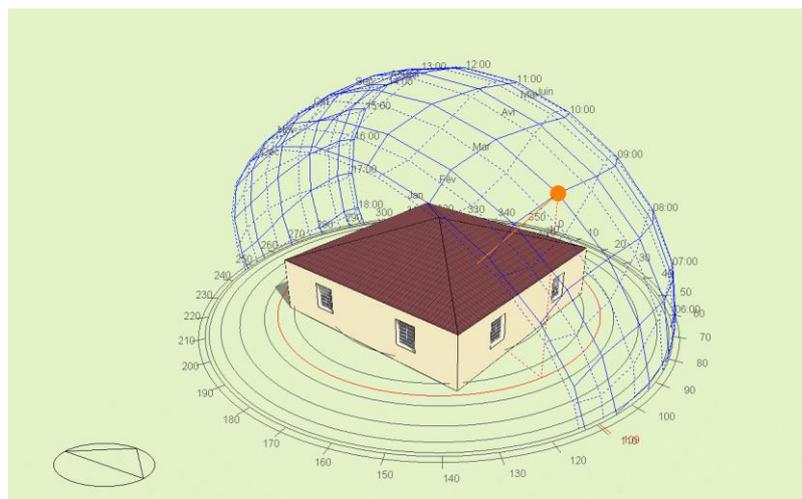




RéBAN

RÉNOVATION ÉNERGÉTIQUE DES BATIMENTS DE LOGEMENT INDIVIDUEL AUX ANTILLES



LOT 1 – Tâche 1.3 : Rapport sur l'analyse des travaux clés

01/12/2021

**Watt
Smart**

Sommaire :

I. Rappel du contenu de la tâche 1.3	3
II. Rappel des hypothèses du modèle	3
III. Analyse des travaux clés sur le logement laboratoire	4
A. Synthèse des résultats :.....	5
B. Protection de la toiture	7
a) Isolation thermique.....	7
b) Isolants minces réfléchissants (IMR)	13
C. Protection des murs	15
a) Isolation des murs :	15
b) Bardage ventilé :	20
c) Protection des murs par orientation :	22
D. Protections solaires :	23
a) Protection architecturale des fenêtres.....	23
b) Protection combinée des fenêtres et des murs :	28
c) Vitrage à faible facteur solaire :	33
IV. Annexes	35
A. Résultats détaillés sur la protection de la toiture	35
a) Toiture tôle avec faux plafond	35
b) Toiture terrasse béton.....	35
c) Toiture tôle avec dalle anticyclonique.....	36
d) IMR.....	36
B. Résultats détaillés sur la protection des murs	37
a) Murs lourds bétons	37
b) Murs légers bois.....	38
c) Bardage ventilé	38
d) Protections des murs par orientation	40
C. Protections solaires :	40
a) Dimensionnement des protections des fenêtres	40
b) Résultats détaillés sur les protections des fenêtres	41
c) Gains en valeur absolu sur la protection des fenêtres	43
d) Résultats détaillés sur les protections combinée des fenêtres et des murs	43

I. Rappel du contenu de la tâche 1.3

L'objectif de cette tâche est de tester sur le logement « laboratoire » un nombre important de travaux-clés d'isolation et de protection solaire et d'en évaluer l'impact thermique.

Comme dans la tâche 1.2, cette analyse est réalisée grâce au logiciel de simulation thermique dynamique Designbuilder V6.

Le présent rapport présente les résultats des simulations qui ont été faites sur le modèle du « logement laboratoire ».

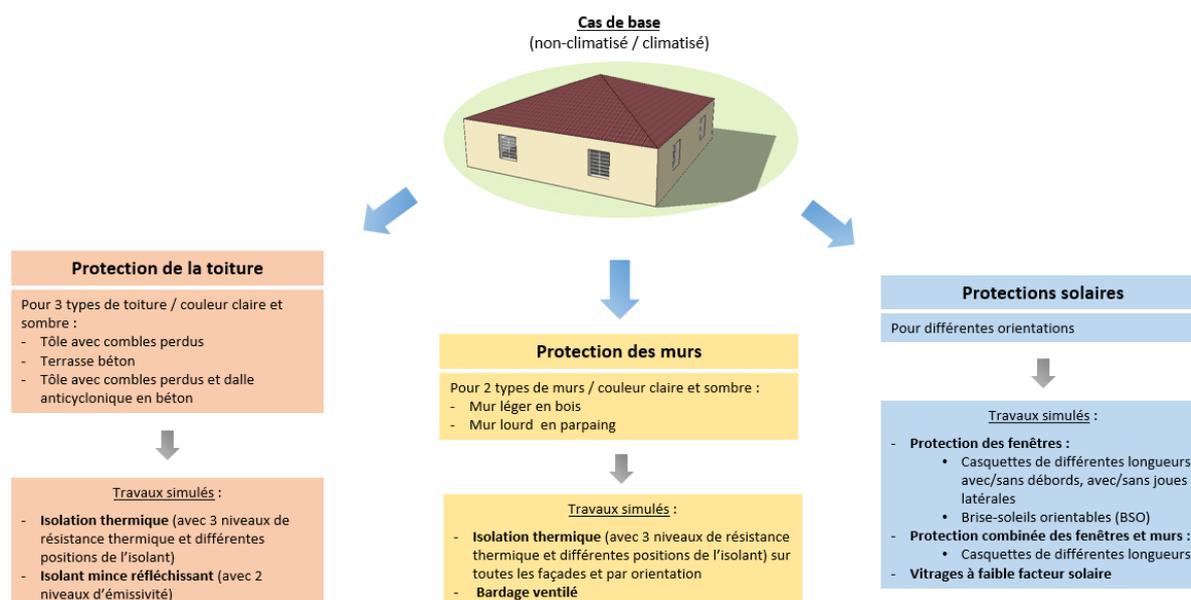
II. Rappel des hypothèses du modèle

Un précédent rapport présentait en détail les hypothèses du modèle de base du « logement laboratoire ». Ci-dessous sont rappelés les principales données :

	En mode climatisé	En mode non-climatisé
Paramètre d'analyse	Besoin de climatisation en kWhf/m ² .an pour une température d'air de consigne de 24°C	% du temps où la température opérative est supérieure à 30°C
Période d'analyse	Toutes les heures de l'année	
Apport internes (équipements et occupants)	Aucun	
Terrain	Albédo = 0,2 Paramètre d'évapotranspiration de la couverture de terrain = 0,4	
Infiltrations logement (renouvellement d'air)	1 vol/h (24h/24)	5 vol/h (24h/24)
Ouvertures	10% des façades Simple vitrage non réfléchissant 6mm	
Murs externes	Parpaing + Enduit extérieur couleur claire	
Toiture combles	Tôle non isolée couleur moyenne (faible rugosité et émissivité = 0,9)	
Plafond combles perdus	Plaque plâtre	
Plancher sur terrain	Dalle béton + carrelage	

III. Analyse des travaux clés sur le logement laboratoire

L'ensemble des travaux clés étudiés sont précisés sur le schéma ci-dessous :



Pour rappel, le cas de base présente les résultats suivants :

	Mode climatisé (jour + nuit)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	% du temps inconfortable sur l'année (T°op ≥ 30°C)
Cas de base	307	38%

Pour certains cas nous avons également étudié un mode supplémentaire afin de nuancer certaines conclusions : logement climatisé uniquement la nuit entre 20h et 6h.

	Mode climatisé (uniquement la nuit : 20h-6h)
	Besoin de froid (kWhf/m ² .an)
Cas de base	121

En revanche, excepté quelques compléments dans l'analyse, nous avons choisi de ne pas afficher les résultats du cas non-climatisé avec une occupation uniquement la nuit (18h-8h). En effet, même si c'est le cas pour beaucoup d'occupants qui travaillent à l'extérieur en semaine, le logement est souvent occupé en journée le weekend donc il est indispensable de prendre en compte le confort en journée.

Il est important de ne pas extrapoler ces résultats de simulations effectuées sur le logement laboratoire sur des logements réels sans garder en tête les limites de représentativité du modèle (pas d'apports internes, logement compact de plain-pied, ventilation continue en mode non-climatisé, 10% de vitrage, ...).

A. Synthèse des résultats :

Au-delà des résultats présentés ci-après, les travaux réalisés lors de cette tâche ont permis de dégager des enseignements importants pour la suite de l'étude :

- L'isolation de toiture est prioritaire car elle permet des gains beaucoup plus importants que les autres types des travaux, mais elle limite également l'évacuation de la chaleur qui provient d'autres sources et peut créer un effet de surchauffe. Une fois la toiture isolée les gains liés aux autres types de travaux sont amplifiés.
- Le phénomène de rafraîchissement nocturne (effet convectif avec l'air extérieur et rayonnement vers le ciel) a une importance significative dans le comportement thermique d'un logement d'après les simulations. Il serait intéressant de confronter ces résultats avec des retours terrains mais il paraît nécessaire de prendre en compte cet effet dans le choix des travaux à réaliser.
- Le choix des couleurs de la toiture et des murs est essentiel car le gain obtenu grâce à une couleur claire est du même ordre de grandeur que le gain lié à isolation thermique et même dans certains cas il est supérieur (exemple : mur en parpaing avec revêtement clair). Une paroi de couleur claire sans isolation permet de réduire les apports de chaleur sans limiter l'évacuation de la chaleur vers l'extérieur.
- Les modes d'occupation (climatisé jour + nuit / uniquement de nuit / non climatisé) ont une influence importante sur l'impact des actions. Une action peut être efficace dans un cas et moins dans l'autre.

Les principaux résultats de l'analyse sur les travaux clés sont présentés dans les deux tableaux suivants :

Travaux		Gains			Niveau d'influence
		Mode climatisé jour + nuit	Mode climatisé uniquement nuit	Mode non climatisé	
PROTECTION DE LA TOITURE	Isolation de toiture tôle	20 à 40% selon couleur de toiture	3 à 20% selon couleur de toiture	50 à 60% selon couleur de toiture	Très important
	Isolation de toiture terrasse béton ou tôle + dalle anticyclonique	20 à 40% selon couleur de toiture et position de l'isolant	10 à 30% selon couleur de toiture et position de l'isolant	60 à 90% selon couleur de toiture et position de l'isolant	Très important
PROTECTION DES MURS	Isolation des murs béton	5 à 10% selon couleur du mur	10 à 20% selon couleur du mur	-5%* à 5% selon couleur du mur	Important
	Bardage ventilé sur murs béton	5 à 10% selon couleur du mur	5 à 10% selon couleur du mur	5 à 10% selon couleur du mur	Important
	Isolation des murs bois	5 à 10% selon couleur du mur	-5 à -10%* selon couleur du mur	-3%* à 1% selon couleur du mur	Moyen
PROTECTION SOLAIRE	Protection des fenêtres	5% En traitant toutes les fenêtres	5% En traitant toutes les fenêtres	10% En traitant toutes les fenêtres	Important
	Protection combinée des fenêtres et des murs	5% En traitant toutes les façades	10% En traitant toutes les façades	10% En traitant toutes les façades	Important

* effet défavorable : voir complément d'analyse ci-dessous

Travaux		Compléments d'analyse
PROTECTION DE LA TOITURE	Isolation de toiture tôle	<ul style="list-style-type: none"> - Les gains présentés sont calculés avec R=1,5 (=6cm de laine de roche) - Une faible isolation (R=1,5) permet des gains importants - L'isolation renforcée (R=3) permet surtout d'améliorer le confort en journée - Gains largement réduits si toiture claire et climatisé uniquement la nuit - L'isolant mince réfléchissant permet théoriquement des gains similaires à l'isolation classique mais en cas de dégradation ou de malfaçon la performance est réduite.
	Isolation de toiture terrasse béton ou tôle + dalle anticyclonique	<ul style="list-style-type: none"> - Les gains présentés sont calculés avec R=1,5 (=6cm de laine de roche) - Une faible isolation (R=1,5) permet des gains importants - L'isolation renforcée (R=3) permet surtout d'améliorer le confort en journée - En mode climatisé l'isolation en sous-face est plus efficace et en mode non climatisé il vaut mieux privilégier l'isolation côté extérieur. - Gains largement réduits si toiture claire et climatisé uniquement la nuit
PROTECTION DES MURS	Isolation des murs béton	<ul style="list-style-type: none"> - Il est intéressant d'isoler un mur béton uniquement en mode climatisé. Dans ce cas isoler par l'intérieur car isoler par l'extérieur est inefficace. - Avec une toiture isolée, l'impact de l'isolation des murs est 2 fois plus important. - L'isolation du mur Nord permet 2 à 3 fois moins de gains que l'isolation des murs Est, Sud et Ouest. - *En mode non climatisé isoler un mur clair est contre-productif. Un mur clair non isolé est plus performant qu'un mur sombre isolé.
	Bardage ventilé sur murs béton	<ul style="list-style-type: none"> - Les gains liés à la mise en place d'un bardage ventilé sont du même ordre que l'isolation des murs. - En mode climatisé uniquement la nuit, les gains sont 2 fois moins importants qu'avec une isolation par l'intérieur alors qu'en mode non climatisé les gains sont plus importants avec le bardage ventilé.
	Isolation des murs bois	<ul style="list-style-type: none"> - *En l'absence d'une toiture isolée, l'isolation des murs bois est contre-productive en mode climatisé uniquement la nuit et en mode non climatisé. L'isolation est intéressante uniquement dans le cas climatisé jour + nuit. - Avec une toiture isolée, il devient intéressant d'isoler les murs bois notamment pour améliorer le confort en mode non climatisé. Dans ce cas les gains atteignent 10 à 20%. - L'isolation du mur Nord permet 2 à 3 fois moins de gains que l'isolation des murs Est, Sud et Ouest.
PROTECTION SOLAIRE	Protection des fenêtres	<ul style="list-style-type: none"> - Les gains présentés sont calculés avec la solution combinée optimale, en l'absence d'isolation de toiture et avec une proportion de vitrage de 10%. - Avec une toiture isolée les gains en relatif sont 2 fois plus importants qu'avec une toiture non isolée en mode climatisé (10%) et 5 fois en mode non climatisé (50%). - La mise en place d'une protection solaire uniquement sur la façade Nord permet des gains 3 fois plus faibles en relatif que sur les autres orientations. - Avec une proportion de vitrage plus grande les gains sont plus importants (2 fois plus en doublant la surface de vitrage).
	Protection combinée des fenêtres et des murs (débord de toiture)	<ul style="list-style-type: none"> - Les gains présentés sont calculés avec la solution combinée optimale, en l'absence d'isolation de toiture, avec une proportion de vitrage de 10% et des murs clairs. - Avec une toiture isolée les gains en relatif sont 2 fois plus importants qu'avec une toiture non isolée en mode climatisé jour + nuit (10%) et 5 fois en mode non climatisé (50%). - La mise en place d'une protection solaire sur la façade Nord ne permet pas des gains significatifs par rapport à l'investissement. - Avec une proportion de vitrage plus grande et/ou avec des murs sombres les gains sont plus importants.

B. Protection de la toiture

a) Isolation thermique

L'impact de l'isolation thermique de la toiture a été analysé pour différents types de toitures :

- Toiture tôle avec combles perdus et faux plafond
- Toiture terrasse béton
- Toiture tôle avec combles perdus et dalle anticyclonique en béton

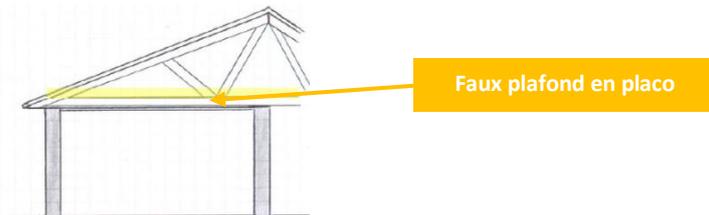
Pour chaque cas, l'impact a été calculé avec une toiture sombre et avec une toiture claire pour évaluer une fourchette de gains.

