calcul de la performance énergétique* ;
- Aux valeurs indiquées par le fabricant si celles-ci sont certifiées par un organisme indépendant (par exemple : ACERMI) ou calculées selon une norme nationale ou internationale (par exemple la norme NF EN 14509).

Exemple : cas d'une toiture terrasse isolée

La toiture est composée comme suit :



Le calcul de résistance thermique prend en compte l'ensemble des matériaux qui séparent l'extérieur du volume habitable, à savoir :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique ($m^2.K/W$) |
|------------------------|-------------------|----------------|------------------------------------|
| Étanchéité bitumineuse | 0,17 | 1 | 0,06 |
| Polystyrène expansé | 0,042 | 6 | 1,43 |
| Dalle béton armé | 2,00 | 16 | 0,08 |
| TOTAL | | | 1,57 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,01 / 0,17 + 0,06 / 0,042 + 0,16 / 2 = \mathbf{1,57 \text{ m}^2.K/W}$$

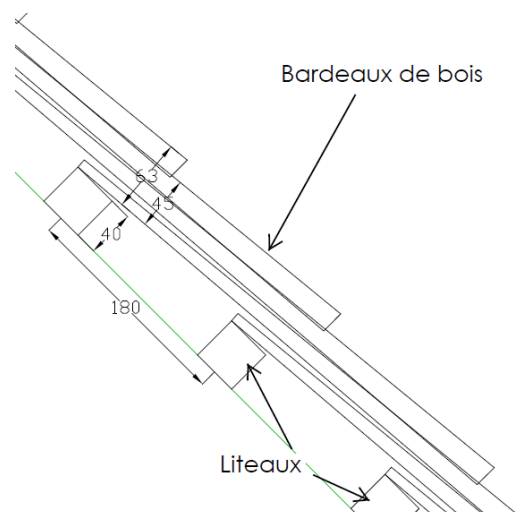
Exemple : cas d'une toiture en bardeaux de bois :

L'essence de bois des bardeaux est le Red Cedar qui est un bois léger soit une conductivité thermique de 0,13 W/K.m.

La mise en œuvre des bardeaux de bois s'effectue à recouvrement ce qui fait que le revêtement présente une épaisseur variable.

Pour le calcul de résistance thermique, on prendra une épaisseur moyenne de 4,5cm.

$$R_{\text{toiture}} = 0,045 / 0,13 = \mathbf{0,35 \text{ m}^2.K/W}$$



Exemple : cas d'une toiture avec des panneaux de tôle sandwich

La toiture est composée comme suit :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique ($m^2.K/W$) |
|----------------|-------------------|----------------|------------------------------------|
| Tôle acier | 52 | 0,075 | 0,00 |
| Laine minérale | 0,040 | 6 | 1,50 |
| Tôle acier | 52 | 0,075 | 0,00 |
| TOTAL | | | 1,50 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,00075 / 52 + 0,06 / 0,040 + 0,00075 / 52 = 1,50 \text{ m}^2.K/W$$

On remarque que la résistance thermique de la tôle acier est négligeable du fait de la forte conductivité de ce matériau et de sa très faible épaisseur.

Les fabricants de panneaux de tôle sandwich fournissent, en général, les valeurs de résistance thermique de leurs panneaux selon l'épaisseur et le type d'isolant choisi. Ces valeurs peuvent être prises en compte si et seulement si elles sont **certifiées**.

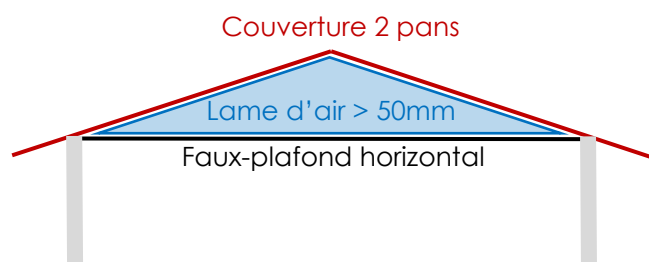
B. CAS DES LAMES D'AIR PEU VENTILEES

En cas de présence d'une lame d'air peu ou non ventilée comprise dans le complexe de toiture, la lame d'air présente une résistance thermique dont la valeur est calculée en fonction de son épaisseur dans le tableau suivant :

| Épaisseur de la lame d'air pas ou peu ventilée (mm) | Résistance thermique R ($m^2.K/W$) de la lame d'air (flux descendant) |
|---|---|
| 0 | 0,00 |
| 5 | 0,09 |
| 7 | 0,11 |
| 10 | 0,12 |
| 15 | 0,14 |
| 20 | 0,15 |
| 50 | 0,16 |
| > 50 | 0,17 |

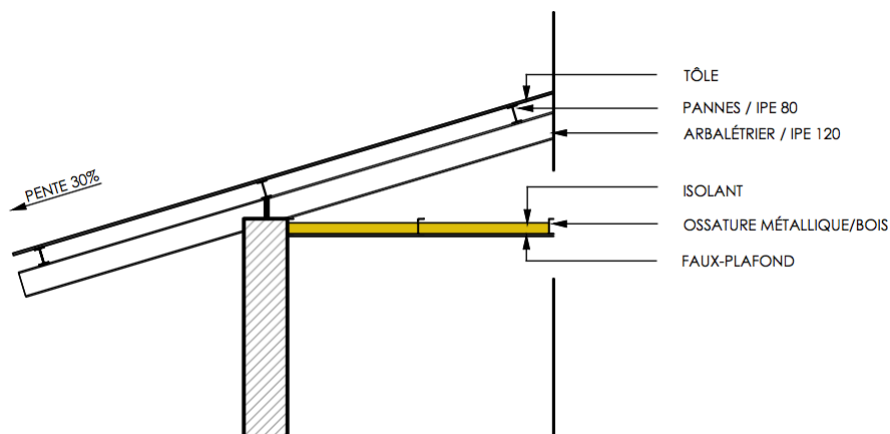
On considère qu'une lame d'air est peu ou non ventilée dès lors que la surface des entrées d'air périphériques dans le complexe de toiture est inférieure ou égale à 2% de la surface de la couverture.

Une lame d'air créée dans des combles peu ou non ventilés avec une couverture à 2 pans minimum et faux-plafond horizontal pourra être considérée par défaut avec une épaisseur moyenne > 50mm et donc une résistance thermique R = 0,17 $m^2.K/W$.



Exemple : cas d'une toiture tôle avec faux-plafond horizontal (combles)

La toiture est composée comme suit :



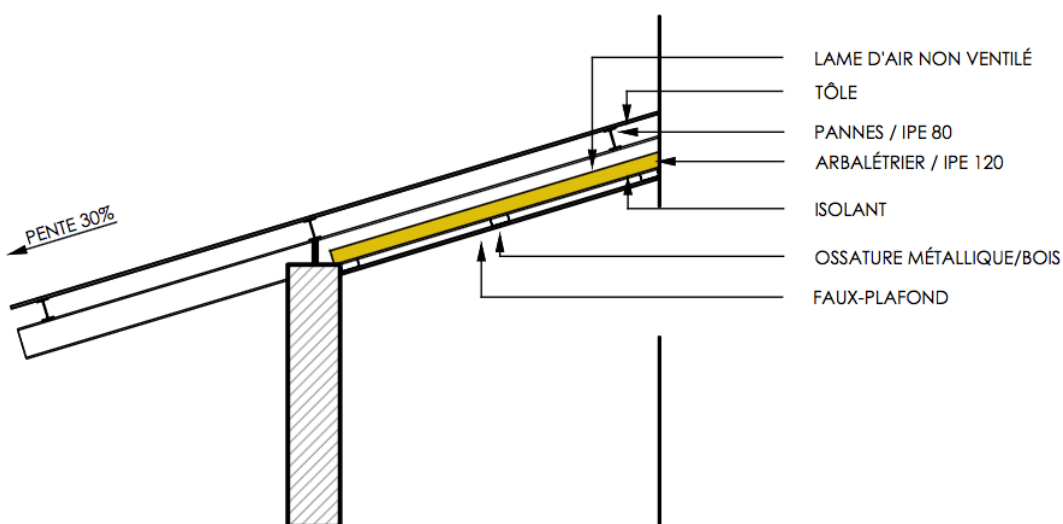
Le calcul de résistance thermique prend en compte l'ensemble des matériaux qui séparent l'extérieur du volume habitable, à savoir :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|--|
| Tôle acier | 52 | 0,075 | 0,00 |
| Lame d'air peu ou pas ventilée | - | En moyenne > 5 cm | 0,17 |
| Laine minérale | 0,040 | 5 | 1,25 |
| Faux-plafond en lames PVC | 0,17 | 1 | 0,06 |
| TOTAL | | | 1,48 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,00075 / 52 + 0,17 + 0,05 / 0,040 + 0,01 / 0,17 = \mathbf{1,48 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}}$$

Exemple : Cas d'une toiture tôle avec faux-plafond rampant

La toiture est composée comme suit :



La lame d'air se situe dans l'épaisseur des arbalétriers, entre l'isolant et les pannes.

Le calcul de résistance thermique prend en compte l'ensemble des matériaux qui séparent l'extérieur du volume habitable, à savoir :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------------------------|-------------------|----------------|--|
| Tôle acier | 52 | 0,075 | 0,00 |
| Lame d'air peu ou pas ventilée | - | 2 | 0,15 |
| Laine minérale | 0,040 | 5,5 | 1,38 |
| Faux-plafond en lames PVC | 0,17 | 1 | 0,06 |
| TOTAL | | | 1,58 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,00075 / 52 + 0,15 + 0,055 / 0,040 + 0,01 / 0,17 = \mathbf{1,58 \text{ m}^2.K/W}$$

C. CAS DES LAMES D'AIR ASSEZ VENTILEES, VENTILEES ET TRES VENTILEES

Pour les cas de lame d'air assez ventilées, ventilée ou très ventilée, la résistance thermique de la paroi extérieure de la toiture et de la lame d'air sont considérées comme nulles et un coefficient de ventilation Cv est appliqué.

Une lame d'air est assez ventilée, ventilée ou très ventilée dès lors que la surface des entrées d'air périphériques dans le complexe de toiture est strictement supérieure à 2% de la surface de la couverture.

D. CAS DES PRODUITS MINCES REFLECHISSANTS (PMR)

Les PMR peuvent justifier d'une **résistance thermique « équivalente »** grâce à leur propriété de faible émissivité. Les PMR à bulle ou multicouche bénéficient, quant à eux, d'une résistance thermique « intrinsèque » qui correspond à la résistance thermique du matériau en lui-même

Ces valeurs peuvent être justifiées par un certificat d'un tiers agréé (avis CSTB, certificat ACERMI). Ces valeurs ne peuvent être prises en compte dans la réglementation que si les données, transmises par le fabricant, sont **certifiées**.

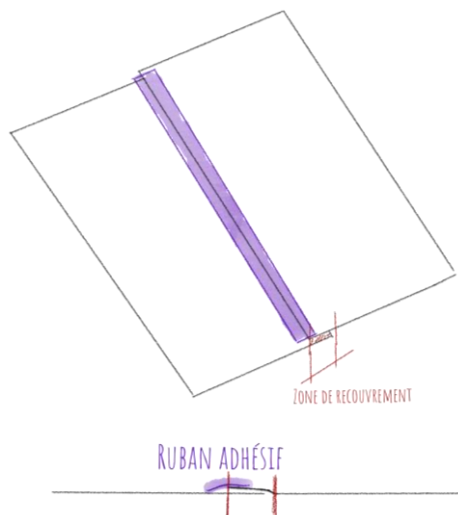
Sans cette certification, les valeurs de résistance thermique « intrinsèque » et de résistance thermique « équivalente » suivantes peuvent être prises en compte dans le calcul de facteur solaire, sous réserve de respecter les règles de mise en œuvre minimum exigées.

Le tableau suivant indique les valeurs de **résistance thermique « intrinsèque »** ($R_{\text{intrinsèque}}$) par défaut qui peuvent être prise en compte, sans préconisation particulière de mise en œuvre :

| Type d'isolant | Résistance thermique « intrinsèque » (m ² .K/W) | | | | |
|----------------|--|------|-------|-------|------|
| | Épaisseur du produit réfléchissant | | | | |
| | < 5 mm | 5 mm | 10 mm | 20 mm | 40mm |
| À bulles | 0 | 0,06 | 0,1 | 0,2 | 0,48 |
| Multicouches | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,8 |

La valeur de **résistance thermique « équivalente »** ($R_{\text{équivalente}}$) pourra être prise en compte dans la REBPF seulement **si la mise en œuvre du PMR respecte scrupuleusement** :

- Le matériau présente une émissivité inférieure ou égale à 0,1 ;
- **La création d'une lame d'air**, d'une épaisseur supérieure à **2 cm en tout point**, peu ou pas ventilée, entre le PMR et la couverture ;
- **La continuité du matériau** dont les différentes parties sont collées « à recouvrement » selon les préconisations du fabricant.



Dans ce cas précis, la valeur de résistance thermique « équivalente » à prendre en compte est :

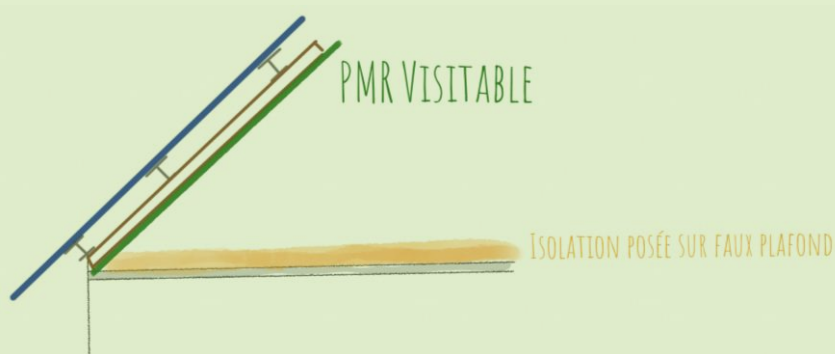
$$R_{\text{équivalente}} = 0,46 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

La résistance thermique totale d'un PMR (R_{PMR}) sera calculée, si les conditions précédentes sont respectées, selon la formule suivante :

$$R_{\text{PMR}} = R_{\text{intrinsèque}} + R_{\text{équivalente}}$$

◇ Recommandations pour l'utilisation du PMR :

- Le produit doit être positionné directement sous la couverture, séparé par une lame d'air (2 cm minimum) entre le PMR et la couverture
- Il est important de veiller à ce que la lame d'air soit peu ventilée afin de limiter le phénomène d'encrassement de la surface qui altère ses propriétés réfléchissantes
- La création d'une seconde lame d'air, idéalement ventilée, sous le PMR permet de limiter le phénomène de conduction et améliore grandement la résistance thermique du complexe
- Si possible, notamment lorsqu'un comble est aménagé, le PMR doit être rendu visitable afin de faciliter les opérations d'entretien et de remplacement



- L'adhésif utilisé pour le jointement des lès doit être approuvé par le fabricant pour garantir la pérennité des raccords.
- Schémas d'exemples de mise en œuvre :



Exemple : pose d'un PMR à bulles

Le fabricant présente une fiche technique précisant les informations suivantes :

- Épaisseur : 7 mm
- Émissivité : 0,05
- Conductivité thermique de 0,037 W/K.m
- Les lés sont recouverts sur 3 à 5 cm et jointés à l'aide d'un adhésif aluminium
- Une lame d'air doit être ménagée entre la couverture et le produit

La valeur de conductivité thermique n'est pas certifiée, elle ne peut pas être prise en compte.

La résistance intrinsèque du produit est donc déterminée à l'aide du tableau. Plutôt que de prendre la valeur par défaut pour une épaisseur de 5mm, une interpolation linéaire permet de calculer cette valeur pour l'épaisseur réelle du produit (7 mm), soit :

$$R_{\text{intrinsèque}} = 0,08 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}.$$

Sous réserve de la pose du produit conformément aux règles imposées par la réglementation, le produit pourra présenter une résistance thermique totale calculée comme suit :

$$R_{\text{PMR}} = 0,46 + 0,08 = 0,54 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$$

Dans le cas contraire, la résistance thermique totale du produit sera seulement de **0,08 m².K/W**.

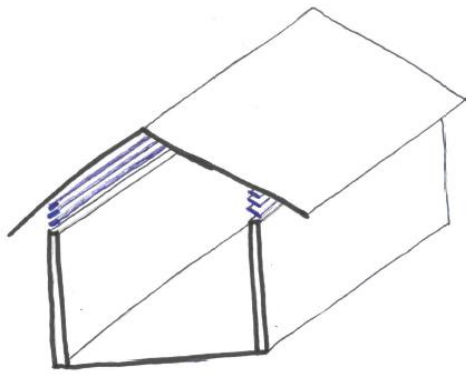
4. Coefficient de réduction lié à la ventilation (Cv)

La présence d'une lame d'air ventilée (ou comble ventilé) permet d'évacuer vers l'extérieur une partie de la charge solaire reçue par la paroi.

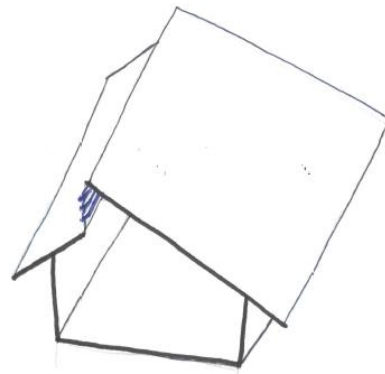
La prise en compte cette lame d'air est intégrée par l'intermédiaire d'un coefficient correctif Cv.

Ce coefficient est calculé en fonction du taux d'ouverture pour la ventilation de la lame d'air située entre la partie extérieure de la toiture et la partie intérieure qui permet de séparer cette lame d'air avec le volume habité.

À l'exception des toitures en bardeaux de bois, l'emploi du coefficient de ventilation Cv n'est possible que dans le cas où la lame d'air est séparée physiquement du volume intérieur du bâtiment. Ainsi, aucun coefficient de ventilation ne peut être attribué à une toiture où la sous-face de couverture est apparente :



Toiture 2 ou 4 pans ventilée



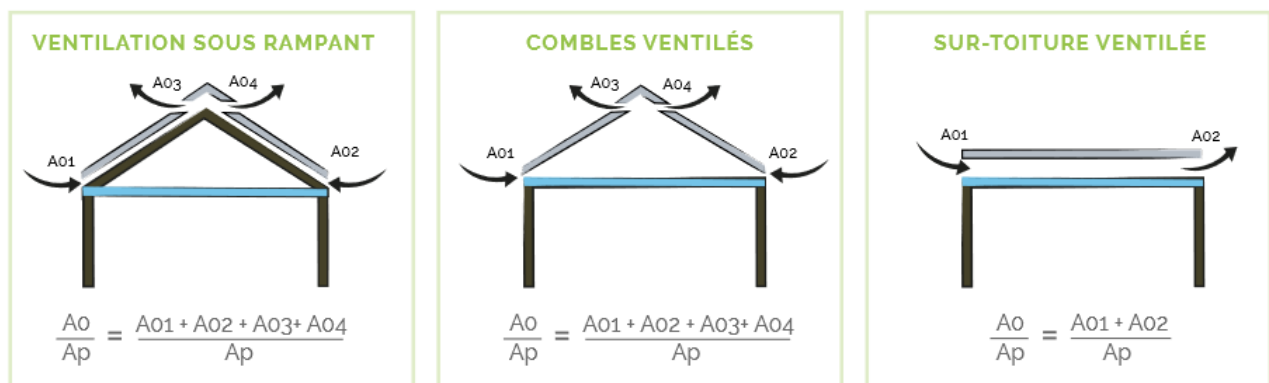
Toiture ventilée de type « écope »

A. CALCUL DU TAUX D'OUVERTURE AO/AP

Ce taux correspond au rapport Ao/AP où :

- Ao = Surface d'ouverture totale de la lame d'air située entre la partie extérieure et la partie intérieure de la toiture
- Ap = Surface **horizontale** de paroi située sous les combles ou la toiture considérée

Les schémas suivants illustrent le mode de calcul du rapport Ao/AP selon les différents cas de figure :



Partie extérieure de la toiture

Surface Ap à considérer dans le calcul

Les ouvertures périphériques du toit doivent être permanentes (non obturables) et réparties pour permettre une ventilation traversante : une seule orientation ne doit pas concentrer plus de 70 % des ouvertures.