Plusieurs niveaux d'isolation thermique ont été testés ainsi que la position de l'isolant au sein du complexe de toiture :

- $R=1,5 \text{ m}^2.K/W$ ($\approx 6 \text{ cm}$ de laine de roche)
- $R=3 \text{ m}^2.K/W$ ($\approx 12 \text{ cm}$ de laine de roche)
- $R=4,5 \text{ m}^2.K/W$ ($\approx 18 \text{ cm}$ de laine de roche)

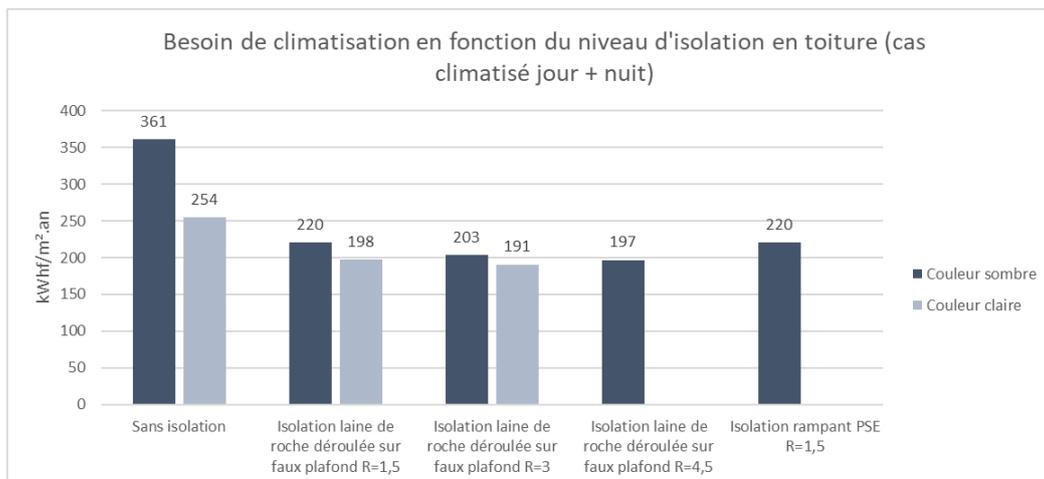


Toiture tôle avec combles perdus et faux plafond



Résultats détaillés en Annexe A.a

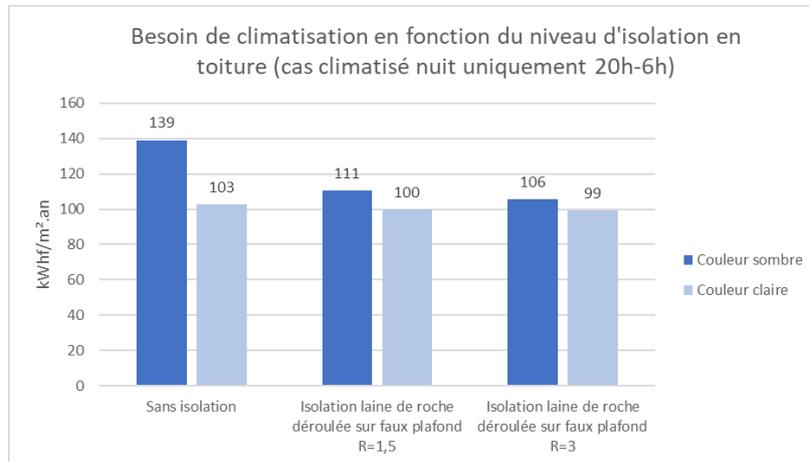
En mode climatisé (jour + nuit)



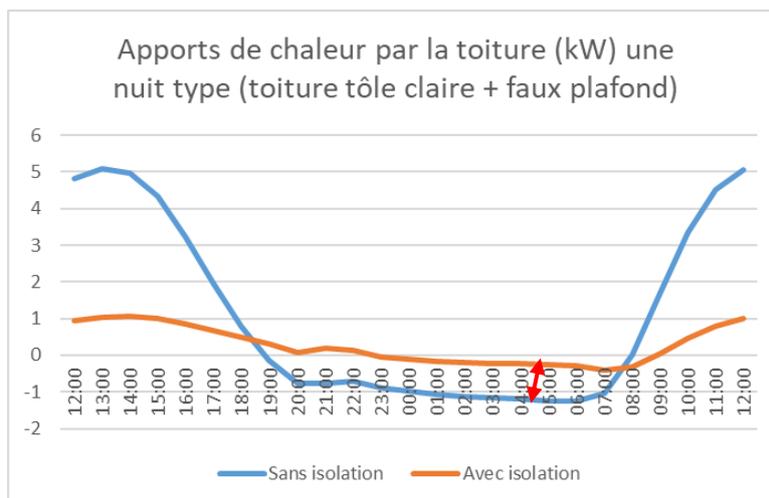
→ L'isolation de toiture sur faux plafond avec un $R=1,5$ permet une réduction du besoin de froid de 39% avec une toiture sombre et de 22% avec une toiture claire.

- Doubler l'épaisseur d'isolant (R=3) permet de réduire de 3 à 5% supplémentaire selon la couleur, et au-delà le gain est très faible (<2%).
- Pour ce type de toiture et avec un même niveau d'isolation, la position de l'isolant en rampant par rapport à une position déroulée sur faux plafond n'a pas d'impact sur les gains.

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)

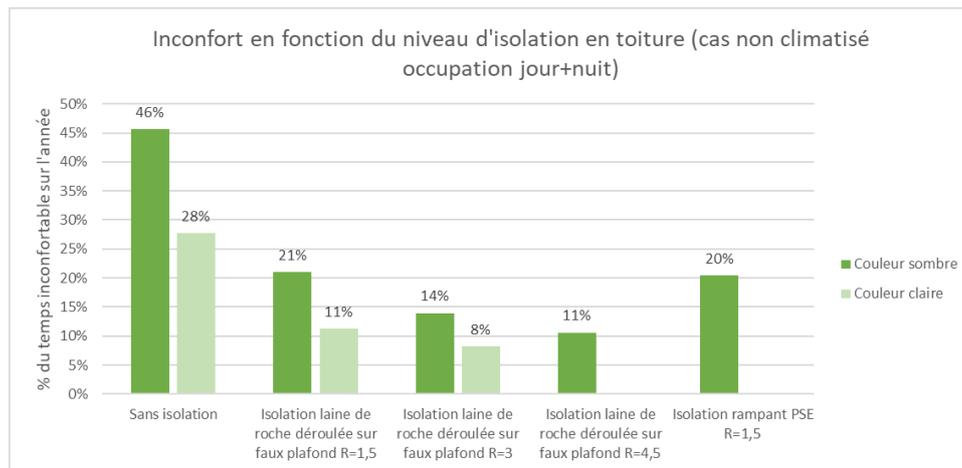


- L'isolation de toiture sur faux plafond avec un R=1,5 permet une réduction du besoin de froid plus faible que dans le cas climatisé jour + nuit. Le gain est d'environ 20% avec une toiture sombre mais il est très faible avec une toiture claire (3%). En effet, en l'absence d'isolation, il y a un phénomène de rafraîchissement nocturne par la toiture qui permet de limiter le besoin de climatisation la nuit (voir graphique ci-dessous). En isolant la toiture, on limite cet effet nocturne favorable. Donc si le gain obtenu en journée en réduisant les apports de chaleur par la toiture n'est pas largement supérieur au gain lié à l'effet nocturne (ce qui est le cas lorsque la toiture est claire), l'impact de l'isolation est limité. Cette conclusion n'est valable qu'en mode occupé et climatisé uniquement la nuit car dans le cas où le logement est occupé en journée le gain de confort lié à l'isolation est important.
- Doubler l'épaisseur d'isolant (R=3) permet de réduire de 1 à 3% supplémentaire selon la couleur.



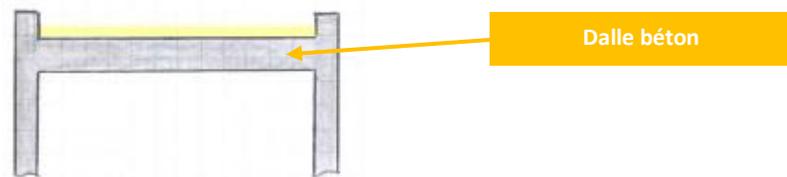
Sans isolation on observe un effet rafraîchissant de la toiture qui absorbe environ 1 kW toute la nuit. Cet effet est dû à la température extérieure qui baisse la nuit mais également à l'échange radiatif nocturne de la toiture tôle vers le ciel lorsque celui-ci est dégagé. Cela permet d'atteindre dans certains cas une température dans les combles légèrement inférieure à la température extérieure.

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)



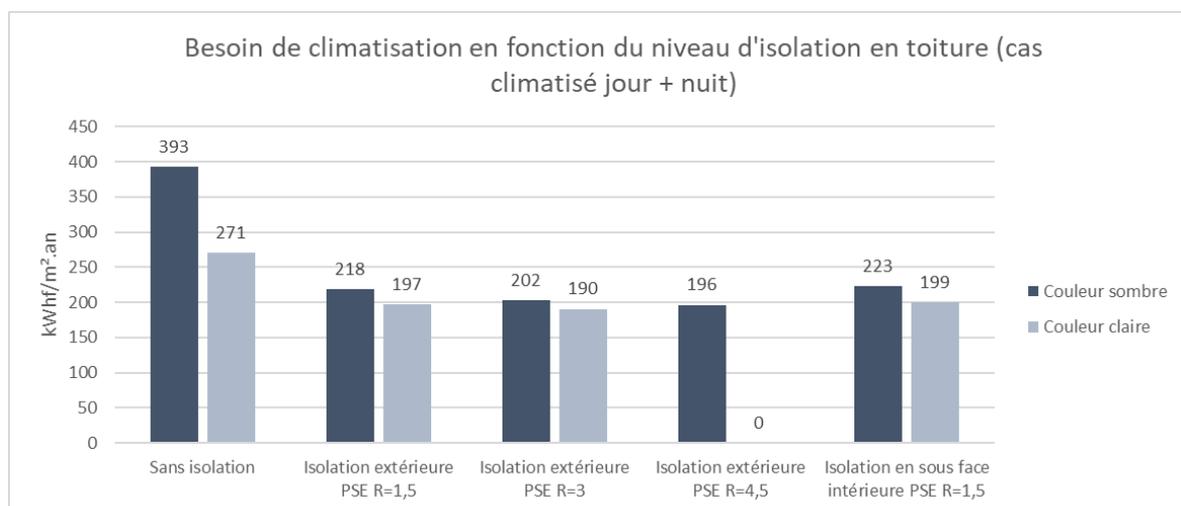
- L'isolation de toiture sur faux plafond avec un R=1,5 permet une réduction de l'inconfort de 54% avec une toiture sombre et de 59% avec une toiture claire.
- Doubler l'épaisseur d'isolant (R=3) permet de réduire l'inconfort de 11 à 15% supplémentaire selon la couleur, ce qui justifie complètement cette action. Au-delà le gain est très faible.

Toiture terrasse



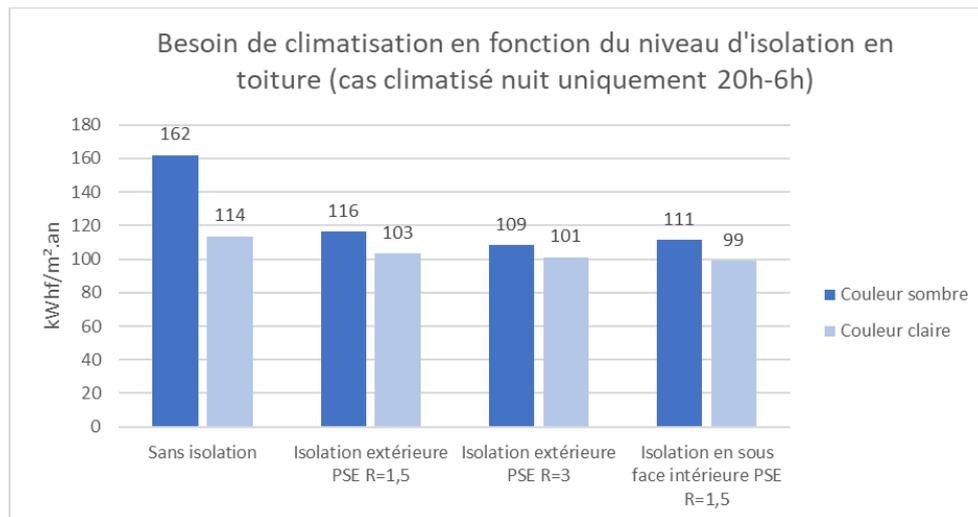
Résultats détaillés en Annexe A.b

En mode climatisé (jour + nuit)



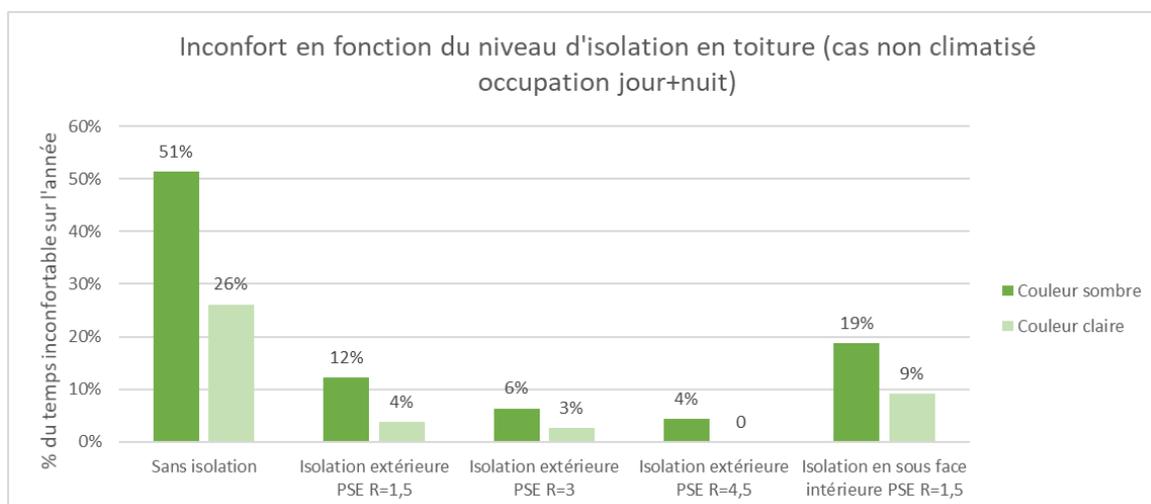
- L'isolation de toiture par l'extérieur avec un R=1,5 permet une réduction du besoin de froid de 44% avec une toiture sombre et de 27% avec une toiture claire.
- Doubler l'épaisseur d'isolant (R=3) permet de réduire de 2 à 4% supplémentaire selon la couleur, et au-delà le gain est très faible (<2%).
- En mode climatisé jour + nuit, avec un même niveau d'isolation, la position de l'isolant en sous-face par rapport à une isolation extérieure a une influence très faible (1%).

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)



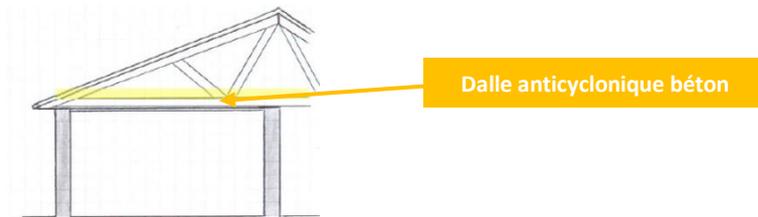
- L'isolation de toiture par l'extérieur avec un R=1,5 permet une réduction du besoin de froid plus faible que dans le cas climatisé jour + nuit. Le gain est d'environ 28% avec une toiture sombre et de 9% avec une toiture claire.
- Doubler l'épaisseur d'isolant (R=3) permet de réduire de 2 à 5% supplémentaire selon la couleur.
- En mode climatisé uniquement la nuit, avec un même niveau d'isolation, la position de l'isolant en sous-face par rapport à une isolation extérieure est légèrement plus efficace et permet de gagner 3 à 4% supplémentaire selon la couleur.

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)



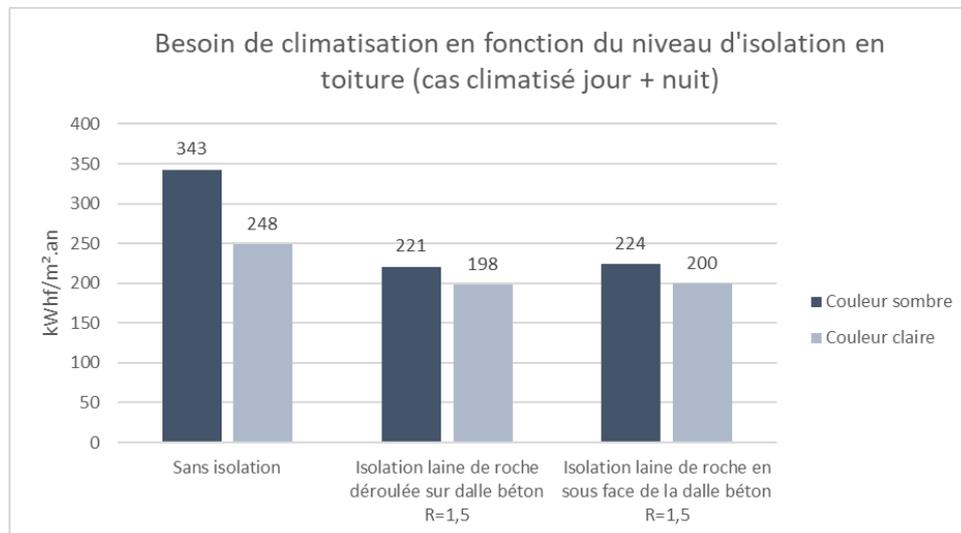
- L'isolation de toiture par l'extérieur avec un $R=1,5$ permet une réduction de l'inconfort de 76% avec une toiture sombre et de 85% avec une toiture claire.
- Doubler l'épaisseur d'isolant ($R=3$) permet de réduire l'inconfort de 5 à 11% supplémentaire selon la couleur, ce qui justifie complètement cette action. Au-delà le gain est très faible.
- Il est intéressant de noter qu'avec un même niveau d'isolation, en valeur absolue, on atteint un niveau d'inconfort (selon l'indicateur utilisé dans le cadre du projet RÉBAN) plus faible avec une toiture terrasse qu'avec une toiture tôle avec combles perdus et faux plafond. En effet, l'inertie du béton permet d'absorber une partie des apports de chaleurs en journée.
- La position de l'isolant en sous-face par rapport à une isolation extérieure est moins efficace car elle coupe l'inertie de la dalle béton. Dans ce cas, on retrouve d'ailleurs en valeur absolue un niveau d'inconfort similaire à celui pour une toiture tôle avec combles perdus et faux plafond.

Toiture tôle avec combles perdus et dalle anticyclonique :



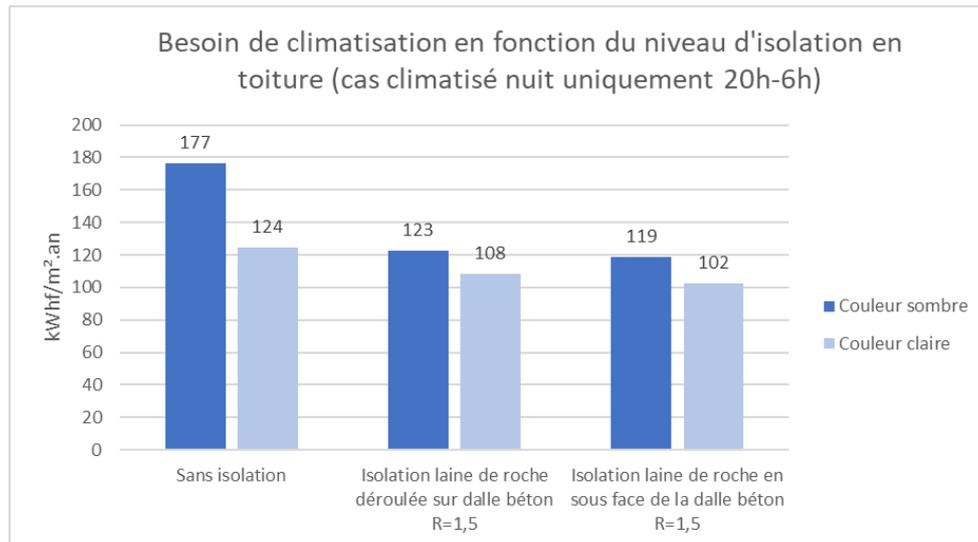
Résultats détaillés en Annexe A.c

En mode climatisé (jour + nuit)



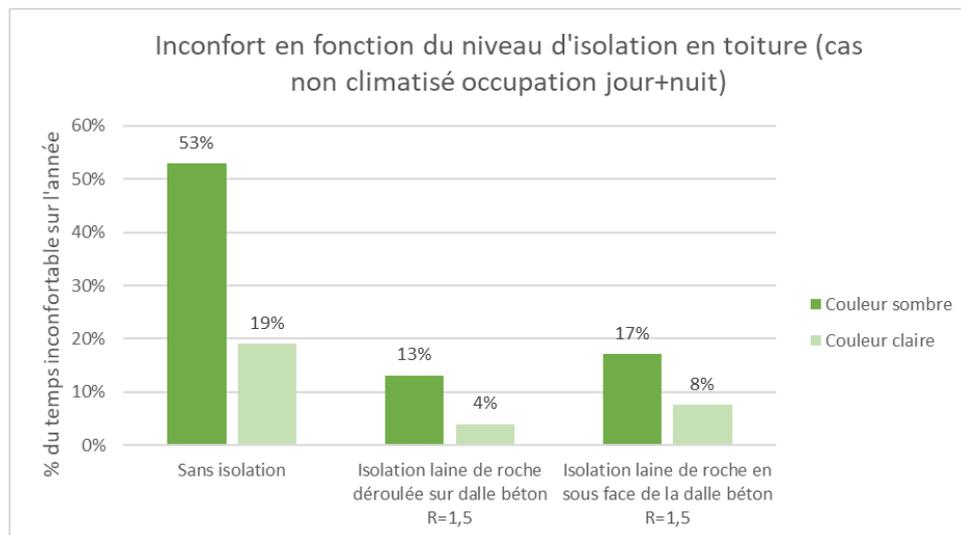
- L'isolation de toiture sur dalle avec un $R=1,5$ permet une réduction du besoin de froid de 36% avec une toiture sombre et de 20% avec une toiture claire.
- En mode climatisé jour + nuit, avec un même niveau d'isolation, la position de l'isolant en sous-face par rapport à une isolation extérieure a une influence très faible (1%).

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)



- L'isolation de toiture sur dalle avec un R=1,5 permet une réduction du besoin de froid de 30% avec une toiture sombre et de 13% avec une toiture claire.
- En mode climatisé uniquement la nuit, avec un même niveau d'isolation, la position de l'isolant en sous-face par rapport à une isolation extérieure est légèrement plus efficace et permet de gagner 2 à 5% supplémentaire selon la couleur.

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)



- L'isolation de toiture sur dalle avec un R=1,5 permet une réduction de l'inconfort de 75% avec une toiture sombre et de 79% avec une toiture claire.
- Il est intéressant de noter qu'avec un même niveau d'isolation, en valeur absolue, on atteint un niveau d'inconfort plus faible avec une toiture tôle + dalle anticyclonique qu'avec une toiture tôle avec combles perdus et faux plafond. En effet, l'inertie du béton permet d'absorber une partie des apports de chaleurs en journée.

→ La position de l'isolant en sous-face par rapport à une isolation extérieure est beaucoup moins efficace car elle coupe l'inertie de la dalle béton. Dans ce cas, on retrouve d'ailleurs en valeur absolue un niveau d'inconfort similaire à celui pour une toiture tôle avec combles perdus et faux plafond.

Conclusions sur l'isolation thermique en toiture :

Types de toiture	Gains relatifs avec isolation R=1,5 (%)		
	Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
Toiture tôle + combles perdus + faux plafond	22 à 39%	3 à 21%	54 à 59%
Toiture tôle + combles perdus + dalle anticyclonique	20 à 36%	13 à 33%	60 à 75%
Toiture terrasse béton	27 à 44%	9 à 28%	76 à 85%
TOUT TYPE	20 à 44%	3 à 33%	54 à 85%

- Une faible isolation (R=1,5) permet de faire des gains importants sur les besoins de climatisation ou le confort pour tout type de toiture.
- Lorsque la toiture est de couleur claire, le gain sur le besoin de climatisation est largement réduit et peut être faible pour certains cas comme une toiture tôle + faux plafond en mode climatisé uniquement la nuit. Cela montre l'importance de valoriser les toitures claires lors du remplacement des toitures. Pour rappel, dans le précédent rapport sur les facteurs d'influence nous avons mis en évidence des gains de l'ordre de 30% sur les besoins de climatisation et de 50% sur le confort en choisissant une toiture claire par rapport à une toiture sombre.
- Une isolation renforcée (R=3) permet surtout d'améliorer le confort en journée.
- Même si en mode climatisé le gain d'une isolation renforcée (R=3) par rapport à une faible isolation (R=1,5) ne paraît pas significatif (< 5%), il est important de garder en tête qu'il n'existe aucun retour d'expérience en climat tropical sur la résistance thermique de l'isolant après plusieurs années mais on peut penser que certains matériaux comme la laine de roche perdent de leur capacité isolante avec les dégradations liées à l'humidité, rongeurs ou autres... C'est pourquoi il serait pertinent de prévoir une marge et d'installer une isolation en toiture avec un R=3 pour assurer une résistance minimale même après plusieurs années. En parallèle, il est nécessaire de lancer une étude sur le vieillissement des isolants en climat tropical.

b) Isolants minces réfléchissants (IMR)

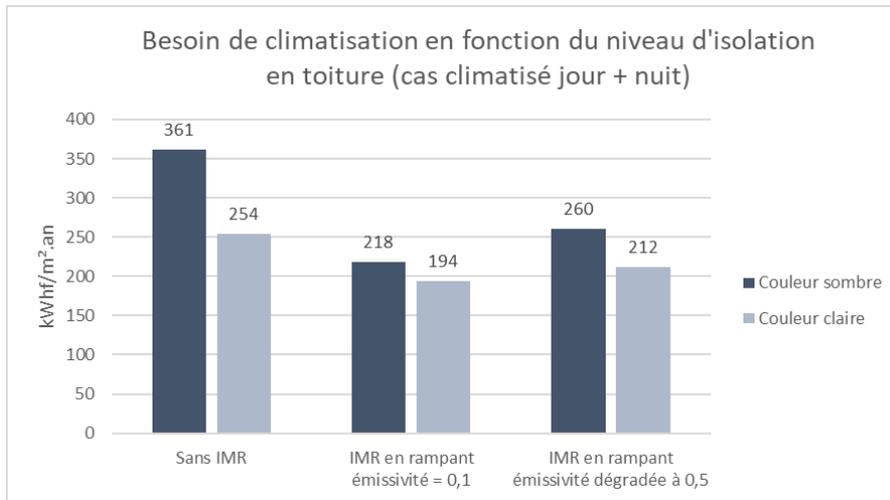
Pour le type de toiture tôle avec combles perdus et faux plafond, nous avons analysé l'impact de la mise en place d'un isolant mince réfléchissant (IMR). Il est important de préciser que les simulations ont été faites en considérant une mise en œuvre de l'IMR dans les règles de l'art, c'est-à-dire avec le produit tendu sous la tôle permettant une lame d'air ventilée de 10 cm entre la tôle et les combles sans échange d'air entre la lame d'air et les combles perdus.



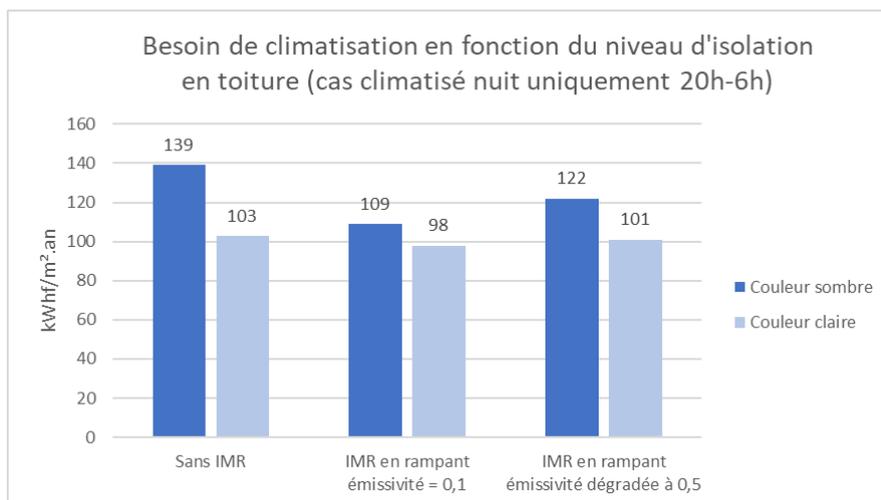
Par ailleurs, il faut savoir que la performance de l'IMR est surtout liée à 2 paramètres :

- la présence de la lame d'air ventilée qui constitue un espace tampon supplémentaire
- la faible émissivité du revêtement de l'IMR qui réduit la transmission par rayonnement vers l'intérieur du logement : l'émissivité de l'IMR testée en laboratoire indiquée par les fournisseurs est généralement inférieure à 0,1 alors qu'un matériau standard a une émissivité de l'ordre de 0,9

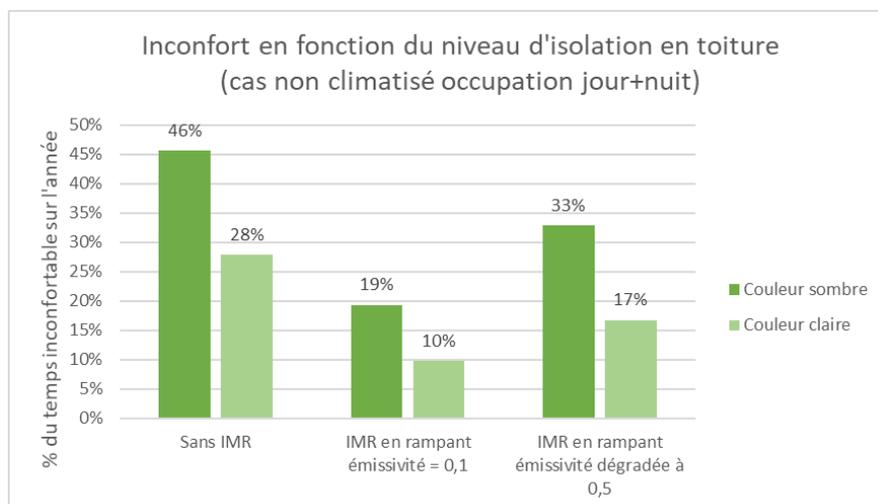
En mode climatisé (jour + nuit)



En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)



En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)



- Que ce soit en mode climatisé ou non climatisé, l'IMR avec une émissivité de 0,1 permet une réduction importante du besoin de climatisation et de l'inconfort (40% du besoin de climatisation et 58% de l'inconfort avec une toiture sombre). Cela correspond à une performance théorique similaire à l'isolation classique. **Cependant, en cas d'absence de lame d'air ventilée, de mauvaise mise en œuvre du produit qui provoquerait des échanges d'air chaud entre la lame d'air et les combles ou d'une dégradation rapide du revêtement peu émissif, les gains seraient fortement réduits.**
- Avec une émissivité dégradée à 0,5 au lieu de 0,1 qui pourrait traduire un vieillissement du revêtement peu émissif, le gain serait réduit de l'ordre de 30 à 50% selon les cas. Les défauts d'étanchéité entre la lame d'air et les combles dégraderaient également les gains mais cela n'a pas pu être simulé.
- Comme pour l'isolation classique, l'installation d'IMR sur une toiture de couleur claire a un faible impact sur les besoins de climatisation lorsque le logement est climatisé uniquement la nuit.

C. Protection des murs

a) Isolation des murs :

L'impact de l'isolation thermique des murs a été analysé pour différents types de murs :

- Murs lourds en parpaing
- Murs légers en bois

Pour chaque cas, l'impact a été calculé avec une couleur du revêtement extérieur existant sombre et claire pour évaluer une fourchette de gains.

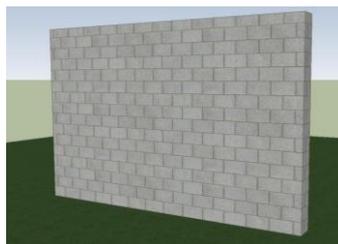
Plusieurs niveaux d'isolation thermique ont été testés ainsi que la position de l'isolant :

- $R=0,5 \text{ m}^2.K/W$ ($\approx 2 \text{ cm}$ de laine de roche)
- $R=1 \text{ m}^2.K/W$ ($\approx 4 \text{ cm}$ de laine de roche)
- $R=1,5 \text{ m}^2.K/W$ ($\approx 6 \text{ cm}$ de laine de roche)



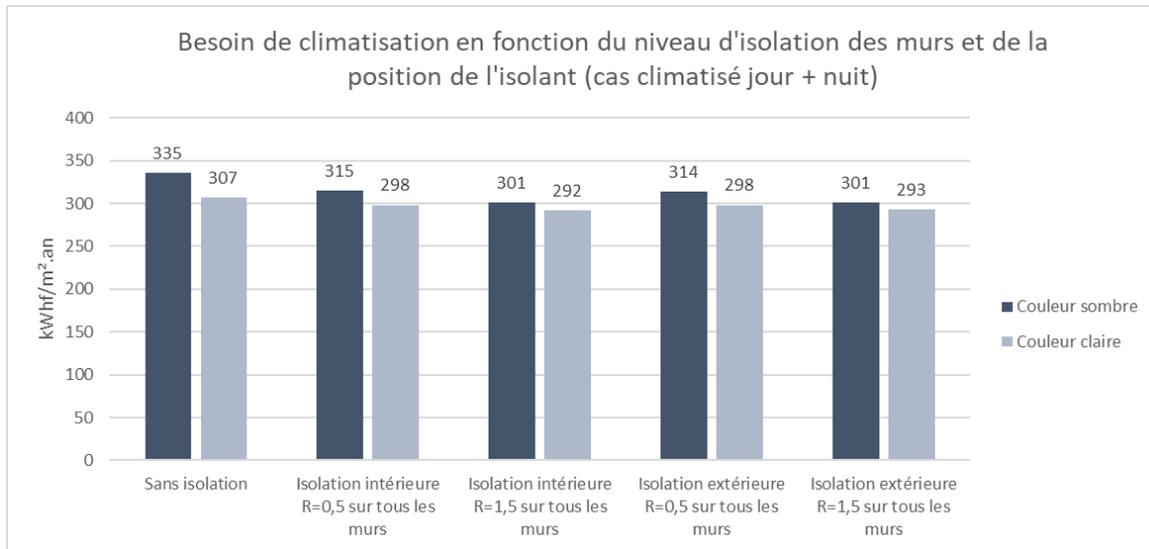
L'impact de l'isolation des murs a été analysé sur le cas de base du logement laboratoire (sans isolation de toiture) afin de poursuivre dans la logique du premier rapport sur les facteurs d'influence. Cependant, nous avons observé que si les travaux d'isolation des murs sont réalisés sur un logement où la toiture est déjà isolée, les conclusions peuvent être différentes. Dans ce cas, nous l'avons précisé en commentaires.