◇ Calcul de la surface d'ouverture en présence d'une grille ou d'un film ajouré :

La surface d'ouverture correspond à la valeur nette d'espace libre dans l'ouverture permanente. Lorsqu'un écran ajouré (grille, châssis à ventelles ou film perforé) vient équiper l'ouverture, un coefficient k est appliqué à la surface totale d'ouverture tel que :

$$Ao = k \times Ao_{brute}$$

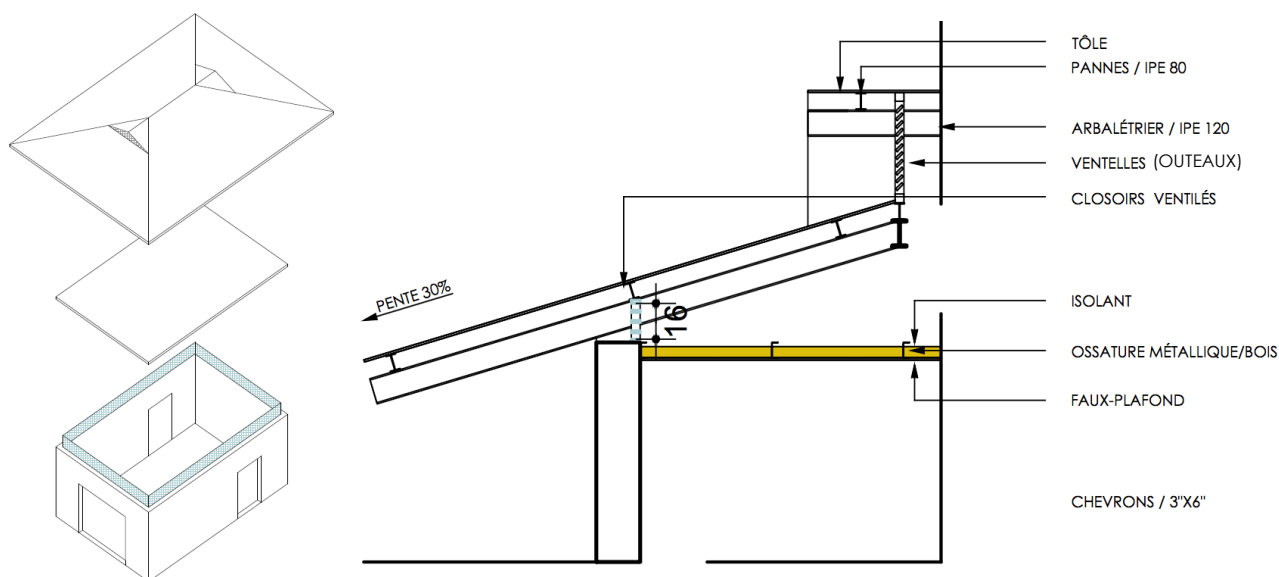
Où :

- Ao = Surface de l'ouverture à prendre en compte dans le calcul Ao/AP
- Ao_{brute} = Surface totale de l'ouverture correspondant à la dimension de la réservation sans prendre en compte l'écran ajouré
- k = coefficient correspondant la réduction de surface dû à l'écran ajouré

Par défaut, on considérera $k = 0,5$ pour les écrans ajourés de type grilles ou films anti-nuisibles / anti-insectes, persiennes ou ventelles. Cette valeur peut être dérogée sur la base des informations techniques transmises par le fabricant ou d'un calcul réalisé par le pétitionnaire.

Exemple : calcul A_o/A_p pour une toiture ventilée par outeaux et closoirs

Le complexe de toiture est composé comme suit :



Il est considéré un bâtiment dont la surface au sol est de $5 \times 12,8$ m pour une surface horizontale de toiture de 64 m².

La surface d'ouverture est calculée de la manière suivante :

| Ouvertures | Dimensions (m) | Nombre | $A_{o\text{brute}}$ (m ²) | Coeff. K | A_o (m ²) |
|---------------------|--------------------------------------|--------|---------------------------------------|----------|-------------------------|
| Outeaux | Triangle $1,5 \times 0,8 \times 0,8$ | 2 | 0,42 | 0,5 | 0,21 |
| Closoirs (longueur) | Rectangle $0,155 \times 12,8$ | 2 | 3,97 | 0,5 | 1,98 |
| Closoirs (largeur) | Rectangle $0,155 \times 5$ | 2 | 1,55 | 0,5 | 0,78 |
| TOTAL | | | | | 2,97 |

Les ouvertures en closoirs sont équipées de simples grilles moustiquaire. Les ouvertures en outeaux sont équipées de ventelles pare-pluie. Sans information de la part du fabricant, ni calcul spécifique, on considère donc un coefficient de réduction $k = 0,5$ pour toutes les ouvertures.

$$A_o = A_{o\text{Outeaux}} + A_{o\text{Closoirs(longueur)}} + A_{o\text{Closoirs(largeur)}} = 2,97 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } A_o / A_p = 2,97 / 64 = 4,6\%$$

B. DETERMINATION DU COEFFICIENT Cv

Valeurs de coefficient de correction Cv en fonction du type de lame d'air et de la résistance thermique de la partie extérieure de la toiture :

| Exemple de toiture | | Toiture tôle | Bardeaux bois ou panneau sandwich (≤ 4 cm isolant) | Pandanus ou tôle panneau sandwich (> 4 cm isolant) |
|--------------------|--------------------------------|--|--|---|
| Ao/Ap | Type de lame d'air | Résistance thermique de la partie extérieure de la toiture ($m^2.K/W$) | | |
| | | $R < 0,2$ | $0,2 \leq R \leq 1$ | $R > 1$ |
| $< 2\%$ | Lame d'air peu ou non ventilée | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| $\geq 2\%$ | Lame d'air assez ventilée | 0,55 | 0,35 | 0,15 |
| $\geq 5\%$ | Lame d'air ventilée | 0,30 | 0,15 | 0,15 |
| $\geq 20\%$ | Lame d'air très ventilée | 0,15 | 0,15 | 0,15 |

Lorsque la lame d'air est ventilée ($Ao/Ap \geq 2\%$), les résistances thermiques de la partie extérieure de la toiture et de la lame d'air ne sont pas prises en compte dans la résistance thermique de la paroi qu'ils protègent, pour le calcul du facteur solaire.

La partie extérieure de la toiture doit former un écran continu pour être pris en compte en totalité dans le coefficient Cv.

Exemple : détermination du coefficient Cv pour une toiture en tôle avec outeaux + ouvertures en chaînage

Le complexe de toiture est composé comme suit : cf. exemple § A

| | Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique ($m^2.K/W$) |
|--------------|----------------|-------------------|----------------|------------------------------------|
| Sur-toiture | Tôle | 52 | 0,075 | 0,00 |
| | TOTAL | | | 0,00 |
| Sous-toiture | Laine minérale | 0,040 | 6,0 | 1,50 |
| | PVC | 0,17 | 1,0 | 0,06 |
| | TOTAL | | | 1,56 |

Détermination du coefficient Cv :

- $Ao / Ap = 4,6\%$ ($\geq 2\%$) : Lame d'air assez ventilée
- $R_{\text{Couverture extérieure}} = 0,00 m^2.K/W$ ($R < 0,2 m^2.K/W$)

D'après le tableau de correspondance, **Cv = 0,55**

C. ÉCRAN CONTINU OU NON CONTINU

Un écran continu peut être constitué en tout ou partie de lames inclinées dès lors que le dispositif est opaque au rayonnement solaire direct.

Par souci de simplicité on peut considérer que l'écran est opaque au rayonnement solaire direct dès lors que le taux de percement est nul lorsqu'on projette les lames sur le plan horizontal.

Si l'écran n'est pas continu (cas des pergolas posées sur terrasses béton ou des panneaux solaires par exemple), le coefficient Cv est corrigé et calculé au prorata de la surface opaque du pare-soleil :

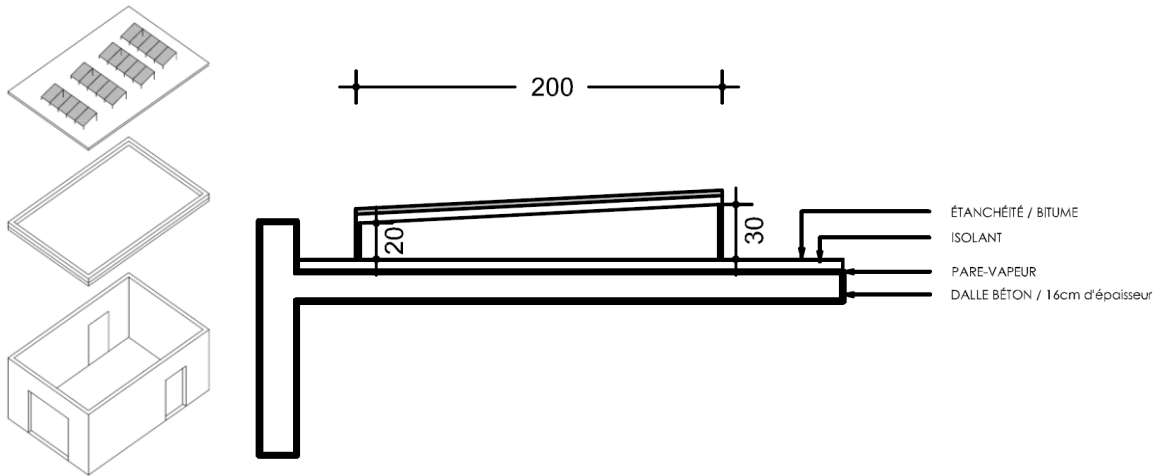
$$Cv_{\text{corrigé}} = Cv \times (1 - \text{taux}_{\text{percement}}) + \text{taux}_{\text{percement}}$$

Le taux de percement de l'écran non continu correspond à la surface non protégée de la paroi considérée lorsque le pare-soleil est projeté sur celle-ci.

La surface non protégée est donc mesurée en projetant l'écran non continu sur le plan de celle-ci.

Exemple : cas d'une toiture terrasse avec panneaux photovoltaïques

Un bâtiment qui dispose d'une toiture terrasse en béton de 64 m² sur laquelle sont posés des panneaux photovoltaïques (et/ou solaires thermiques) représentant une surface de 40 m² projetée sur le plan horizontal.



◇ Calcul du taux de percement

On a ainsi :

$$\text{Taux}_{\text{perçement}} = (64-40) / 64 = 0,375$$

◇ Calcul Ao/Ap

Le calcul du taux d'ouverture est réalisé à l'échelle d'un groupe de panneaux photovoltaïques.

Dans notre cas, il est installé 4 groupes identiques de 5 panneaux photovoltaïques accolés. Chaque groupe a pour dimension 5m x 2m pour une surface de 10 m².

Il suffit de calculer le taux d'ouverture pour un groupe afin de connaître la valeur Ao/Ap qui sera utilisée pour déterminer le Cv.

La surface de plancher à prendre en compte est celle uniquement couverte par l'écran équivalent à la surface de panneau photovoltaïque projetée sur la couverture.

La surface d'ouverture est calculée de la manière suivante :

| Ouvertures | Dimensions (m) | Nombre | AO _{brute} (m ²) | Coeff. K | Ao (m ²) |
|-----------------------------|------------------|--------|---------------------------------------|----------|----------------------|
| Sous panneau (longueur) | Rectangle 0,25x2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| Sous panneau (largeur bas) | Rectangle 0,20x5 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Sous panneau (largeur haut) | Rectangle 0,30x5 | 1 | 1,5 | 1 | 1,5 |
| TOTAL | | | | | 3,5 |

Les ouvertures sous panneaux sont libres. Le coefficient de réduction k est égal à 1.

$$AO = AO_{\text{Sous panneau (longueur)}} + AO_{\text{Sous panneau (largeur bas)}} + AO_{\text{Sous panneau (largeur haut)}} = 3,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } Ao / Ap = 3,5 / 10 = 35 \%$$

◇ Calcul du coefficient Cv

Ne connaissant pas la conductivité thermique d'un panneau photovoltaïque, il est considéré par défaut une résistance thermique égale à 0 ce qui n'a de toute façon pas d'impact pour déterminer le coefficient Cv lorsque la lame d'air est très ventilée.