Murs lourds en parpaing



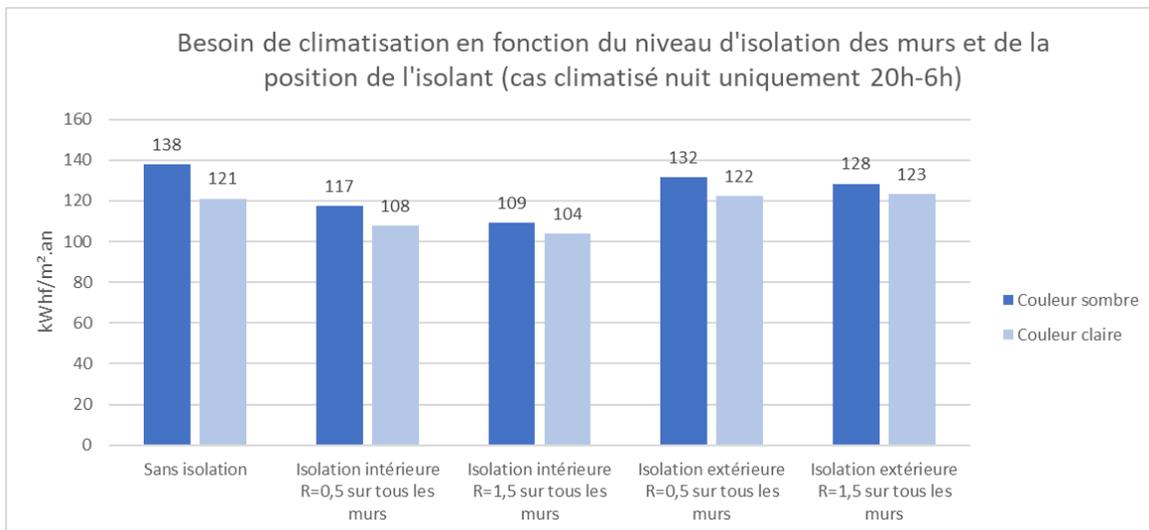
Pour ces simulations, les murs extérieurs sont composés de parpaings de 20cm d'épaisseur avec revêtements extérieur et intérieur, sans plaques de plâtre côté intérieur.

En mode climatisé (jour + nuit)



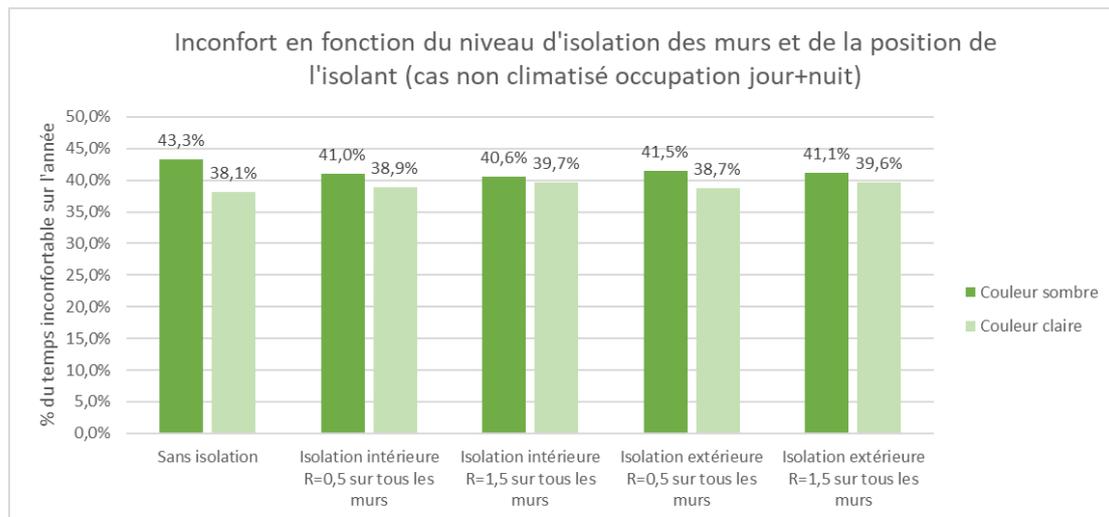
- L'isolation des murs avec un R=1,5 (6cm de laine de roche) permet une réduction du besoin de climatisation de 10% avec une couleur sombre et de 5% avec une couleur claire.
- En mode climatisé jour + nuit, avec un même niveau d'isolation, la position de l'isolant n'a pas d'impact.

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)



- L'isolation des murs avec un R=1,5 permet une réduction du besoin de climatisation de 21% avec une couleur sombre et de 14% avec une couleur claire.
- En mode climatisé uniquement la nuit, **la position de l'isolant est déterminante**. L'isolation par l'intérieur est beaucoup plus efficace que l'isolation par l'extérieur. En effet, cela permet de limiter les apports de chaleur tout en coupant l'inertie du mur en parpaing. Ainsi lorsque le climatiseur est mis en fonctionnement en début de nuit, la température de consigne est atteinte plus rapidement car il n'y a pas à décharger la chaleur des murs.

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)



- En mode non-climatisé, si le logement est régulièrement occupé en journée, il n'y a d'intérêt à isoler que si les murs sont de couleur sombre initialement. Cela permet de réduire de 6% l'inconfort en isolant par l'intérieur un mur sombre et de 5% par l'extérieur. La position de l'isolant n'a pas beaucoup d'impact.
- Un mur sombre isolé n'atteint pas le niveau de performance d'un mur clair non isolé (environ 41% d'inconfort contre 38% en mur clair non isolé). Cela montre encore une fois l'importance de favoriser les couleurs claires. D'ailleurs, avec des murs clairs, l'isolation est contre-productive. Elle augmente légèrement l'inconfort car elle coupe l'inertie la journée dans le cas d'une isolation par l'intérieur et elle limite l'évacuation de la chaleur la nuit dans le cas d'une isolation par l'extérieur.

Conclusion sur l'isolation thermique des murs lourds :

- Avec des murs béton, l'isolation est intéressante uniquement pour les zones climatisées ou si les murs sont de couleur sombre. Dans ces cas, il faut privilégier l'isolation par l'intérieur.
- Les gains évoqués plus haut sont assez élevés en mode climatisé (ex : -21% sur la climatisation pour un mur sombre en mode climatisé uniquement la nuit), mais il faut garder en tête que dans notre modèle « laboratoire », tout le logement est climatisé donc tous les murs de la zone climatisée sont exposés au rayonnement solaire. En réalité dans un logement classique, seules les chambres sont climatisées et elles n'ont qu'une ou deux façades exposées, donc le gain sera probablement plus faible (les simulations sur les logements types seront effectuées dans le lot 2)
- Un mur clair non isolé est plus performant qu'un mur sombre isolé en mode non climatisé.
- Par ailleurs nous avons fait des simulations complémentaires qui montrent que dans le cas où le logement possède une toiture isolée, en mode climatisé le jour et la nuit, les gains sur les besoins de climatisation liés à l'isolation des murs bétons seront plus importants (de l'ordre du double). Pour les autres modes d'occupation, les conclusions ne changent pas significativement si ce n'est qu'en mode non climatisé, l'isolation par l'extérieur est significativement plus efficace que par l'intérieur.

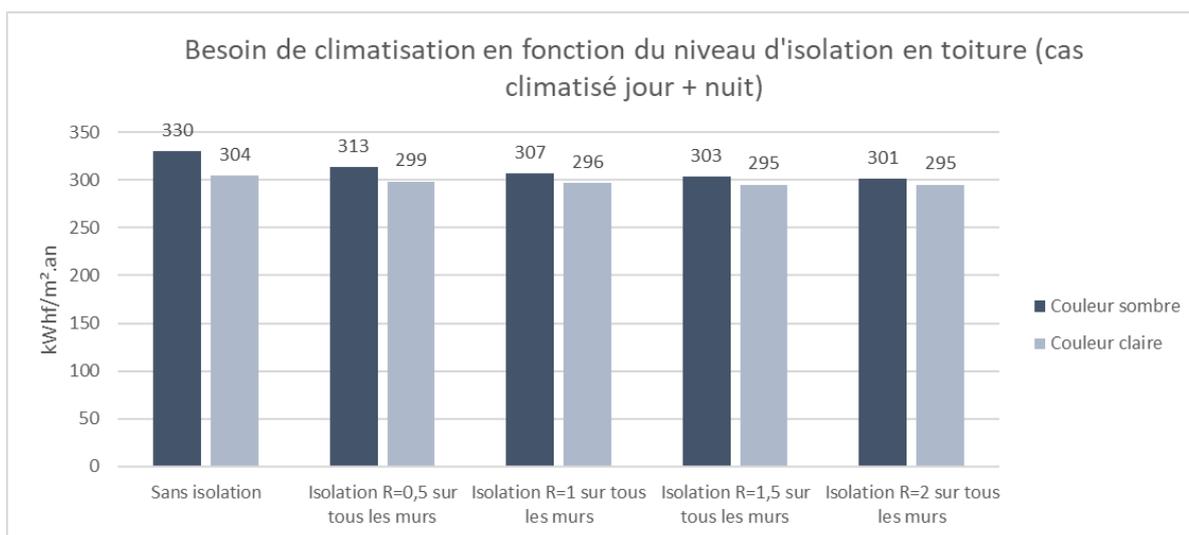
Murs légers en bois



Pour ces simulations, les murs extérieurs sont composés d'un bardage bois sur la partie extérieure de 2cm d'épaisseur, d'une lame d'air de 10 cm et d'une plaque de plâtre de 13mm côté intérieur. Sans isolation, la plaque de plâtre permet déjà de limiter un peu la température de rayonnement dans le logement en journée lorsque les apports solaires sont importants mais elle limite également le rafraîchissement nocturne. Nous avons étudié ci-après l'impact de la mise en place d'isolant dans la lame d'air. Les conclusions qui sont données ici ne seraient pas significativement différentes si dans le cas de base les murs en bois ne disposaient pas d'une plaque de plâtre. Les impacts seraient juste légèrement supérieurs.

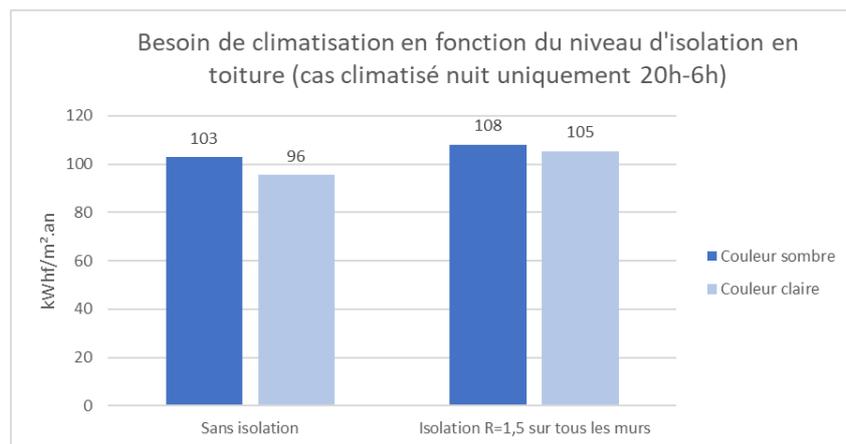
Résultats détaillés en Annexe B.b

En mode climatisé (jour + nuit)



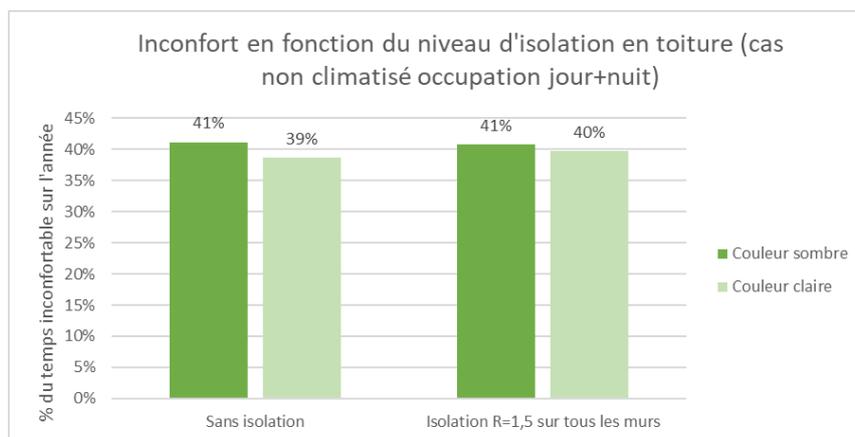
- L'isolation des murs bois avec un R=1,5 (6cm de laine de roche) permet une réduction du besoin de climatisation de 8% avec une couleur sombre et de 3% avec une couleur claire.
- Un mur sombre isolé atteint tout juste le niveau de performance d'un mur clair non isolé (303 kWhf/m².an contre 304 kWhf/m².an en mur clair non isolé). Cela montre l'importance de favoriser les couleurs claires.
- Dans le cas où le logement possède une toiture isolée, les gains liés à l'isolation des murs seront 2 à 3 fois supérieurs selon la couleur des murs d'après nos simulations.

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)



- En mode climatisé uniquement la nuit, l'isolation des murs bois a un effet défavorable car cela augmente le besoin de climatisation de 5% avec une couleur sombre et de 10% avec une couleur claire. Cela s'explique par le fait que cela réduit fortement le rafraîchissement nocturne par les murs, ce qui n'est pas compensé par la réduction des apports solaires en journée.
- Dans le cas où le logement possède une toiture isolée, l'impact négatif est réduit. L'isolation permet un gain de 2% pour des murs sombres mais cela reste défavorable pour des murs clairs (+6%).

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)

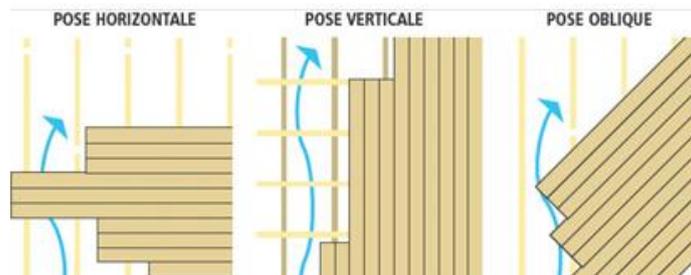


- En mode non-climatisé, l'isolation n'a pas d'impact significatif sur le confort. Cela permet de réduire très faiblement l'inconfort de 1% pour un mur sombre et c'est légèrement défavorable pour un mur clair (+3%). Cela s'explique par le fait que dans le cas où la toiture n'est pas isolée la température en journée dans le logement est déjà très élevée, et l'isolation des murs n'est pas suffisante pour abaisser la température en dessous des 30°C qui est la valeur seuil de notre indicateur de confort. Par ailleurs, cela réduit fortement le rafraîchissement nocturne par les murs la nuit.
- Dans le cas où le logement possède une toiture isolée, les conclusions sont totalement différentes. L'isolation permet de réduire de 21% l'inconfort avec un mur sombre et de 9% avec un mur clair. En effet, les températures dans le logement étant moins extrêmes, les quelques degrés qui sont gagnés grâce à l'isolation ont plus d'impact. Cela montre l'importance d'isoler avant tout la toiture.

Conclusion sur l'isolation thermique des murs légers :

- Les conclusions sur l'isolation des murs en bois sont différentes selon la présence ou l'absence d'isolation thermique en toiture.
- En l'absence d'isolation de toiture :
 - Le gain lié à l'isolation des murs est limité au cas où le logement est climatisé le jour et nuit. Dans ce cas on peut attendre jusqu'à -8% sur le besoin de climatisation avec un mur sombre.
 - Si le logement est climatisé uniquement la nuit, il est défavorable d'isoler les murs. Cela réduit fortement le rafraîchissement nocturne par les murs, ce qui n'est pas compensé par la réduction des apports solaires en journée.
 - En mode non climatisé, cela ne permet pas de gains significatifs pour les mêmes raisons qu'au dernier point.
- Avec une toiture isolée :
 - Lorsque le logement est climatisé jour et nuit, le gain énergétique lié à l'isolation des murs est 2 à 3 fois supérieur qu'avec une toiture non isolée.
 - Les gains sur le confort en mode non climatisé sont de l'ordre de 21% avec un mur sombre et 9% avec un mur clair.
 - En mode climatisé uniquement la nuit, le gain énergétique est nul mais le gain en confort peut amener à moins utiliser le climatiseur.