- Ao / Ap = 35% (≥ 20 %) : lame d'air très ventilée
- R_{couverture extérieure} = 0,00 m².K/W (R < 0,2 m².K/W)

D'après le tableau de correspondance, **Cv = 0,15**

◇ Calcul du coefficient $C_{V_{\text{corrigé}}}$

Le coefficient de ventilation corrigé de la toiture est donc :

$$C_{V_{\text{corrigé}}} = 0,15 \times (1 - 0,375) + 0,375 = 0,47$$

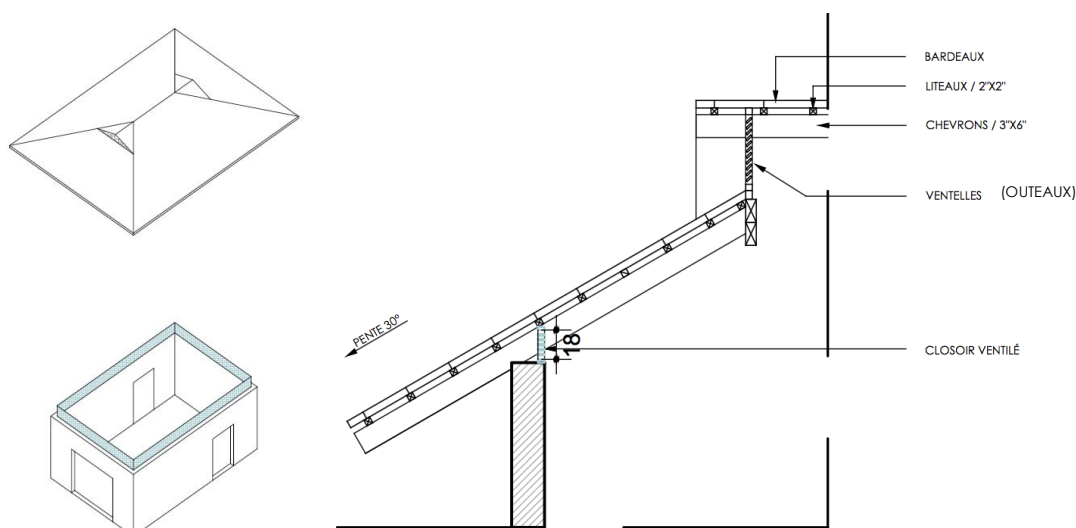
5. Cas des toitures en bardeaux de bois

Afin de ne pas dénaturer les habitudes constructives et architecturales liées à l'utilisation de matériaux naturels en Polynésie française, une toiture en bardeau de bois avec sous-face apparente **peut s'affranchir d'une isolation** si :

- Le taux d'ouvrant $A_o/A_p \geq 5\%$
- Les ouvertures permettant d'atteindre ce taux sont permanentes et situées au-dessus du volume habitable (hauteur supérieure à 2,1m par rapport au niveau du sol fini)

Exemples de toiture bardeaux de bois

Le complexe de toiture est composé comme suit :



Il est considéré un bâtiment dont la surface au sol est de 5 x 12,8 m pour une surface horizontale de toiture de 64 m².

◇ Calcul A_o/A_p :

La surface d'ouverture est calculée de la manière suivante :

| Ouvertures | Dimensions (m) | Nombre | $A_{o\text{brute}}$ (m ²) | Coeff. K | A_o (ouverture) |
|---------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------|----------|-------------------|
| Outeaux | Triangle 2,8 x 1,9 x 1,9 | 2 | 3,60 | 0,5 | 1,80 |
| Chaînage (longueur) | Rectangle 0,18x12,8 | 2 | 2,30 | 0,5 | 1,15 |
| Chaînage (largeur) | Rectangle 0,18x5 | 2 | 0,9 | 0,5 | 0,45 |
| TOTAL | | | 5,99 | - | 3,40 |

Les ouvertures en closoirs sont équipées de simples grilles moustiquaire. Les ouvertures en outeaux sont équipées de ventelles pare-pluie. Sans information de la part du fabricant, ni calcul spécifique, on considère donc un coefficient de réduction $k = 0,5$ pour toutes les ouvertures.

$$A_o = A_{o\text{Outeaux}} + A_{o\text{closoirs(longueur)}} + A_{o\text{closoirs(largeur)}} = 3,40 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } A_o / A_p = 3,4 / 64 = 5,3 \%$$

Les ouvertures sont situées à plus de 2,1 mètres au-dessus du niveau du sol fini. Les dispositions constructives permettent au bâtiment d'être conforme aux obligations de la réglementation énergétique des bâtiment relatives à la protection solaire des toitures.

6. Cas des toitures végétalisées

Il est possible de valoriser la mise en œuvre d'un complexe de toiture végétalisée au regard du calcul de facteur solaire de toiture.

Étant donné la diversité des teintes de végétation possible, la réglementation considère arbitrairement une teinte moyenne pour la détermination du coefficient d'absorption, soit $\alpha = 0,6$.

Le tableau de référence des valeurs de conductivité thermique fixe une valeur différente selon l'épaisseur de terre végétalisée. Ainsi :

- Terre végétale d'épaisseur ≤ 30 cm : $\lambda = 0,75$ W/m.K
- Terre végétale d'épaisseur > 30 cm : $\lambda = 1,25$ W/m.K

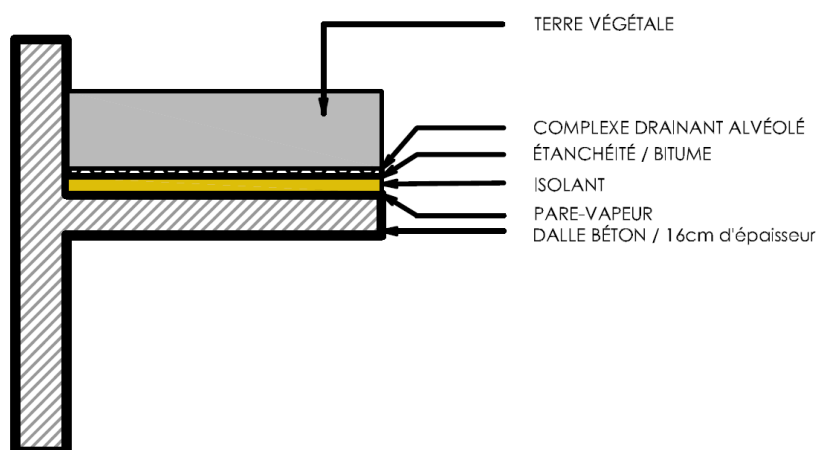
En effet, une épaisseur de terre plus importante restera plus longtemps humide voire gorgée d'eau ce qui altère ses performances d'isolation thermique.

Pour optimiser thermiquement le complexe de toiture végétalisée, il est donc recommandé de mettre en œuvre 30cm de terre végétale, correspondant à une résistance thermique $R = 0,4$ m².K/W.

Du fait de l'augmentation de la valeur de conductivité au-delà d'une épaisseur de 30cm, cette même valeur de résistance thermique est atteinte pour une épaisseur de terre égale à 50 cm.

Bien que les caractéristiques d'évapotranspiration et d'ombrage de la végétation jouent un rôle important pour la réduction des apports solaires au complexe de toiture végétalisée, celles-ci ne peuvent pas être pris en compte dans le calcul du facteur solaire.

La mise en œuvre courante pour ce type de complexe sur toiture terrasse en béton est la suivante :



Le complexe drainant alvéolé est très souvent une plaque de polystyrène extrudé surélevée par rapport à l'étanchéité, permettant à l'eau de s'évacuer entre la plaque et l'étanchéité. Cette plaque pourra être prise en compte dans le calcul de résistance thermique dont les fabricants indiquent en général la valeur dans leur fiche technique.

Exemple :

Le calcul de résistance thermique peut être le suivant :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------------------|-------------------|----------------|--|
| Terre végétale | 0,75 | 30 | 0,40 |
| Polystyrène drainant | | 4 | 0,44 |
| Etanchéité bitumineuse | 0,17 | 1 | 0,06 |
| Isolant perlite expansée | 0,06 | 3 | 0,5 |
| Dalle béton | 2 | 16 | 0,08 |
| TOTAL | | 54 | 1,48 |

La résistance thermique du Polystyrène drainant est fournie par le fabricant et certifiée par un certificat ACERMI.

◇ Calcul du facteur solaire :

- Alpha = 0,6 (teinte moyenne)
- R couverture = 1,48 m².K/W
- Cv = 1
- FS = $0,07 \times \alpha \times Cv / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,6 \times 1 / (1,48 + 0,2) = \mathbf{2,50 \%}$

La mise en œuvre d'une couche d'isolation de 3 cm en panneaux de perlite expansée sous le complexe végétalisé suffit pour être conforme à la réglementation énergétique.

VI.ÉTUDES DE CAS

Les études de cas suivantes présentent différentes configurations de toitures pour lesquelles nous cherchons à déterminer l'épaisseur d'isolant à mettre en œuvre (6.1.a, 6.1.b et 6.1.c) ou la surface d'ouverture nécessaire à se passer d'isolation (6.2.a). Dans certains cas, le calcul du facteur solaire est effectué à partir d'une configuration connue afin de s'assurer que celui-ci est conforme (6.2.b).