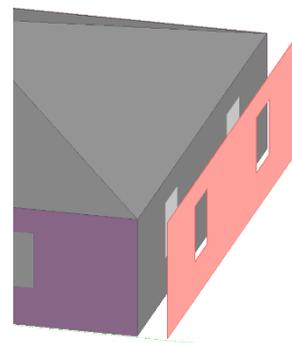
b) Bardage ventilé :



L'impact de la mise en place d'un bardage ventilé sur un mur en parpaing a été analysé. Pour cette action, le niveau de ventilation de la lame d'air située entre le bardage et le mur est déterminant.

Il existe un module de base dans Designbuilder qui permet de modéliser un bardage ventilé. Pour autant, il semble que le modèle soit un peu conservateur sur l'échange convectif qui a lieu sur la face extérieure du mur béton (dans la lame d'air ventilée) car l'algorithme de calcul convectif utilisé est basé sur un modèle de cavité avec de faibles vitesses d'air. Ce qui n'est pas le cas avec une forte ventilation de la lame d'air.

Une autre façon de modéliser le bardage ventilé et de créer un masque proche sur toute la surface extérieure du mur écarté de quelques centimètres par rapport au mur (voir schéma à droite). Cette méthode permet de modéliser le cas idéal avec une ventilation parfaite de la lame d'air, cependant elle a le défaut de ne considérer qu'il n'y a aucune accumulation de chaleur dans la lame d'air et que la couleur du bardage n'a aucun impact, ce qui intuitivement ne paraît pas réaliste. Par ailleurs, l'effet convectif au niveau du mur est considéré comme étant identique à une paroi sans bardage, ce qui n'est pas non plus réaliste.



Il est difficile de dire lequel de ces deux modèles se rapproche le plus de la réalité sans des mesures sur le terrain. Nous avons donc choisi de présenter les résultats moyens entre les deux modèles. Les résultats de chaque modèle sont disponibles en Annexe B.c.

L'impact de la mise en place d'un bardage ventilé a été analysé sur le cas de base du logement laboratoire (sans isolation de toiture) afin de poursuivre dans la logique du premier rapport sur les facteurs d'influence. Cependant, nous avons observé que si les travaux d'isolation des murs sont réalisés sur un logement où la toiture est déjà isolée, les conclusions peuvent être différentes. Dans ce cas, nous l'avons précisé en commentaires.

En mode climatisé (jour + nuit)

	Mode climatisé (jour + nuit) - Gains sur les besoins de climatisation en fonction de la couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé (même couleur que le mur existant)	-8,9%	-6,6%	-4,1%

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)

	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h) - Gains sur les besoins de climatisation en fonction de la couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé (même couleur que le mur existant)	-11,9%	-8,9%	-5,4%

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)

	Mode non climatisé - Réduction de l'inconfort en fonction de la couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé (même couleur que le mur existant)	-11,6%	-8,1%	-4,4%

Conclusion sur le bardage ventilé :

- Quel que soit le modèle utilisé, un mur avec un bardage ventilé sombre n'atteint pas le niveau de performance d'un mur clair sans bardage. Cela montre l'importance de favoriser les couleurs claires avant de proposer des actions de protection des murs.
- En mode climatisé jour + nuit, le gain sur le besoin de climatisation est similaire à la mise en place d'isolation thermique (4 à 9% selon la couleur).
- En mode climatisé uniquement la nuit, le bardage ventilé est 2 à 3 fois moins efficace que l'isolation par l'intérieur. Il permet tout de même de réduire de 5 à 12% le besoin de climatisation selon la couleur.
- En mode non climatisé, le bardage ventilé est plus efficace que l'isolation pour les murs sombres (12%). Pour les murs clairs, le gain est limité à 4%.
- La mise en place d'un bardage d'une couleur plus foncée que la couleur du mur existant ne permet pas de faire des gains et peut même être défavorable (voir Annexe B.c)
- Dans le cas où le logement possède une toiture isolée, les gains liés à la mise en place d'un bardage ventilé seront plus importants (de l'ordre du double en mode climatisé et de 4 à 5 fois plus en mode non climatisé).

c) Protection des murs par orientation :

Les résultats présentés aux chapitres précédents sont valables pour l'isolation de tous les murs extérieurs (Nord, Est, Sud et Ouest). Nous avons également simulé l'isolation d'un seul mur pour évaluer l'impact lié à l'orientation.

Dans le cas avec des murs bois de couleur sombre (sans isolation de toiture) et en mode climatisé le jour et la nuit, les résultats sont les suivants :

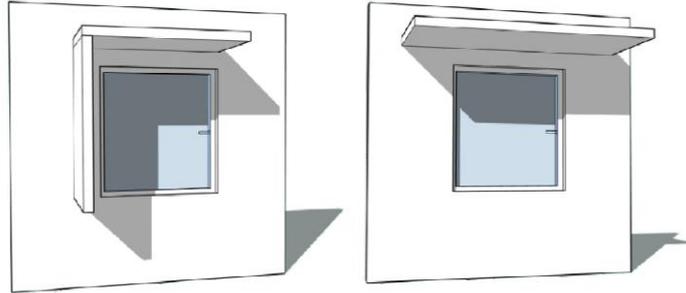
	Variantes	Mode climatisé (jour + nuit)	
		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	330	0%
	Avec isolation mur Sud	323	- 2,1%
	Avec isolation mur Ouest	322	- 2,5%
	Avec isolation mur Est	323	- 2,3%
	Avec isolation mur Nord	327	- 1,0%
	Avec isolation tous les murs	303	- 8,2%

- L'impact lié à l'isolation du mur Sud, Ouest ou Est est relativement similaire (entre 2 et 2,5% de gain).
- En revanche l'isolation du mur Nord a 2 fois moins d'impact.
- Les gains sur le confort n'ont pas été simulés car dans le cas sans isolation de toiture nous avons montré précédemment que le gain lié à l'isolation des murs n'était pas significatif. Avec une toiture isolée les résultats montrent que l'isolation du mur Nord ne fait gagner que 0,5% sur le confort, ce qui est 10 fois moins efficace que l'isolation des murs Sud, Ouest ou Est qui fait gagner environ 5% (voir Annexe B.d).

Ces résultats montrent que dans un objectif d'optimisation des coûts des travaux et d'utilisation des ressources, l'isolation du mur Nord n'est pas une priorité notamment en mode non climatisé.

D. Protections solaires :

a) Protection architecturale des fenêtres



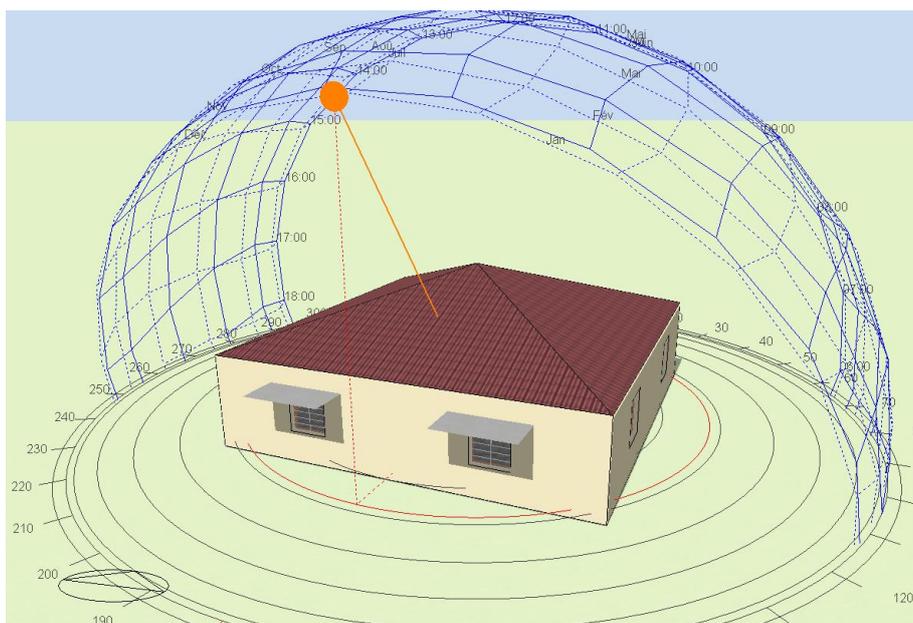
Nous étudions ici uniquement les protections qui ont un impact sur les **apports solaires par les fenêtres**. Les protections solaires horizontales permettant de combiner la protection des fenêtres et des murs (ex : prolongement de toiture) n'est pas étudiée dans ce chapitre mais dans le chapitre suivant (D.b).

Trois types de protections solaires des fenêtres ont été analysés : les protections horizontales (casquettes), les protections latérales (jous) et les protections verticales (brise-soleils).

Dimensionnement des protections :

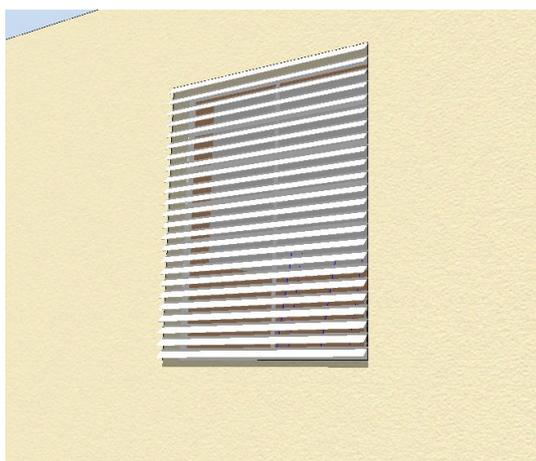
Pour les protections horizontales et latérales, un travail de dimensionnement a été réalisé pour déterminer les protections adaptées à notre logement laboratoire et à la taille des ouvertures définies dans le logement de base (ouvrants standards : 1,2m de hauteur et 1m de largeur). L'ensemble des résultats est présenté en Annexe C.a.

Il ressort de cette analyse qu'une casquette de 1m avec un débord latéral de 0,5m est la protection la plus efficace et la plus facile à mettre en œuvre pour toutes les orientations (en dehors des protections verticales). Elle permet notamment au Sud de supprimer le rayonnement direct aux heures les plus chaudes à la période de l'année où le soleil est le plus bas (21 décembre, voir Héliodon ci-dessous). Notre analyse montre qu'il est préférable d'ajouter un débord latéral de 0,5m que de prolonger la longueur de la casquette. Par ailleurs, la mise en place de joues latérales ne permet pas d'améliorer sensiblement l'efficacité de la protection et il s'agit d'une solution difficile à mettre en œuvre en rénovation.



Héliodon 21/12 à 12h : au Sud, casquette d'1m suffit pour supprimer les apports directs ($H_{fen\grave{e}tre} = 1,2m$)

Pour les protections verticales, nous avons choisi de simuler des brise-soleils orientables (BSO) qui sont particulièrement adaptés pour les orientations Est et Ouest car ils permettent de se protéger du soleil rasant tout en permettant la ventilation naturelle. Les BSO sont constitués de 24 lames espacées de 5cm qui permettent de supprimer totalement le rayonnement direct. Ce type de protection peut être déployée ou relevée par l'occupant selon l'ensoleillement au cours de la journée mais pour cette analyse les BSO sont supposés entièrement déployés tout au long de la journée et les lames orientées à 45° pour simuler une utilisation optimale.



BSO depuis l'extérieur



BSO depuis l'intérieur

Résultats :

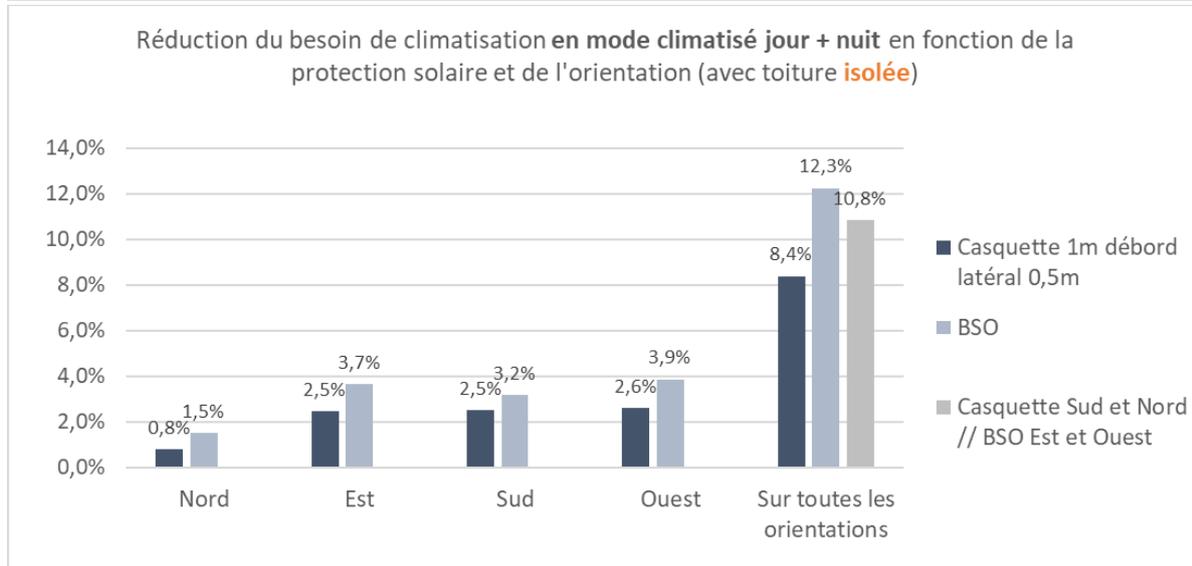
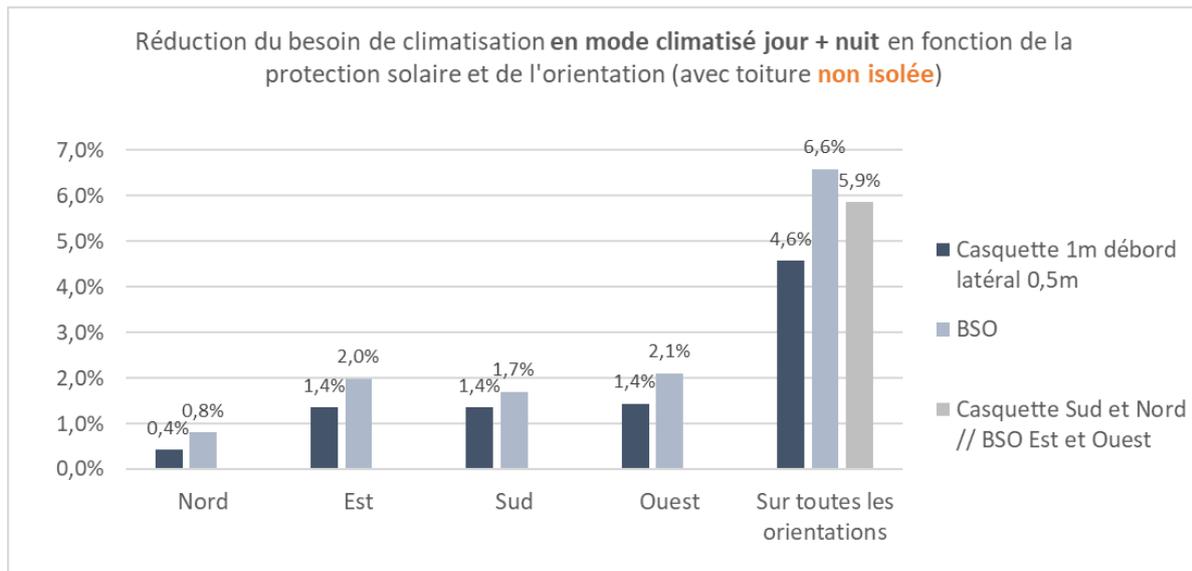
Suite au dimensionnement, les protections retenues ont été simulés en mode climatisé et non climatisé sur le logement laboratoire qui possède 10% de vitrage. Nous avons réalisé les simulations avec et sans toiture isolée car suite à l'analyse sur la protection des murs nous avons remarqué que les résultats pouvaient changer sensiblement selon les cas.

Trois solutions de protections solaires ont été analysées :

- Casquette de 1m de longueur avec un débord latéral de 0,5m sur chaque orientation et sur l'ensemble des orientations
- Brise-soleil orientable (BSO) sur chaque orientation et sur l'ensemble des orientations
- Solution combinée de casquettes de 1m de longueur avec un débord latéral de 0,5m au Sud et au Nord, et de BSO à l'Est et à l'Ouest. En effet les BSO ont l'inconvénient de réduire le passage de l'air et donc l'efficacité de la ventilation naturelle, ainsi que la lumière naturelle à l'intérieur du logement. Nous proposons donc une solution combinée qui permet d'avoir un bon compromis entre protection solaire, ventilation et éclairage naturel.