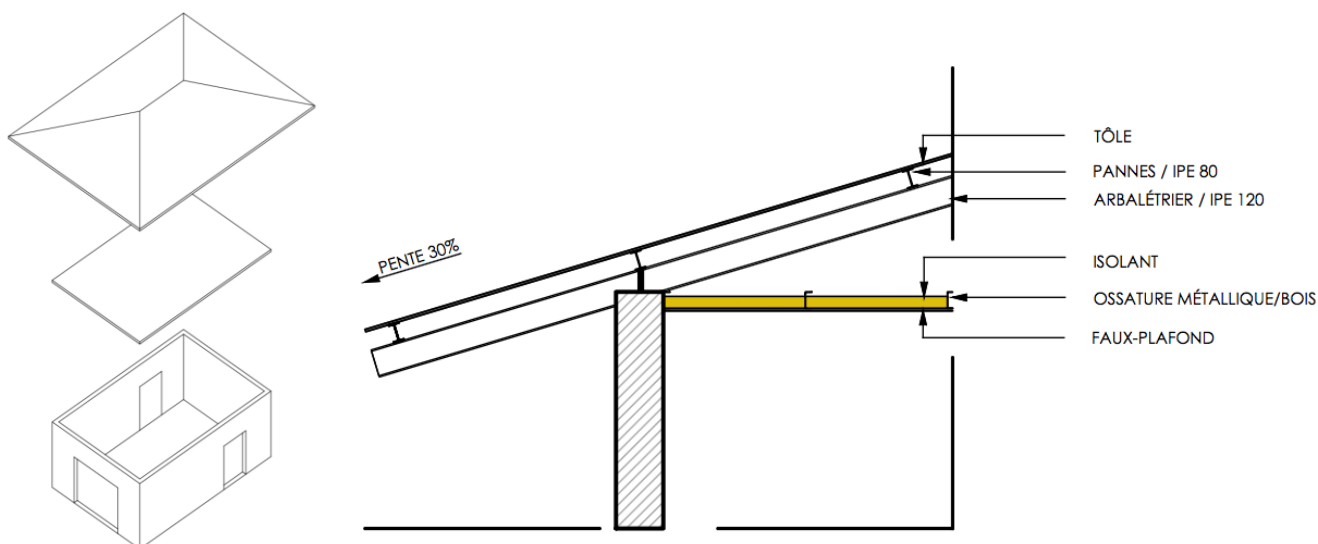
Enfin, la partie 6.3 « contre-exemples » développe le calcul du facteur solaire sur des cas courants actuels qui ne permettent pas d'atteindre les seuils fixés par la réglementation.

1. Toitures considérées comme non ventilées

A. TOITURES EN TOLES AVEC COMBLES

Hypothèses :

La toiture est composée comme suit :



La couleur de la face extérieure de la tôle est choisie sur le nuancier standard du fabricant : référence « Vert clair ». Les combles sont séparés du volume habitable par un faux-plafond en PVC sur lequel est posé une isolation en laine minérale.

Dans cette étude, on cherchera à calculer l'épaisseur d'isolant nécessaire pour atteindre l'objectif $FS_{\max} = 2,5\%$.

Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

D'après le nuancier des teintes de tôles : **alpha = 0,6**

◇ Coefficient C_v

Sans objet ($C_v = 1$) car la lame d'air est peu ou pas ventilée.

◇ Résistance thermique minimum

Calcul de la résistance thermique minimum à atteindre :

$$R_{\text{minimum}} = (0,07 \times \alpha \times C_v / FS_{\max}) - 0,2 = (0,07 \times 0,6 \times 1 / 0,025) - 0,2 = \mathbf{1,48 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}}$$

◇ Épaisseur de laine minérale

Pour le calcul de l'épaisseur de laine minérale minimum, il faut d'abord connaître la résistance thermique du complexe de toiture sans isolation :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------------------------|-------------------|----------------|--|
| Tôle acier | 52 | 0,075 | 0,00 |
| Lame d'air peu ou pas ventilée | - | > 5 cm | 0,17 |
| Faux-plafond en lames PVC | 0,17 | 1 | 0,06 |
| TOTAL | | | 0,23 |

$$E_{\text{isolant minimum}} = (R_{\text{minimum}} - R_{\text{sans isolation}}) \times \lambda_{\text{laine minérale}} = (1,48 - 0,23) \times 0,04 = 0,05 \text{ m soit } 5 \text{ cm}$$

Il est donc suffisant d'installer 5 cm d'isolation en laine minérale pour respecter l'objectif.

◇ Vérification du calcul de facteur solaire :

Résistance thermique :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------------------------|-------------------|----------------|--|
| Tôle acier | 52 | 0,075 | 0,00 |
| Lame d'air peu ou pas ventilée | - | > 5 cm | 0,17 |
| Laine minérale | 0,040 | 5 | 1,25 |
| Faux-plafond en lames PVC | 0,17 | 1 | 0,06 |
| TOTAL | | | 1,48 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,00075 / 52 + 0,17 + 0,05 / 0,040 + 0,01 / 0,17$$

$$R_{\text{toiture}} = 1,48 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$$

Facteur solaire FS :

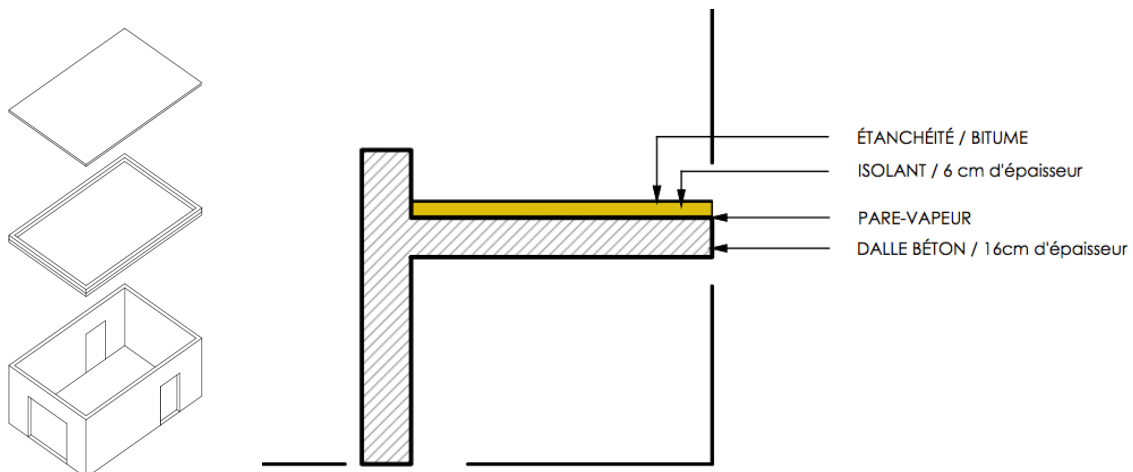
$$FS = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,6 \times 1 / (1,48 + 0,2)$$

$$FS = 2,50 \%$$

B. TOITURE TERRASSE BETON ETANCHEE

Hypothèses :

La toiture est composée comme suit :



La couverture est composée d'une toiture terrasse en béton armé recouverte d'une isolation en polystyrène expansé et d'une étanchéité bitumineuse autoprotégée. La couleur de la face extérieure de la membrane bitumineuse présente une couleur gris foncé.

Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

En l'absence de données plus précises de la part du fabricant, le tableau des catégories de teinte est utilisé pour déterminer **alpha = 0,8** (teinte sombre).

◇ Coefficient Cv

Sans objet (Cv = 1) car la lame d'air est peu ou pas ventilée.

◇ Résistance thermique minimum

Calcul de la résistance thermique minimum à atteindre :

$$R_{\text{minimum}} = (0,07 \times \alpha \times C_v / FS_{\text{max}}) - 0,2 = (0,07 \times 0,8 \times 1 / 0,025) - 0,2 = \mathbf{2,04 \text{ m}^2.K/W}$$

◇ Épaisseur de laine minérale

Pour le calcul de l'épaisseur du polystyrène expansé, il faut d'abord connaître la résistance thermique du complexe de toiture sans isolation :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|------------------------|-------------------|----------------|--|
| Étanchéité bitumineuse | 0,17 | 1 | 0,06 |
| Dalle béton armé | 2,00 | 16 | 0,08 |
| TOTAL | | | 0,14 |

$$E_{\text{isolant minimum}} = (R_{\text{minimum}} - R_{\text{sans isolation}}) \times \lambda_{\text{polystyrène}} = (2,04 - 0,14) \times 0,042 = 0,0798 \text{ m soit } 8 \text{ cm}$$

Il est donc suffisant d'installer 8 cm d'isolation en polystyrène expansé pour respecter l'objectif.

◇ Vérification du calcul de facteur solaire :

Résistance thermique :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|------------------------|-------------------|----------------|--|
| Étanchéité bitumineuse | 0,17 | 1 | 0,06 |
| Polystyrène expansé | 0,042 | 8 | 1,90 |
| Dalle béton armé | 2,00 | 16 | 0,08 |
| TOTAL | | | 2,04 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,01 / 0,17 + 0,06 / 0,042 + 0,16 / 2$$

$$R_{\text{toiture}} = \mathbf{2,04 \text{ m}^2.K/W}$$

Facteur solaire FS :

$$FS = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,8 \times 1 / (2,04 + 0,2)$$

$$FS = \mathbf{2,50 \%}$$

C. TOITURES EN IMITATION PANDANUS AVEC PLAFOND RAMPANT

Hypothèses :

La toiture est composée comme suit :

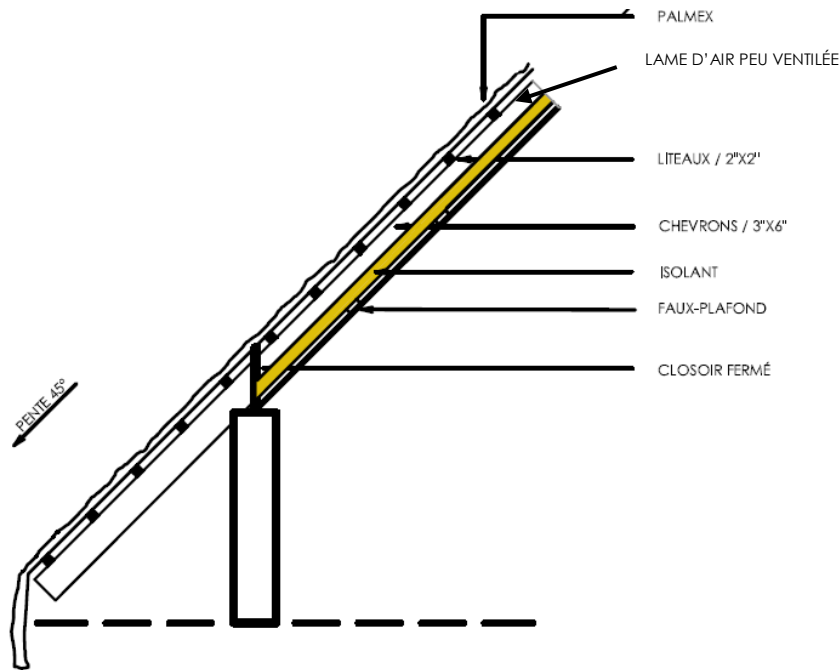
Sous la couverture en Palmex est mis en œuvre un faux-plafond rampant en lames de bois de type lambris avec un isolant en laine minérale.

Une lame d'air est formée entre l'isolant et la couverture, dans l'épaisseur des chevrons. Son épaisseur est supérieure à 5 cm.

L'essence du bois est le Pin Radiata, considéré comme « léger ». L'épaisseur des lames est 2 cm.

La couleur de la face extérieure de la couverture est marron..



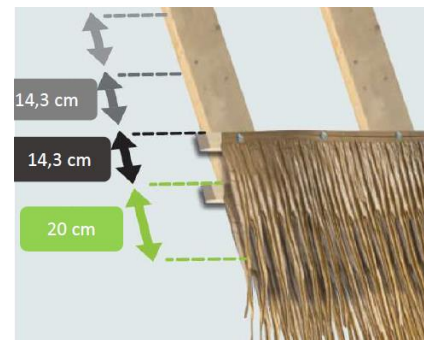


Le Palmex est mis en œuvre à recouvrement tous les 14 cm environ, la partie pleine de la couverture étant à chaque fois recouverte de moitié.

Pour simplifier, on calcule la résistance thermique d'une seule couche de Palmex dont l'épaisseur est de 0,7 mm (donnée fabricant).

Le matériau est du Polyéthylène à haute densité (PEHD) : les règles Th-bat indiquent $\lambda = 0,5 \text{ W/m.K}$.

Dans cette étude, on cherchera à calculer l'épaisseur d'isolant nécessaire pour atteindre l'objectif $FS_{\max} = 2,5\%$.



Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

D'après le tableau des catégories de teintes, le marron est associé à la couleur « brun », soit une teinte sombre : **alpha = 0,8**

◇ Coefficient Cv

Sans objet ($Cv = 1$) car la lame d'air est peu ou pas ventilée.

◇ Résistance thermique minimum

Calcul de la résistance thermique minimum à atteindre :

$$R_{\text{minimum}} = (0,07 \times \alpha \times Cv / FS_{\max}) - 0,2 = (0,07 \times 0,8 \times 1 / 0,025) - 0,2 = \mathbf{2,04 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}}$$

◇ Épaisseur de laine minérale

Pour le calcul de l'épaisseur de laine minérale minimum, il faut d'abord connaître la résistance thermique du complexe de toiture sans isolation :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique ($\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$) |
|--------------------------------|-------------------|----------------|---|
| Palmex | 0,5 | 0,07 | 0,001 |
| Lame d'air peu ou pas ventilée | - | > 5 | 0,170 |
| Faux-plafond en lames bois | 0,13 | 2 | 0,154 |
| TOTAL | - | 4,07 | 0,325 |

$$E_{\text{isolant minimum}} = (R_{\text{minimum}} - R_{\text{sans isolation}}) \times \lambda_{\text{laine minérale}} = (2,04 - 0,325) \times 0,04 = 0,069 \text{ m soit } 7 \text{ cm}$$

Il est donc suffisant d'installer 7 cm d'isolation en laine minérale pour respecter l'objectif.

◇ Vérification du calcul de facteur solaire :

Résistance thermique :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------------------------|-------------------|----------------|--|
| Palmex | 0,5 | 0,07 | 0,001 |
| Lame d'air peu ou pas ventilée | - | > 5 | 0,170 |
| Laine minérale | 0,040 | 7 | 1,75 |
| Faux-plafond en lames bois | 0,13 | 2 | 0,154 |
| TOTAL | - | 11,07 | 2,075 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,0007 / 0,5 + 0,17 + 0,07 / 0,040 + 0,02 / 0,13$$

$$R_{\text{toiture}} = 2,075 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

Facteur solaire FS :

$$FS = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,8 \times 1 / (2,075 + 0,2)$$

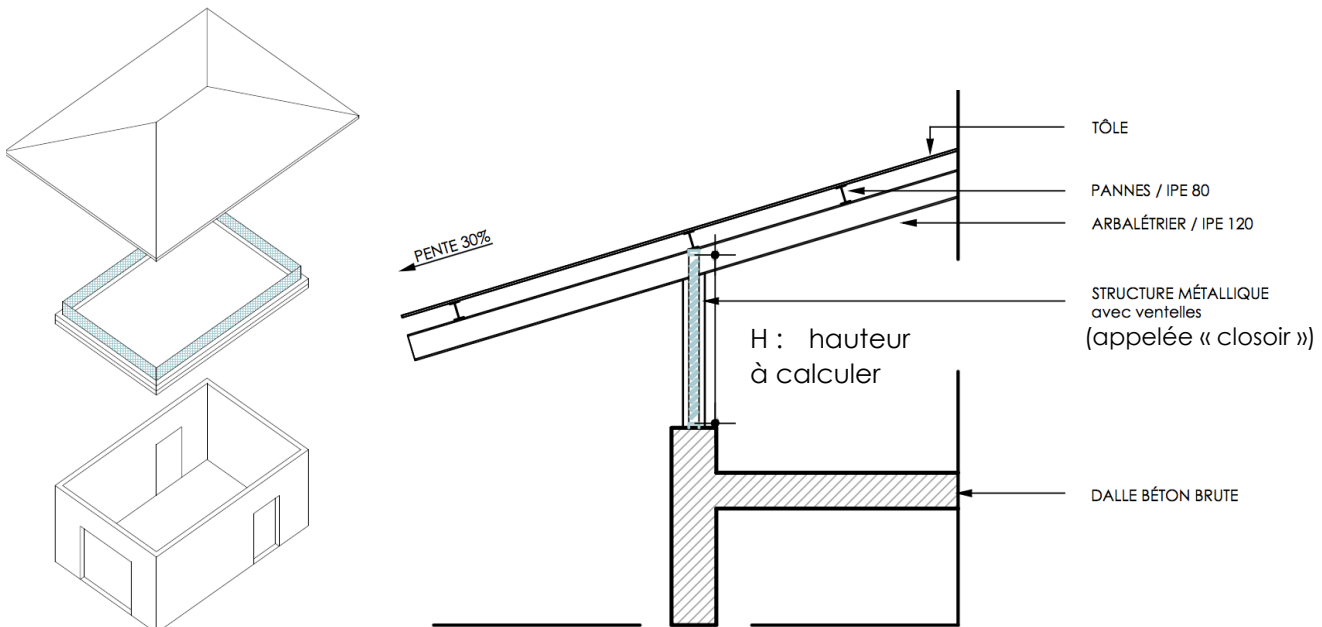
$$FS = 2,46 \%$$

2. Toitures considérées comme ventilées

A. TOITURE TERRASSE BETON RECOUVERTE PAR UNE SUR-TOITURE TRES VENTILEE

Hypothèses :

Le complexe de toiture est composé comme suit :



Il est considéré un bâtiment dont la surface au sol est de 5 x 12,8 m pour une surface horizontale de toiture de 64 m².

La couleur de la face extérieure de la tôle est choisie sur le nuancier standard du fabricant : référence « Brun clair ». Les combles sont séparés du volume habitable par une dalle en béton non

étanchée. Une ouverture périphérique est aménagée entre la dalle en béton et la couverture métallique de manière à largement ventiler la dalle.

Nous cherchons à évoluer la hauteur de l'ouverture afin d'éviter d'isoler la sur-toiture ou la dalle.

Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

D'après le nuancier des teintes de tôles : **alpha = 0,60**

◇ Résistance thermique du complexe

Le complexe de toiture est ventilé et l'objectif est de ne pas mettre en œuvre d'isolation. La résistance thermique à prendre en compte est celle de la sous-toiture, c'est-à-dire la dalle en béton.

| | Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------|------------------|-------------------|----------------|--|
| Sous-toiture | Dalle béton armé | 0,08 | 16,0 | 0,08 |

◇ Calcul du coefficient Cv et de la valeur minimale d'ouverture A_o

Dans un premier temps, il faut déterminer la valeur du coefficient Cv maximale à atteindre pour ne pas recourir à une isolation complémentaire.

$$Cv_{\max} = FS_{\max} \times (R + 0,2) / (0,07 \times \alpha) = 0,025 \times (0,08 + 0,2) / (0,07 \times 0,6) = 0,167$$

Ainsi, d'après le tableau des valeurs du coefficient de ventilation, seul un coefficient de 0,15 permet de s'affranchir d'une isolation de la sous-toiture.

Etant donné, qu'il n'est pas non plus souhaité de recourir à une isolation de la sur-toiture, qui est composée d'une tôle dont la résistance thermique est donc nulle, le ratio A_o / A_p devra être supérieur ou égal à 20%.

A partir de là, on peut maintenant évaluer la surface minimale A_o libre :

$$A_o = A_p \times 0,2 = 64 \times 0,2 = 12,8 \text{ m}^2$$

Si une protection (grille, film moustiquaire, ventelles, etc.) est placée devant les ouvertures, alors la surface d'ouverture brute devra être dimensionnée telle que : A_{o brute} = A_o / k

◇ Calcul de la hauteur minimale ouverte sur l'extérieur :

Le linéaire à considérer pour le calcul de la hauteur est celui du pourtour du bâtiment au niveau de la dalle.

$$\text{Linéaire} = 2 \times 12,8 + 2 \times 5 = 35,6 \text{ m}$$

Ainsi, la **hauteur libre minimum** nécessaire pour s'affranchir d'isolant thermique est :

- Dans le cas d'une ouverture **complètement libre** (k = 1) :
H = A_{o brute} / linéaire = (A_o / k) / linéaire = (12,8 / 1) / 35,6 = 0,36 mètres, soit **36 cm**
- Dans le cas où l'ouverture est **munie d'une protection** (k = 0,5) :
H = A_{o brute} / linéaire = (A_o / k) / linéaire = (12,8 / 0,5) / 35,6 = 0,72 mètres, soit **72 cm**

◇ Vérification du calcul de facteur solaire, dans le cas de la mise en place d'une grille moustiquaire sur une hauteur de 75 cm :

La surface d'ouverture est calculée de la manière suivante :

| Ouvertures | Dimensions (m) | Nombre | Ao _{brute} (m ²) | Coeff. K | Ao (m ²) |
|--------------------|---------------------|--------|---------------------------------------|----------|----------------------|
| Closoir (longueur) | Rectangle 0,75x12,8 | 2 | 19,2 | 0,5 | 9,6 |
| Closoir (largeur) | Rectangle 0,75x5 | 2 | 7,5 | 0,5 | 3,75 |
| TOTAL | | | | | 13,35 |

$$A_o = A_{o_{\text{Closoirs(longueur)}}} + A_{o_{\text{Closoirs(largeur)}}} = 13,35 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } A_o / A_p = 13,35 / 64 = 20,9 \%$$

Ainsi, le coefficient de ventilation à considérer dans le calcul du facteur solaire est de 0,15.

$$FS = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,6 \times 0,15 / (0,08 + 0,2)$$