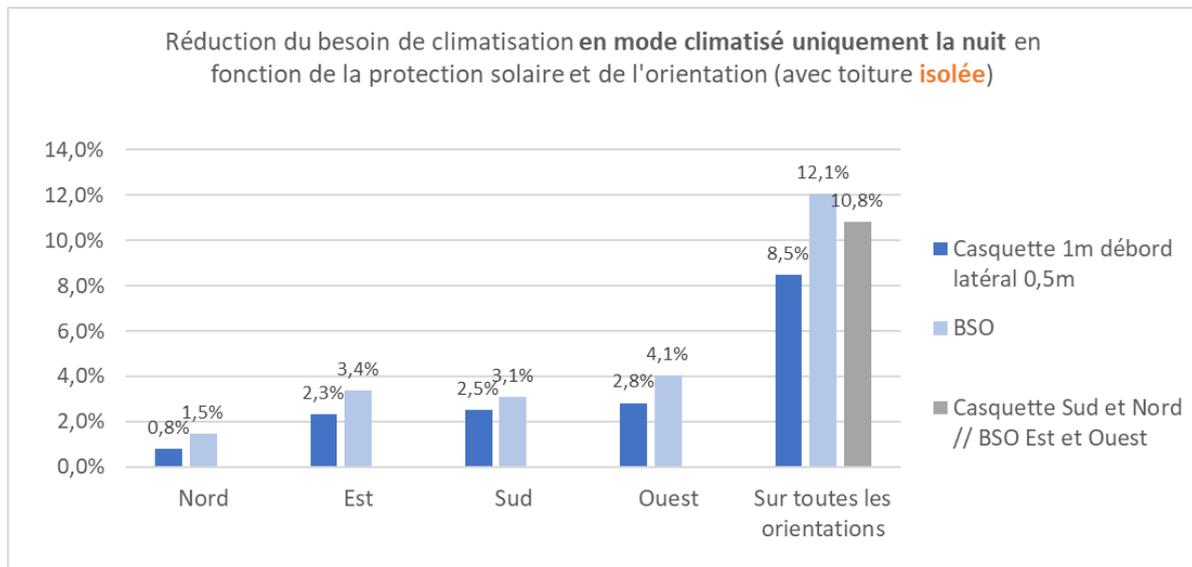
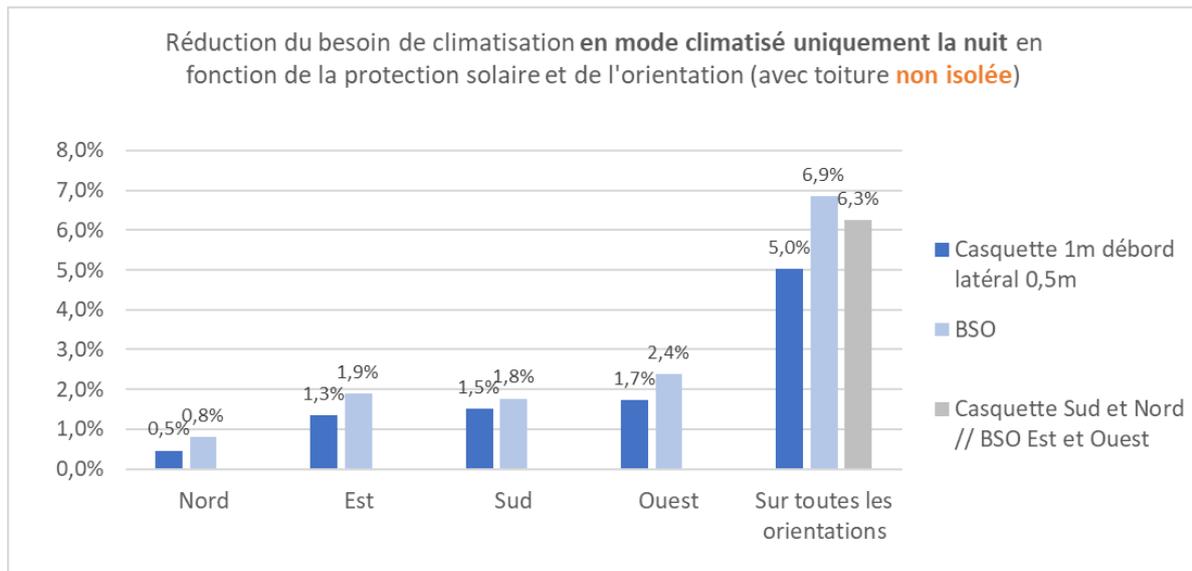
Résultats détaillés en Annexe C.b

En mode climatisé (jour + nuit)



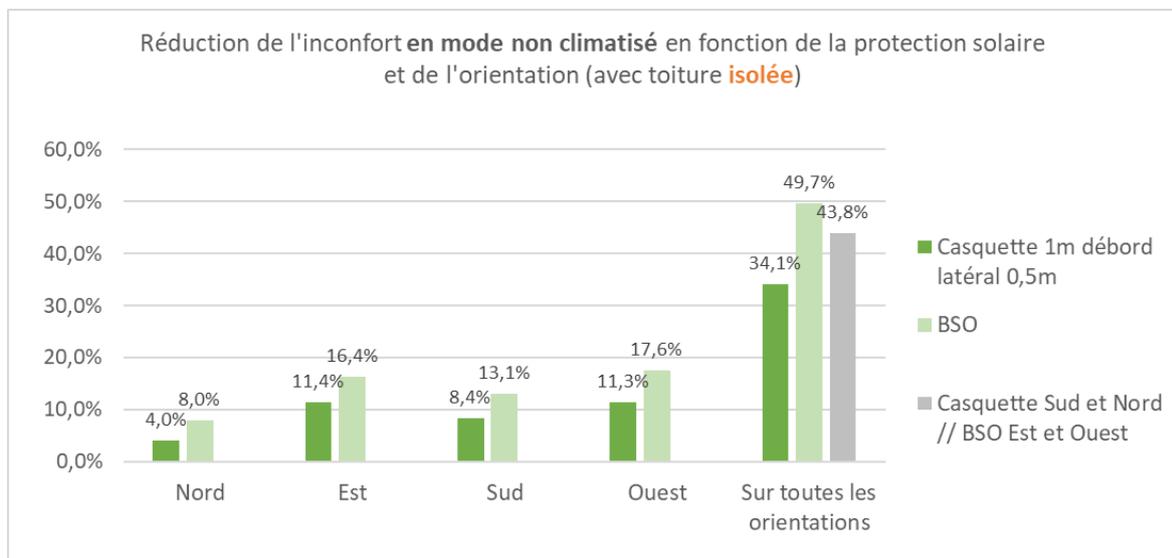
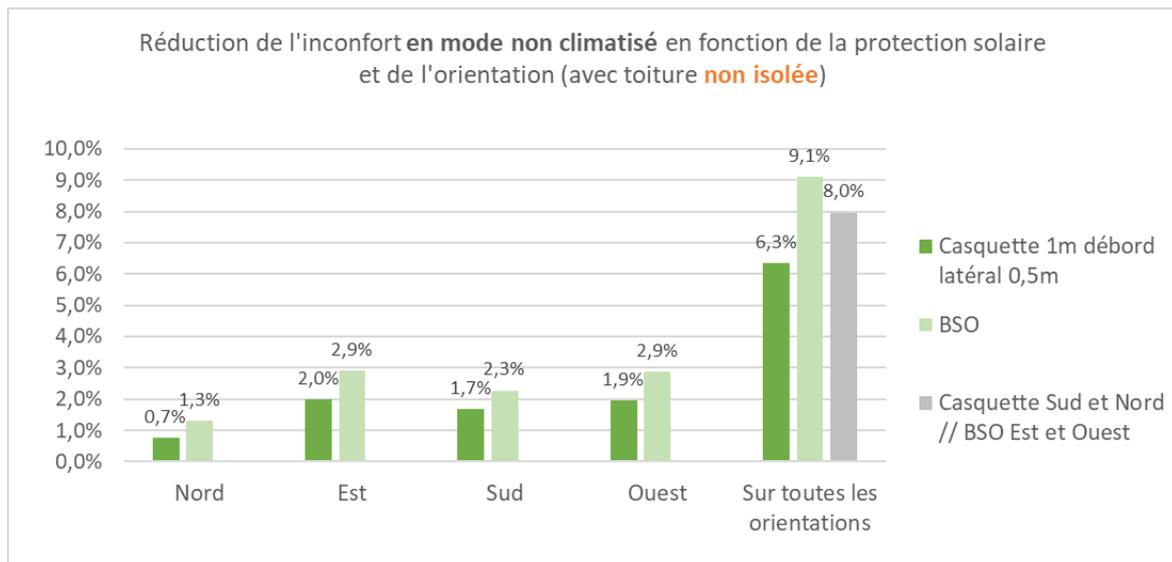
- En mode climatisé jour + nuit, la solution combinée (en gris sur le graphique précédent) permet de **réduire de 6% les besoins de froid en l'absence d'isolation de toiture**. Avec une toiture isolée l'impact est plus important car l'isolation augmente l'effet de surchauffe lié aux apports solaires et donc le traitement de ces mêmes apports solaires permet une réduction du besoin de froid plus importante : réduction de 11% soit 2 fois plus en relatif qu'avec une toiture non isolée (6% sans isolation). En valeur absolue, avec une toiture isolée la mise en place de la protection solaire permet 4kWh/m².an de gains supplémentaires que sans isolation de toiture (voir graphique des gains sur les besoins de froid en Annexe C.c).
- La mise en place d'une protection solaire uniquement sur la façade Nord permet des gains 3 fois plus faibles en relatif que sur les autres orientations.
- La protection des fenêtres des façades Est ou Ouest permet des gains aussi importants que sur la façade Sud (avec une même casquette). Les BSO sont légèrement plus efficaces sur les façades Est et Ouest qu'au Sud.

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)



- En mode climatisé uniquement la nuit, les résultats sont très similaires au mode climatisé jour + nuit. La solution combinée (en gris sur le graphique précédent) permet de **réduire de 6% les besoins de froid en l'absence d'isolation de toiture et 11% avec une toiture isolée.**
- La protection des fenêtres de la façade Ouest est légèrement plus efficace que pour la façade Est car elle permet de protéger davantage des apports solaires qui pénètrent dans le logement juste avant la période de climatisation (fin de journée à l'Ouest).

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)



- En mode non climatisé, la solution combinée (en gris sur le graphique précédent) permet de **réduire de 8% l'inconfort en l'absence d'isolation de toiture**. Avec une toiture isolée l'impact est plus important car l'isolation augmente l'effet de surchauffe lié aux apports solaires et donc le traitement de ces mêmes apports solaires permet une réduction de l'inconfort plus importante : réduction de 44% soit 5 fois plus en relatif qu'avec une toiture non isolée. C'est également lié à l'effet de seuil du choix de l'indicateur de confort à 30°C : l'isolation de toiture associée aux protections solaires permet d'atteindre le confort à beaucoup plus de pas horaires.
- La mise en place d'une protection solaire uniquement sur la façade Nord permet des gains 3 fois plus faibles en relatif que sur les autres orientations.
- La protection des fenêtres des façades Est ou Ouest permet des gains légèrement plus importants que sur la façade Sud (avec une même casquette).

Conclusion sur les protections solaires des fenêtres :

- D'après les résultats sur les 3 modes d'occupation, l'ordre de priorité de mise en place des protections solaires par orientation est le suivant : 1/Ouest, 2/Est et Sud et 3/Nord. Dans le cas où il n'est pas possible de protéger l'ensemble des fenêtres, il faudra privilégier la mise en place d'une protection à l'Ouest plutôt qu'au Nord pour maximiser les gains.
- Avec une toiture isolée les gains en relatif sont 2 fois plus importants qu'avec une toiture non isolée en mode climatisé et 5 fois en mode non climatisé.
- Avec une toiture isolée, la mise en place de protections solaires sur les fenêtres Ouest permet de réduire jusqu'à 4% les besoins de climatisation et de réduire l'inconfort jusqu'à 18%.
- **Avec une toiture isolée, la mise en place de protections solaires sur les fenêtres de toutes les orientations permet de réduire de 8 à 12% les besoins de climatisation et de réduire l'inconfort de 34 à 50% selon les types de protections.**
- **A noter qu'avec une proportion de vitrage plus grande, les gains seront plus importants.** Par exemple avec 20% de vitrage et sans isolation de toiture, le gain lié à la mise en place de BSO sur toutes les orientations serait de 13% sur les besoins de climatisation et de 16% sur le confort (contre respectivement 7 et 9% avec 10% de vitrage).

b) Protection combinée des fenêtres et des murs :



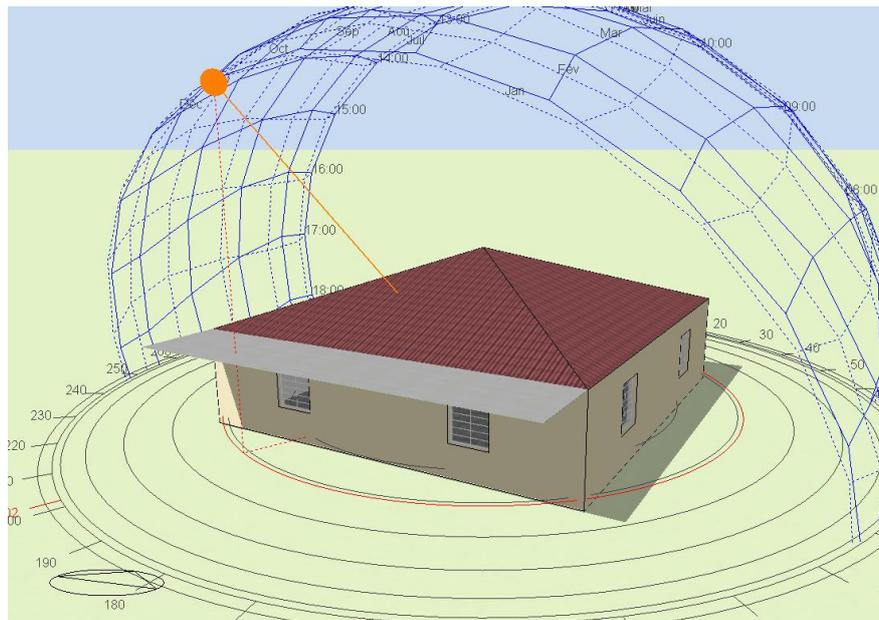
Exemple de casquette de 60cm sur un mur Sud-Est

Nous étudions ici les protections solaires horizontales permettant de combiner la protection des fenêtres et des murs comme la protection présentée sur la photo ci-dessus.

Trois solutions de protections solaires ont été analysées :

- Casquette de 0,5m de longueur positionnée en haut du mur (hauteur 2,5m) sur chaque orientation et sur l'ensemble des orientations
- Casquette de 1m de longueur positionnée en haut du mur (hauteur 2,5m) sur chaque orientation et sur l'ensemble des orientations
- Casquette de 2m de longueur positionnée en haut du mur (hauteur 2,5m) sur chaque orientation et sur l'ensemble des orientations
- Solution combinée de casquettes de 2m de longueur à l'Est et à l'Ouest et de 1m au Sud. En effet les résultats montrent qu'une longueur de 2m au Sud ne permet pas de gagner significativement plus qu'avec 1m et qu'au Nord les gains sont relativement faibles. Nous proposons donc une solution combinée qui permet de limiter l'investissement par rapport aux gains obtenus.