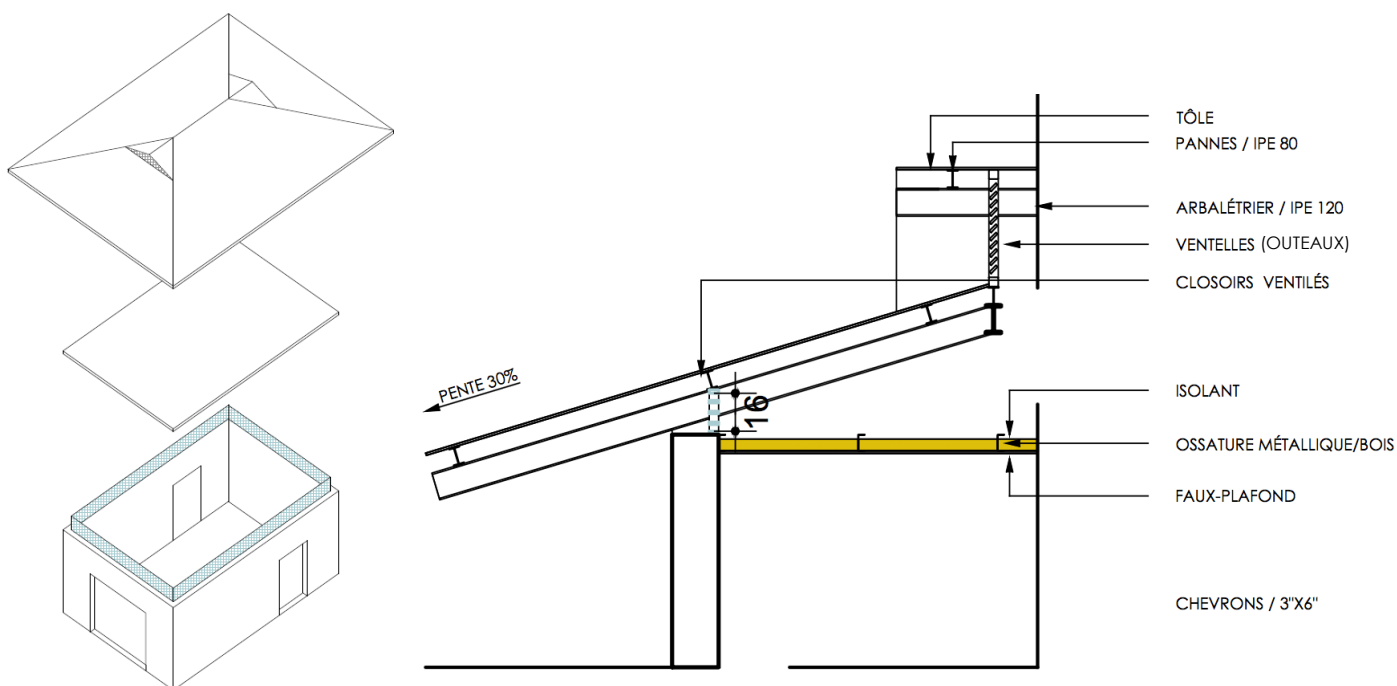
$$FS = 2,25 \%$$

FS = 2,25 % soit une valeur inférieure au seuil de 2,5 %

B. TOITURE EN TOLE ISOLEE ET VENTILEE PAR OUTEAUX ET CHAINAGE AVEC FAUX-PLAFOND HORIZONTAL

Hypothèses :

Le complexe de toiture est composé comme suit :



Il est considéré un bâtiment dont la surface au sol est de 5 x 12,8 m pour une surface horizontale de toiture de 64 m².

La couleur de la face extérieure de la tôle est choisie sur commande avec le code RAL « design » suivant : 180 60 20, soit une teinte « vert sauge ». Les combles sont séparés du volume habitable par un faux-plafond en plaques de plâtre sur lequel est posé une isolation en laine minérale de 3,5 cm d'épaisseur. Les combles sont ventilés de la manière suivante :

- Une ouverture périphérique d'une hauteur de 16cm est aménagée dans le closoir, entre la couverture et l'appui du chainage (espace situé dans l'épaisseur des chevrons ou arbalétriers).
- Deux ouvertures verticales triangulaires sont aménagées sur les tympans de couverture (outeaux). Elles sont situées sous le faitage.

Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

Pour simplifier le calcul d'interpolation linéaire, il est considéré une valeur de saturation à 10 au lieu de 20. En effet, la simplification du calcul ne peut s'effectuer qu'en considérant une valeur défavorable. Ainsi, d'après les tableaux de correspondance, le coefficient d'absorption correspond à une valeur intermédiaire entre les références 180 50 10 ($\alpha = 0,8$) et 180 70 10 ($\alpha = 0,6$). Une interpolation linéaire permet de connaître la valeur de la référence 180 60 10 :

| Référence TLS | Luminosité | Alpha |
|---------------------------------------|------------|------------|
| 180 50 10 | 50 | 0,8 |
| 180 60 10 (projet = 180 60 20) | 60 | 0,7 |
| 180 70 10 | 70 | 0,6 |

Le coefficient pris en compte dans le calcul du facteur solaire est **alpha = 0,70**.

Il serait également possible de pousser l'interpolation linéaire sur la valeur S de saturation pour faire diminuer d'avantage le coefficient. Il faudrait alors chercher la valeur du alpha pour une référence TLS 180 60 40 (alpha = 0,6) et faire une interpolation linéaire avec la référence initiale de 180 60 20. Le résultat serait alors de 0,67.

◇ Résistance thermique

Le complexe de toiture est ventilé c'est pourquoi la résistance thermique à prendre en compte pour le calcul est celle de la sous-toiture, c'est-à-dire le complexe formé par l'isolation et le faux-plafond.

| | Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------|-----------------------|-------------------|----------------|--|
| Sous-toiture | Laine minérale | 0,040 | 3,5 | 0,88 |
| | Plaque de plâtre BA13 | 0,25 | 1,3 | 0,05 |
| | TOTAL | | | 0,93 |

◇ Calcul Ao/Ap :

La surface d'ouverture est calculée de la manière suivante :

| Ouvertures | Dimensions (m) | Nombre | Ao _{brute} (m ²) | Coeff. K | Ao (m ²) |
|---------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------|----------|----------------------|
| Outeaux | Triangle 1,5 x 0,8 x 0,8 | 2 | 0,42 | 0,5 | 0,21 |
| Closoirs (longueur) | Rectangle 0,155x12,8 | 2 | 3,97 | 0,5 | 1,98 |
| Closoirs (largeur) | Rectangle 0,155x5 | 2 | 1,55 | 0,5 | 0,78 |
| | TOTAL | | | | 2,97 |

Les ouvertures en closoirs sont équipées de simples grilles moustiquaire. Les ouvertures en outeaux sont équipées de ventelles pare-pluie. Sans information de la part du fabricant, ni calcul spécifique, on considère donc un coefficient de réduction $k = 0,5$ pour toutes les ouvertures.

$$A_o = A_{o\text{Outeaux}} + A_{o\text{Closoirs(longueur)}} + A_{o\text{Closoirs(largeur)}} = 2,97 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } A_o / A_p = 2,97 / 64 = 4,6\%$$

◇ Calcul du coefficient Cv :

Le coefficient Cv est déterminé à l'aide du tableau de valeurs en fonction de deux paramètres :

- La valeur Ao/Ap : 4,6 %, correspondant à une lame d'air assez ventilée
- La résistance de la couverture extérieure, appelée « sur-toiture », en tôle est nulle ($R < 0,2 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$)

D'après le tableau de correspondance, **Cv = 0,55**

◇ Facteur solaire FS

Le calcul est le suivant :

$$FS = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,7 \times 0,55 / (0,93 + 0,2)$$

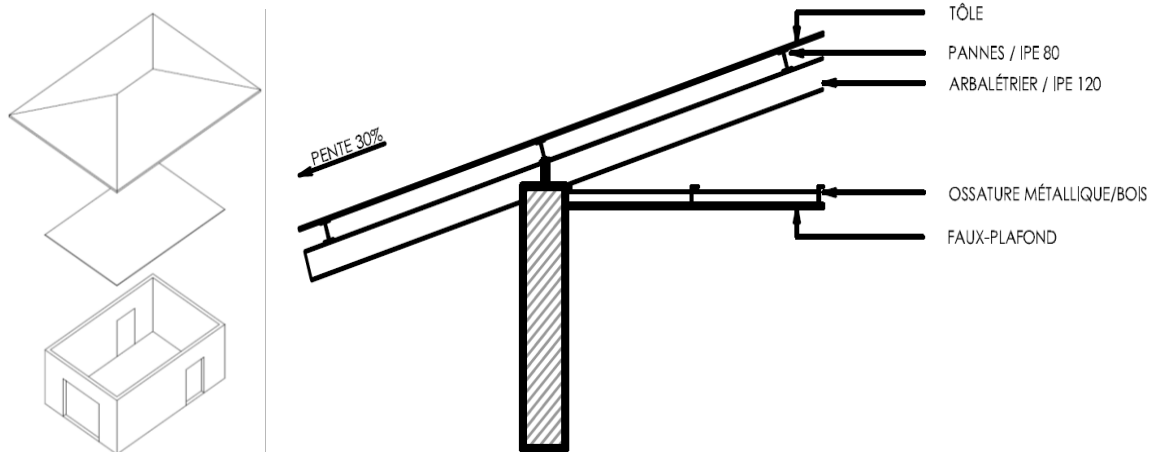
$$FS = 2,39 \%$$

3. Contre-exemples

A. TOITURE TOLE CLAIRE NON ISOLEE AVEC COMBLES

Hypothèses :

Le complexe de toiture est composé comme suit :



Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption est **alpha = 0,40**

◇ Résistance thermique

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------------------------|-------------------|-------------------|--|
| Tôle acier | 52 | 0,075 | 0,00 |
| Lame d'air peu ou pas ventilée | - | En moyenne > 5 cm | 0,17 |
| Faux-plafond en lames PVC | 0,17 | 1 | 0,06 |
| TOTAL | | | 0,23 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,00075 / 52 + 0,17 + 0,01 / 0,17$$

$$R_{\text{toiture}} = 0,23 \text{ m}^2.\text{K}/\text{W}$$

◇ Coefficient Cv

Sans objet (Cv = 1) car la lame d'air est peu ou pas ventilée.

◇ Facteur solaire S

Le calcul est le suivant :

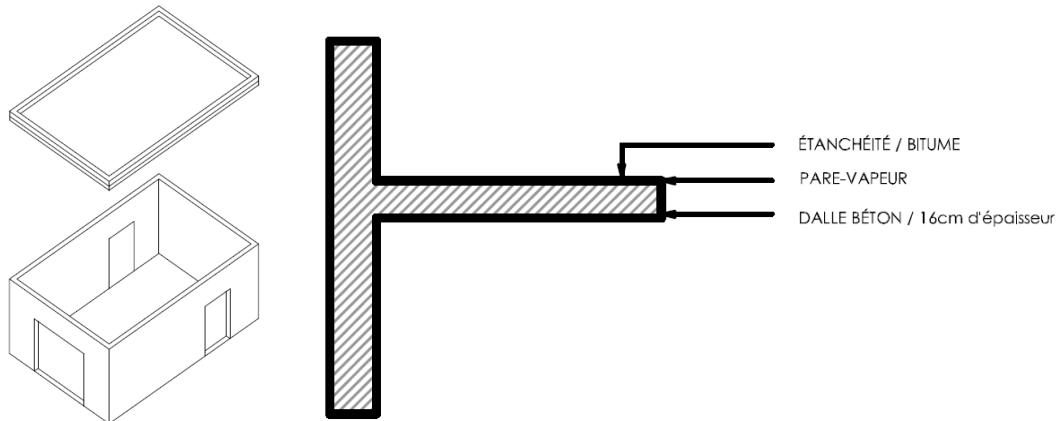
$$S = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,40 \times 1 / (0,23 + 0,2)$$

$$S = 6,53 \%$$

B. TOITURE TERRASSE BETON NON ISOLEE AVEC ETANCHEITE BITUMINEUSE CLAIRE

Hypothèses :

Le complexe de toiture est composé comme suit :



Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption est **alpha = 0,4**.