Visualisation de la position des casquettes en haut du mur :

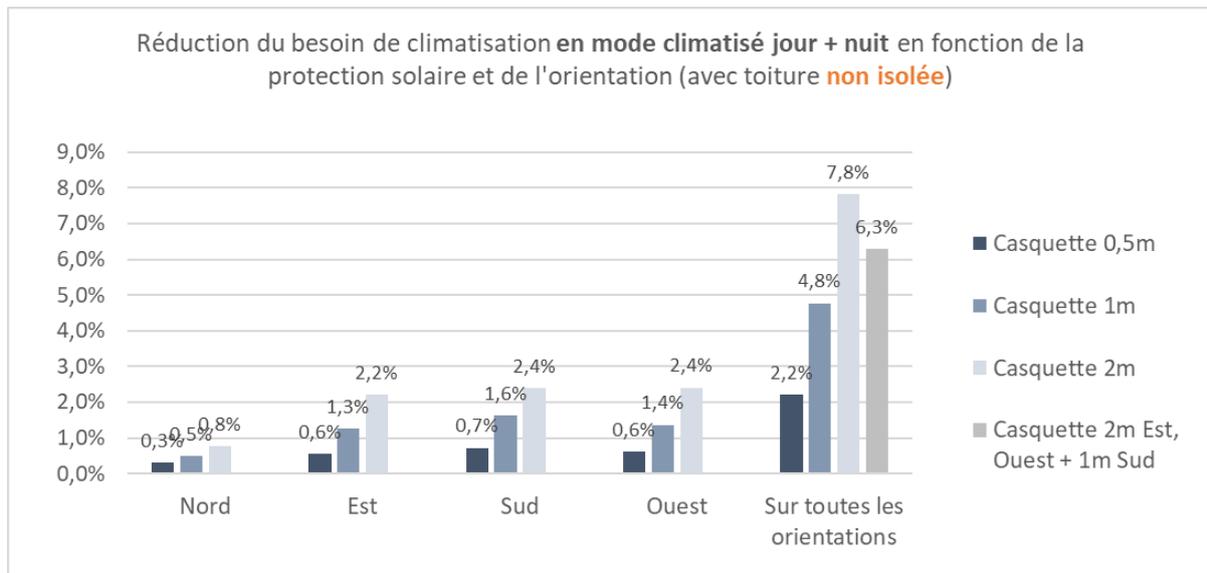


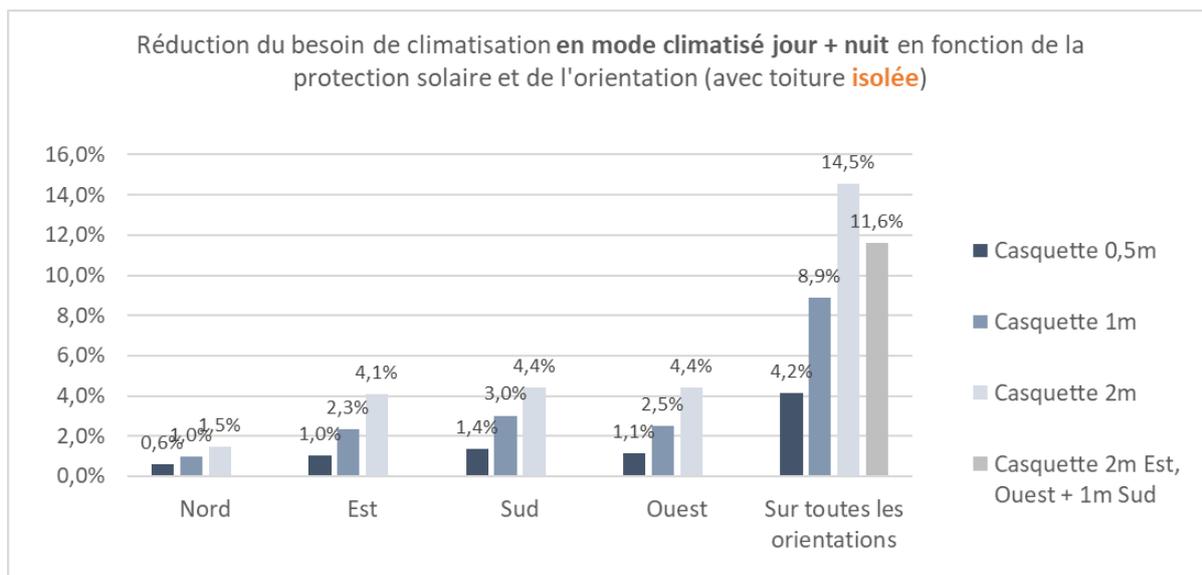
Héliodon 21/12 à 13h : au Sud, casquette de 2m nécessaire pour supprimer les apports directs ($H_{mur} = 2,5m$)

Les protections retenues ont été simulées en mode climatisé et non climatisé sur le logement laboratoire qui possède des murs clairs et 10% de vitrage. Comme pour la partie précédente, nous avons réalisé les simulations avec et sans toiture isolée car suite à l'analyse sur la protection des murs nous avons remarqué que les résultats pouvaient changer sensiblement selon les cas.

Résultats détaillés en Annexe C.d

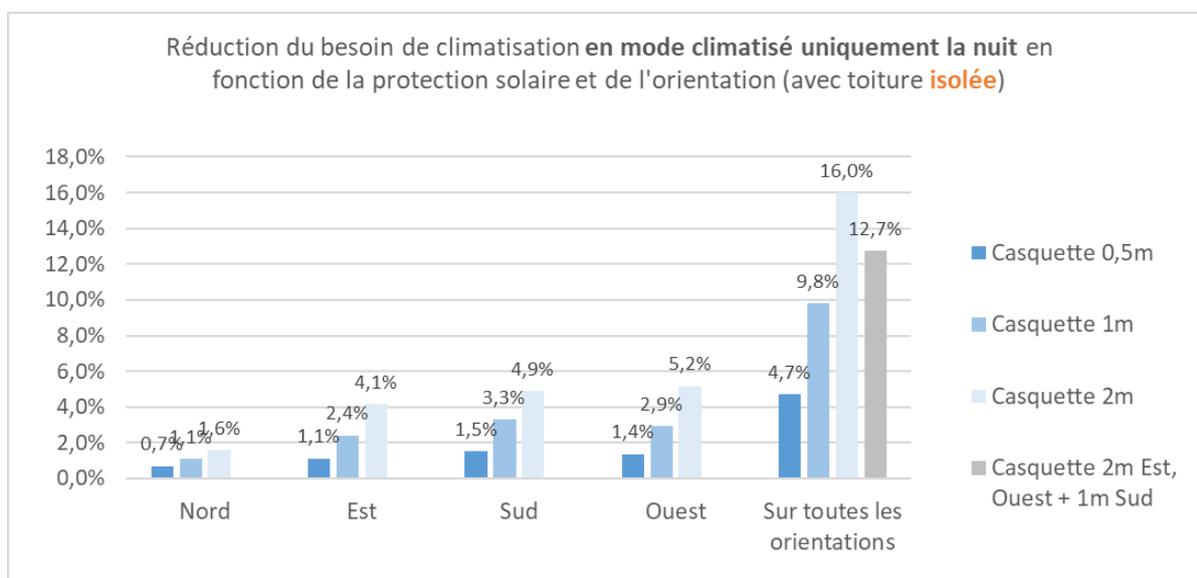
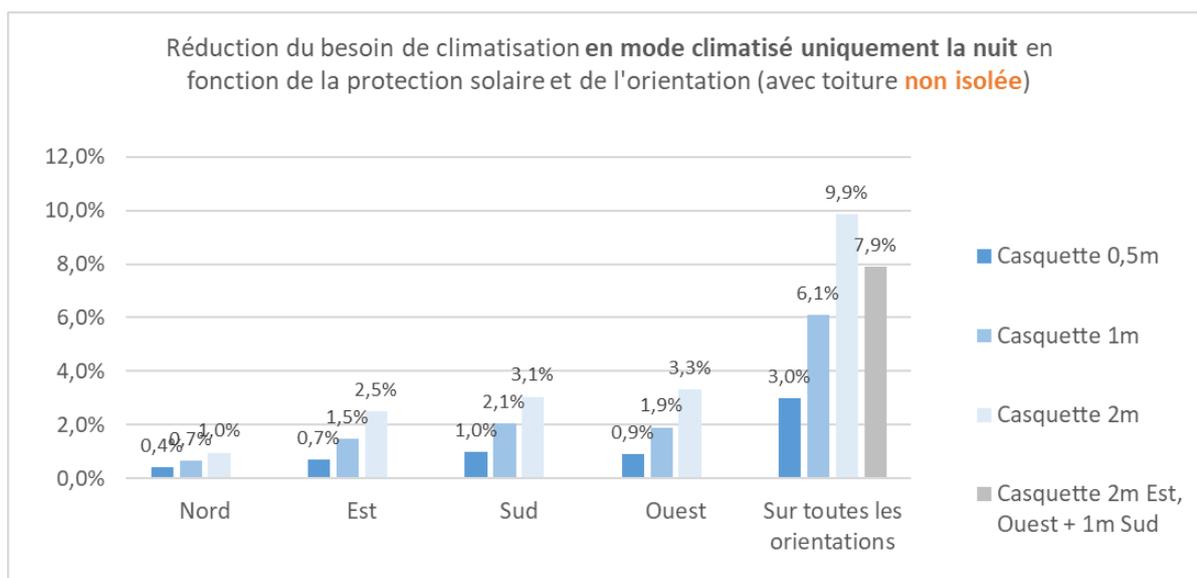
En mode climatisé (jour + nuit)





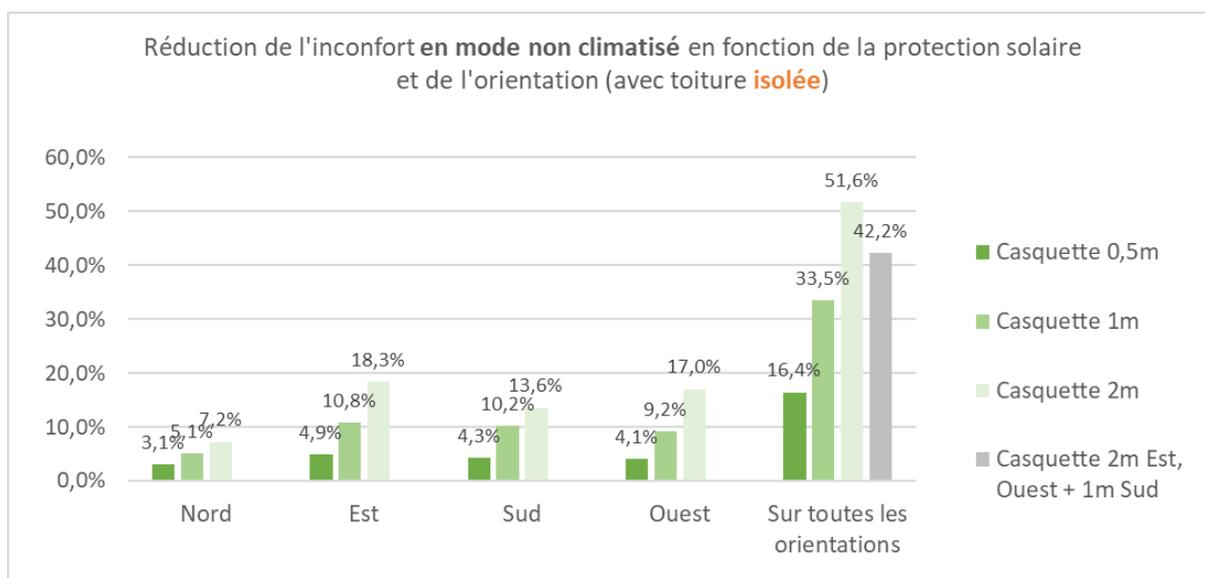
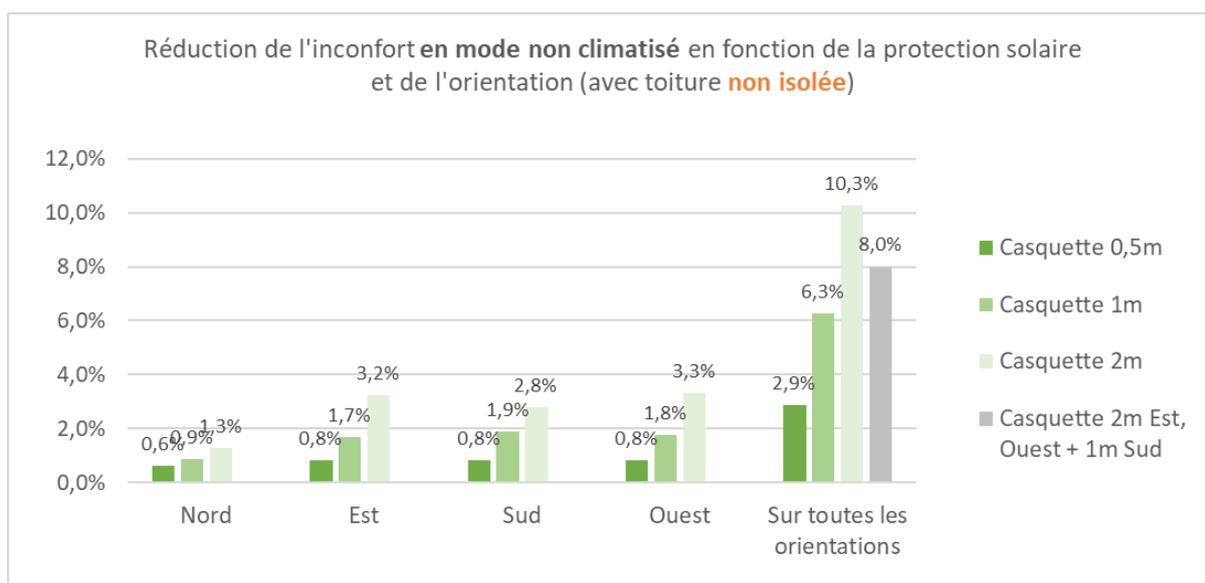
- Les gains sont du même ordre de grandeur que les gains associés à la mise en place de protections uniquement au niveau des fenêtres.
- Toutefois, il est intéressant de noter que pour les orientations Est, Sud et Ouest, **une casquette de 2m en haut de mur sur toute sa longueur** est légèrement plus efficace que la mise en place de brise-soleils orientables (BSO) uniquement sur la fenêtre. Pour un mur Ouest par exemple, la casquette de 2m en haut de mur permet un gain de 2,4% alors qu'avec un BSO le gain est de 2,1%. La fenêtre est moins bien protégée car la casquette est positionnée plus haut par rapport au linteau de la fenêtre mais elle permet de protéger également le mur des apports solaires. Par ailleurs même si la casquette de 2m réduit la lumière naturelle du logement, elle la réduit moins qu'avec un BSO fermé. Cela justifie l'intérêt d'avoir une grande avancée de toiture pour protéger une terrasse sur une façade Est, Sud ou Ouest, notamment en cas de présence d'une grande porte fenêtre vitrée.
- La solution combinée (en gris sur le graphique précédent) permet de **réduire de 6% les besoins de froid en l'absence d'isolation de toiture et 12% avec une toiture isolée**.
- La mise en place d'une protection solaire uniquement sur la façade Nord ne permet pas des gains significatifs par rapport à l'investissement nécessaire.

En mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h)



- En mode climatisé uniquement la nuit, les résultats sont très similaires au mode climatisé jour + nuit. La solution combinée (en gris sur le graphique précédent) permet de **réduire de 8% les besoins de froid en l'absence d'isolation de toiture et 13% avec une toiture isolée**.
- La protection de la façade Ouest est plus efficace que pour la façade Est car elle permet de protéger davantage des apports solaires qui pénètrent dans le logement juste avant la période de climatisation (fin de journée à l'Ouest). Cela justifie l'intérêt d'avoir une terrasse avec une grande avancée de toiture sur une façade Ouest, notamment en cas de présence d'une grande porte fenêtre vitrée.

En mode non-climatisé (occupation jour + nuit)



- Les gains sont du même ordre de grandeur que les gains associés à la mise en place de protections uniquement au niveau des fenêtres.
- Pour les orientations Est, Sud et Ouest, **une casquette de 2m en haut de mur sur toute sa longueur** est aussi efficace que la mise en place de brise-soleils orientables (BSO) uniquement sur la fenêtre.
- La solution combinée (en gris sur le graphique précédent) permet de **réduire de 8% l'inconfort en l'absence d'isolation de toiture et 42% avec une toiture isolée.**
- La mise en place d'une protection solaire uniquement sur la façade Nord ne permet pas des gains significatifs par rapport à l'investissement nécessaire.
- La protection de la façade Est ou Ouest permet des gains légèrement plus importants que sur la façade Sud (avec une même casquette).

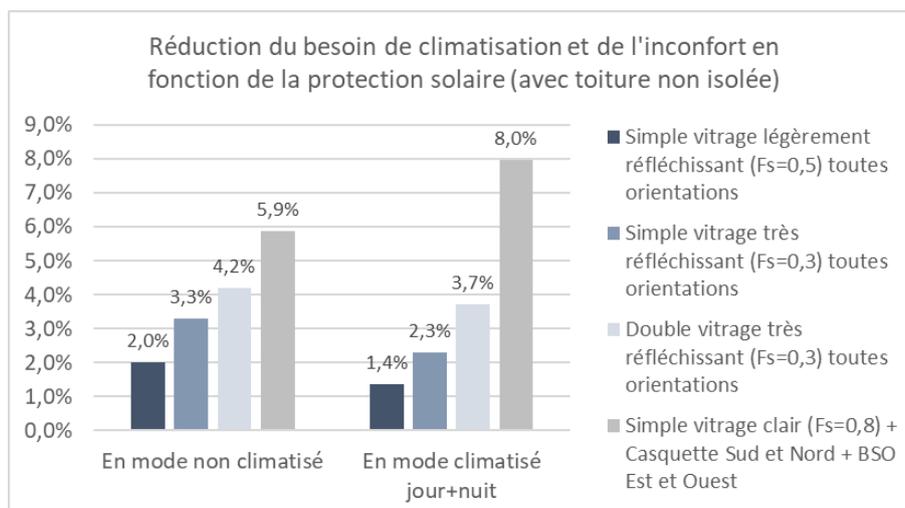
Conclusion sur la protection combinée des fenêtres et des murs :

- D'après les résultats sur les 3 modes d'occupation, l'ordre de priorité de mise en place d'une protection par orientation est le suivant : 1/Ouest, 2/Est et Sud et 3/Nord. Une casquette sur toute la longueur du mur Nord n'a pas grand intérêt, il faudra privilégier la mise en place d'une casquette à l'Ouest.
- Avec une toiture isolée les gains en relatif sont 2 fois plus importants qu'avec une toiture non isolée en mode climatisé et 5 fois en mode non climatisé.
- **Avec une toiture isolée, la mise en place d'une casquette de 2m sur un mur Ouest permet de réduire les besoins de climatisation de 4 à 5% et de réduire l'inconfort de 17%.**
- Avec une toiture isolée, la mise en place d'une solution avec une casquette d'1m au Sud et 2m à l'Est et à l'Ouest permet de réduire de 12% les besoins de climatisation et de réduire l'inconfort de 42%.
- **A noter qu'avec des murs sombres au lieu de clairs et/ou une proportion de vitrage plus grande, les gains seront plus importants.** Par exemple avec des murs sombres au lieu de clairs et sans isolation de toiture, le gain lié à la mise en place de casquettes de 2m sur toutes les orientations serait de 12% sur les besoins de climatisation et de 16% sur le confort (contre respectivement 8 et 10% avec des murs clairs).
- **Nous avons également simulé le cas avec des murs en bois et les conclusions sont assez proches.** En mode climatisé les gains sont identiques et en mode non climatisé les gains sont légèrement plus faibles qu'avec des murs en parpaing. Avec une casquette de 2m sur toutes les orientations, on atteint 9% de gain sur le confort avec des murs sombres en bois contre 16% avec des murs sombre en parpaing.

c) Vitrage à faible facteur solaire :

Le vitrage à faible facteur solaire (« réfléchissant » ou « à contrôle solaire ») n'est pas très développé dans le résidentiel aux Antilles. Ce type de vitrage n'est d'ailleurs pas très adapté à ce secteur en milieu tropical car il réduit fortement la transmission lumineuse et donc l'éclairage naturel bien que certains modèles récents à contrôle solaire possèdent des caractéristiques intéressantes (transmission lumineuse de 60% pour un facteur solaire de 30%). Par ailleurs, un tel vitrage non protégé par une casquette ou un brise-soleil chauffe de manière significative lorsqu'il reçoit du rayonnement direct, ce qui augmente la température de rayonnement à l'intérieur du logement.