◇ Résistance thermique

Le calcul de résistance thermique prend en compte l'ensemble des matériaux qui séparent l'extérieur du volume habitable, à savoir :

| Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|------------------------|-------------------|----------------|--|
| Étanchéité bitumineuse | 0,17 | 1 | 0,06 |
| Dalle béton armé | 2,00 | 16 | 0,08 |
| TOTAL | | | 0,14 |

$$R_{\text{toiture}} = 0,01 / 0,17 + 0,16 / 2$$

$$R_{\text{toiture}} = \mathbf{0,14 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}}$$

◇ Coefficient Cv

Sans objet (Cv = 1) car la lame d'air est peu ou pas ventilée.

◇ Facteur solaire S

Le calcul est le suivant :

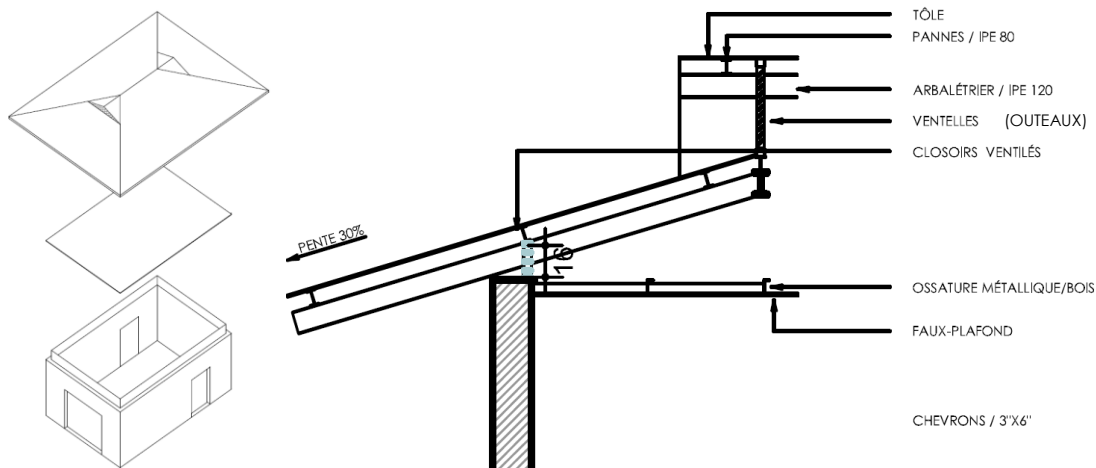
$$S = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,4 \times 1 / (0,14 + 0,2)$$

$$\mathbf{S = 8,26 \%}$$

C. TOITURE EN TOLE CLAIRE NON ISOLEE ET CONSIDEREE COMME « ASSEZ VENTILEE »

Hypothèses :

Le complexe de toiture est composé comme suit :



Calcul :

◇ Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption est **alpha = 0,40**

◇ Résistance thermique

Le complexe de toiture est ventilé c'est pourquoi la résistance thermique à prendre en compte pour le calcul est celle de la sous-toiture, c'est-à-dire le faux-plafond.

| | Matériaux | λ (W/m.K) | Épaisseur (cm) | Résistance thermique (m ² .K/W) |
|--------------|-----------|-------------------|----------------|--|
| Sous-toiture | PVC | 0,17 | 1,0 | 0,06 |

◇ Calcul Ao/Ap :

La surface d'ouverture est calculée de la manière suivante :

| Ouvertures | Dimensions (m) | Nombre | Ao _{brute} (m ²) | Coeff. K | Ao (m ²) |
|---------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------|----------|----------------------|
| Outeaux | Triangle 1,5 x 0,8 x 0,8 | 2 | 0,42 | 0,5 | 0,21 |
| Closoirs (longueur) | Rectangle 0,155x12,8 | 2 | 3,97 | 0,5 | 1,98 |
| Closoirs (largeur) | Rectangle 0,155x5 | 2 | 1,55 | 0,5 | 0,78 |
| TOTAL | | | | | 2,97 |

Les ouvertures en closoirs sont équipées de simples grilles moustiquaire. Les ouvertures en outeaux sont équipées de ventelles pare-pluie. Sans information de la part du fabricant, ni calcul spécifique, on considère donc un coefficient de réduction k = 0,5 pour toutes les ouvertures.

$$A_o = A_{o\text{Outeaux}} + A_{o\text{Closoirs(longueur)}} + A_{o\text{Closoirs(largeur)}} = 2,97 \text{ m}^2$$

$$\text{Soit } A_o / A_p = 3,81 / 64 = 4,6\%$$

◇ Calcul du coefficient Cv :

Le coefficient Cv est déterminé à l'aide du tableau de valeurs en fonction de deux paramètres :

- La valeur $A_o/A_p = 4,6\%$ ($\geq 2\%$) : lame d'air assez ventilée
- La résistance de la couverture extérieure, appelée « sur-toiture », en tôle est nulle

D'après le tableau de correspondance, **Cv = 0,55**



◇ Facteur solaire FS

Le calcul est le suivant : $FS = 0,07 \times \alpha \times C_v / (R + 0,2) = 0,07 \times 0,4 \times 0,55 / (0,06 + 0,2)$

$$FS = 5,92 \%$$

VII.EXEMPLES DE DISPOSITIONS CONFORMES A LA REBPF

1. Couverture en tôle « peu ou pas ventilée »

| Type de couverture | Type d'isolant | Teinte et épaisseur min. d'isolant | | | | Schéma de principe |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|--------|--------|---------|---|
| | | Claire | Moy. | Sombre | Noire | |
| Toiture en tôle isolée avec faux-plafond horizontal | Laine minérale | 3 cm | 5 cm | 7,5 cm | 9,5 cm |  |
| | Laine minérale + PMR monocouche* | 1 cm | 3,5 cm | 5,5 cm | 8 cm | |
| | Laine minérale + PMR à bulles (7mm)** | 1 cm | 3 cm | 5,5 cm | 7,5 cm | |
| Toiture en tôle isolée avec faux-plafond rampant | Laine minérale | 3 cm | 5,5 cm | 7,5 cm | 10 cm |  |
| | Laine minérale + PMR monocouche* | 1,5 cm | 3,5 cm | 5,5 cm | 8 cm | |
| | Laine minérale + PMR à bulles (7mm)** | 1 cm | 3 cm | 5,5 cm | 7,5 cm | |
| Toiture en tôle en panneaux sandwich | Laine minérale | 4 cm | 6 cm | 8,5 cm | 10,5 cm | |

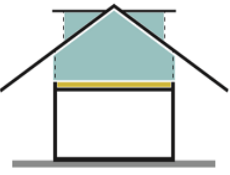
*Il est pris en compte une résistance équivalente ($R_{\text{équivalente}}$) de $0,46 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ en considérant que la PMR monocouche est une feuille mono-couche mince et qu'elle a été correctement mise en œuvre.

**Il est pris en compte une résistance intrinsèque de $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ et une résistance équivalente ($R_{\text{équivalente}}$) de $0,46 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ en considérant une feuille type PMR à bulles de 7mm correctement mise en œuvre.

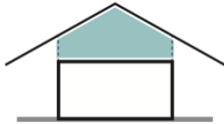
2. Couverture en tôle « assez ventilée »

| Type de couverture | Type d'isolant | Teinte et épaisseur min. d'isolant | | | | Schéma de principe |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|--------|--------|--------|---|
| | | Claire | Moy. | Sombre | Noire | |
| Toiture en tôle isolée avec faux-plafond horizontal | Laine minérale | 1,5 cm | 3 cm | 4 cm | 5,5 cm |  |
| | Laine minérale + PMR monocouche* | 1 cm | 1,5 cm | 2,5 cm | 3 cm | |
| | Laine minérale + PMR à bulles (7mm)** | 1 cm | 1,5 cm | 2,5 cm | 3 cm | |


3. Couverture en tôle « ventilée »

| Type de couverture | Type d'isolant | Teinte et épaisseur min. d'isolant | | | | Schéma de principe |
|---|---------------------------------------|------------------------------------|------|--------|--------|---|
| | | Claire | Moy. | Sombre | Noire | |
| Toiture en tôle isolée avec faux-plafond horizontal | Laine minérale | 0,5 cm | 1 cm | 2 cm | 2,5 cm |  |
| | Laine minérale + PMR monocouche* | - | - | 0,5 cm | 1 cm | |
| | Laine minérale + PMR à bulles (7mm)** | - | - | 0,5 cm | 1 cm | |



4. Couverture en tôle « très ventilée »

| Type de couverture | Type d'isolant | Teinte et épaisseur min. d'isolant | | | | Schéma de principe |
|---|----------------|------------------------------------|------|--------|--------|---|
| | | Claire | Moy. | Sombre | Noire | |
| Toiture-terrace en béton avec sur-toiture en tôle | Pas d'isolant | | - | | 0,5 cm |  |


5. Toiture-terrace en béton « peu ou pas ventilée »

| Type de couverture | Type d'isolant | Teinte et épaisseur min. d'isolant | | | | Schéma de principe |
|--------------------------|------------------------|------------------------------------|------|--------|---------|---|
| | | Claire | Moy. | Sombre | Noire | |
| Toiture-terrace en béton | Polystyrène expansé | 3,5 cm | 6 cm | 8 cm | 10,5 cm |  |
| | Mousse de polyuréthane | 3 cm | 5 cm | 7 cm | 9 cm | |

6. Couverture en matériaux naturels « peu ou pas ventilée »

| Type de couverture | Type d'isolant | Épaisseur minimum d'isolant (teinte moyenne) | Schéma de principe |
|--|--------------------------|--|---|
| Toiture en bardeaux de bois avec faux-plafond horizontal | Laine minérale | 5 cm |  |
| Toiture en bardeaux de bois avec faux-plafond rampant | Laine minérale | 5 cm |  |
| Toiture en pandanus (épaisseur de 10 cm minimum) | Pas d'isolant nécessaire | - | |

7. Couverture en matériaux naturels « ventilée »

| Type de couverture | Type d'isolant | Schéma de principe |
|--|--------------------------|---|
| Toiture ventilée en bardeaux de bois apparents | Pas d'isolant nécessaire |  |
| Toiture en pandanus | Pas d'isolant nécessaire | |