Nous avons tout de même étudié l'impact de la mise en place d'un vitrage à faible facteur solaire :



* le vitrage de base possède un facteur solaire de 0,8

→ Que ce soit en mode climatisé ou non climatisé, la mise en place de vitrage à très faible facteur solaire (30%) permet des gains moins importants que la solution combinée de casquettes et BSO que nous avons étudiée au chapitre D.a. Ces résultats associés au coût d'investissement important de cette solution et au fait qu'elle ne soit pas particulièrement adaptée pour notre cible ne nous ont pas motivé à l'étudier davantage.

IV. Annexes

A. Résultats détaillés sur la protection de la toiture

a) Toiture tôle avec faux plafond

Couleur sombre :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Variantes	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0,0%	0%
	Isolation laine de roche déroulée sur faux plafond R=1,5	-38,9%	-20,5%	-53,9%
	Isolation laine de roche déroulée sur faux plafond R=3	-43,6%	-23,9%	-69,4%
	Isolation laine de roche déroulée sur faux plafond R=4,5	-45,4%	Non simulé	-76,8%
	Isolation rampant PSE R=1,5	-38,9%	Non simulé	-55,1%

Couleur claire :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Variantes	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0,0%	0,0%	0
	Isolation laine de roche déroulée sur faux plafond R=1,5	-22,3%	-2,9%	-59,4%
	Isolation laine de roche déroulée sur faux plafond R=3	-25,1%	-3,5%	-70,7%

b) Toiture terrasse béton

Couleur sombre :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Variantes	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0,0%	0%
	Isolation extérieure PSE R=1,5	-44,4%	-28,3%	-76,2%
	Isolation extérieure PSE R=3	-48,5%	-33,0%	-87,6%
	Isolation extérieure PSE R=4,5	-50,1%	Non simulé	-91,7%
	Isolation en sous face intérieure PSE R=1,5	-43,3%	-31,3%	-63,6%

Couleur claire :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Variantes	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0,0%	0%
	Isolation extérieure PSE R=1,5	-27,3%	-8,9%	-85,4%
	Isolation extérieure PSE R=3	-29,6%	-10,9%	-90,2%
	Isolation en sous face intérieure PSE R=1,5	-26,3%	-13%	-64,8%

c) Toiture tôle avec dalle anticyclonique

Couleur sombre :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Variantes	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0,0%	0%
	Isolation laine de roche déroulée sur dalle béton R=1,5	-35,6%	-30,5%	-75,2%
	Isolation laine de roche en sous face de la dalle béton R=1,5	-34,5%	-32,7%	-67,6%

Couleur claire :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Variantes	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0,0%	0%
	Isolation laine de roche déroulée sur dalle béton R=1,5	-20,1%	-12,9%	-79%
	Isolation laine de roche en sous face de la dalle béton R=1,5	-19,5%	-17,6%	-60%

d) IMR

Couleur sombre :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
	Variantes	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans IMR	0%	0,0%	0%
	IMR en rampant émissivité = 0,1	-39,7%	-21,4%	-57,7%
	IMR en rampant émissivité dégradée à 0,5	-27,9%	-12,5%	-28,1%

Couleur claire :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
Variantes		Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans IMR	0%	0,0%	0%
	IMR en rampant émissivité = 0,1	-23,7%	-4,2%	-65,2%
	IMR en rampant émissivité dégradée à 0,5	-16,6%	-1,3%	-40%

B. Résultats détaillés sur la protection des murs

a) Murs lourds bétons

Couleur sombre :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
Variantes		Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0%	0%
	Isolation intérieure R=0,5 sur tous les murs	-6,2%	-14,9%	-5%
	Isolation intérieure R=1 sur tous les murs	-8,8%	non simulé	-6%
	Isolation intérieure R=1,5 sur tous les murs	-10,3%	-20,8%	-6%
	Isolation extérieure R=0,5 sur tous les murs	-6,4%	-4,4%	-4%
	Isolation extérieure R=1 sur tous les murs	-8,8%	non simulé	-5%
	Isolation extérieure R=1,5 sur tous les murs	-10,2%	-6,8%	-5%

Couleur claire :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
Variantes		Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0%	0%
	Isolation intérieure R=0,5 sur tous les murs	-2,7%	-11,1%	1,9%
	Isolation intérieure R=1 sur tous les murs	-4,0%	non simulé	3,3%
	Isolation intérieure R=1,5 sur tous les murs	-4,7%	-14,2%	4,1%
	Isolation extérieure R=0,5 sur tous les murs	-2,8%	0,9%	1,6%
	Isolation extérieure R=1 sur tous les murs	-3,8%	non simulé	2,9%
	Isolation extérieure R=1,5 sur tous les murs	-4,5%	1,8%	3,9%

b) Murs légers bois

Couleur sombre :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
Variantes		Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0%	0%
	Isolation R=0,5 sur tous les murs	-5,2%	non simulé	non simulé
	Isolation R=1 sur tous les murs	-7,2%	non simulé	non simulé
	Isolation R=1,5 sur tous les murs	-8,2%	5,2%	-1%
	Isolation R=2 sur tous les murs	-8,9%	non simulé	non simulé

Couleur claire :

		Calcul des gains par rapport au cas de base		
		Mode climatisé (jour + nuit)	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	Mode non climatisé (jour + nuit)
Variantes		Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans isolation	0%	0%	0%
	Isolation R=0,5 sur tous les murs	-1,9%	non simulé	non simulé
	Isolation R=1 sur tous les murs	-2,6%	non simulé	non simulé
	Isolation R=1,5 sur tous les murs	-3,0%	10,3%	2,7%

c) Bardage ventilé

Modèle de base de Designbuilder (faible ventilation de la lame d'air)

L'épaisseur de la lame d'air est fixée à 5cm et on considère que les ouvertures en partie basse et en partie haute laissent passer 80% du débit maximum possible (coefficient de décharges des ouvertures = 0,8).

Mode climatisé jour + nuit : Gains sur les besoins de climatisation par rapport à l'existant

	Couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé couleur sombre	-5,4%	-1,2%	3,5%
Bardage ventilé couleur moyenne	-8,0%	-3,9%	0,6%
Bardage ventilé couleur claire	-10,7%	-6,7%	-2,3%

Mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h) : Gains sur les besoins de climatisation par rapport à l'existant

	Couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé couleur sombre	-5,7%	0,4%	7,2%
Bardage ventilé couleur moyenne	-100,0%	-4,0%	-100,0%
Bardage ventilé couleur claire	-13,6%	-8,0%	-1,7%

Mode non climatisé : Réduction de l'inconfort par rapport à l'existant

	Couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé couleur sombre	-6,6%	-0,5%	6,0%
Bardage ventilé couleur moyenne	-10,2%	-4,2%	2,0%
Bardage ventilé couleur claire	-13,3%	-7,6%	-1,6%

Les cases grises correspondent au cas où le bardage mis en œuvre est de la même couleur que le mur existant.

En vert = gain

En rouge = augmentation du besoin de climatisation ou de l'inconfort

Modèle avec masque proche (ventilation optimale de la lame d'air, surévaluation de l'échange convectif, pas d'impact de la couleur du bardage)

Mode climatisé jour + nuit : Gains sur les besoins de climatisation par rapport à l'existant

	Couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé (pas d'impact de la couleur)	-12,5%	-9,3%	-5,8%

Mode climatisé uniquement la nuit (20h-6h) : Gains sur les besoins de climatisation par rapport à l'existant

	Couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé (pas d'impact de la couleur)	-18,0%	-13,8%	-9,1%

Mode non climatisé : Réduction de l'inconfort par rapport à l'existant

	Couleur du mur existant		
	Couleur sombre	Couleur moyenne	Couleur claire
Bardage ventilé (pas d'impact de la couleur)	-16,5%	-12,0%	-7,2%

d) Protections des murs par orientation

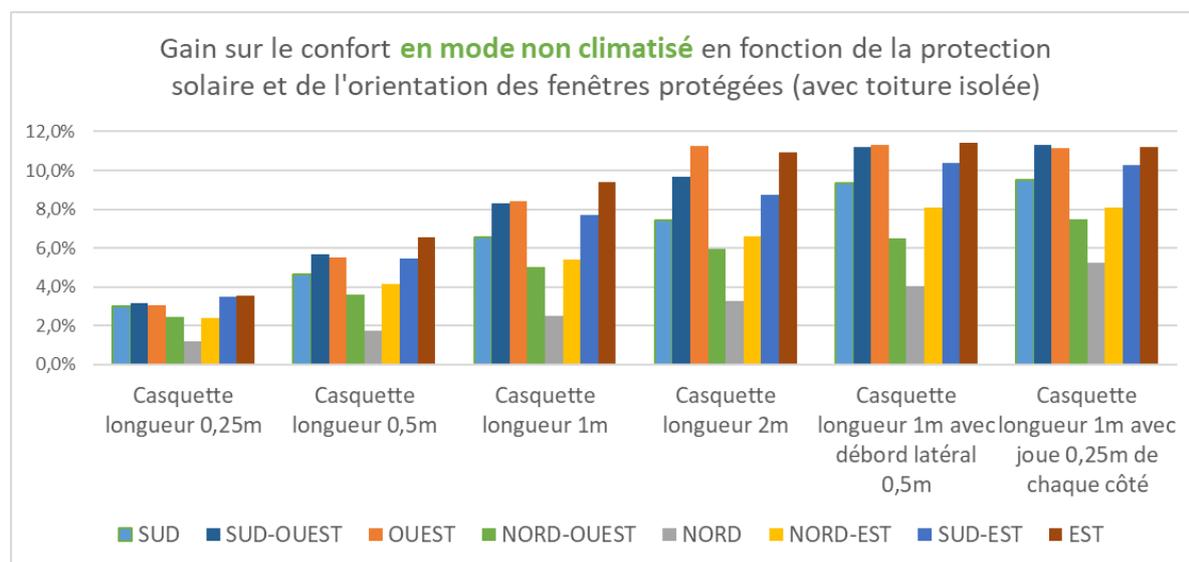
Cas avec des murs bois de couleur sombre avec une toiture isolée :

Cas de base	Variantes	Mode non climatisé (jour + nuit)	
		% du temps inconfortable sur l'année (T°op ≥ 30°C)	Ecart par rapport au cas de base (%)
	Sans isolation	30	0%
	Avec isolation mur Sud	28	-4,8%
	Avec isolation mur Ouest	28	-5,0%
	Avec isolation mur Est	28	-5,2%
	Avec isolation mur Nord	30	-0,5%
	Avec isolation tous les murs	23	-21,4%

C. Protections solaires :

a) Dimensionnement des protections des fenêtres

Cette analyse a été faite en cherchant à minimiser la part de rayonnement direct qui touche le vitrage (maximum de 5% de fraction de vitrage ensoleillée sur toute l'année) et en observant l'impact sur le confort de différentes dimensions de protections solaires. Les simulations ont été réalisées avec la toiture isolée pour mieux observer l'impact des protections solaires.



- Une casquette de 1m avec un débord latéral de 0,5m est la protection la plus efficace et la plus facile à mettre en œuvre pour toutes les orientations.
- La combinaison d'une casquette de 1m avec des joues de 0,25m est légèrement plus efficace notamment au Nord et Nord-Ouest mais beaucoup plus difficile à mettre en œuvre. Des joues d'une longueur supérieure à 0,25m n'ont pas été étudiées car cela ne nous paraît pas réalisable en rénovation de maison individuelle.
- Une casquette de 2m n'est pas beaucoup plus efficace par rapport à une casquette de 1m sauf à l'Est et à l'Ouest, mais la mise en œuvre est beaucoup plus contraignante (sauf s'il existe un projet de terrasse couverte). Il est préférable d'ajouter un débord latéral de 0,5m que de prolonger la longueur de la casquette.

b) Résultats détaillés sur les protections des fenêtres

Sans isolation de toiture :

	Variantes	Mode climatisé (jour + nuit)		Mode non climatisé (jour + nuit)	
		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)	% du temps inconfortable sur l'année (T ^{°op} ≥ 30°C)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans protection	307	0,0%	38,1%	0,0%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m partout	293	-4,6%	35,7%	-6,3%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Nord	305	-0,4%	37,8%	-0,7%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Est	302	-1,4%	37,4%	-2,0%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Sud	302	-1,4%	37,5%	-1,7%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Ouest	302	-1,4%	37,4%	-1,9%
	BSO uniquement au Nord	304	-0,8%	37,6%	-1,3%
	BSO uniquement à l'Est	301	-2,0%	37,0%	-2,9%
	BSO uniquement au Sud	301	-1,7%	37,2%	-2,3%
	BSO uniquement à l'Ouest	300	-2,1%	37,0%	-2,9%
	BSO partout	286	-6,6%	34,6%	-9,1%
	Mixte Casquette optimale Sud et Nord + BSO Est et Ouest	289	-5,9%	35,1%	-8,0%

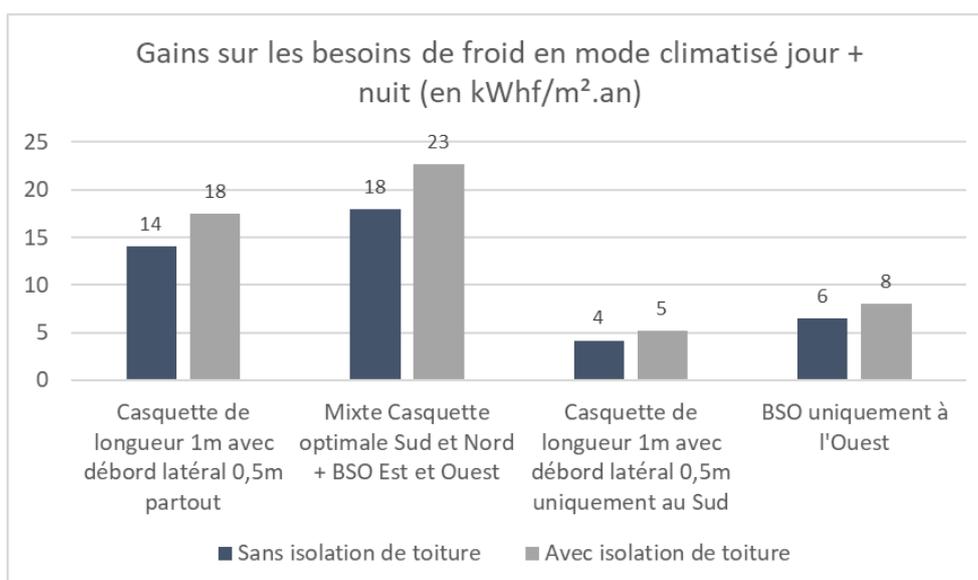
	Variantes	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	
		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans protection	121	0,0%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m partout	115	-5,0%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Nord	120	-0,5%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Est	119	-1,3%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Sud	119	-1,5%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Ouest	119	-1,7%
	BSO uniquement au Nord	120	-0,8%
	BSO uniquement à l'Est	119	-1,9%
	BSO uniquement au Sud	119	-1,8%
	BSO uniquement à l'Ouest	118	-2,4%
	BSO partout	113	-6,9%
	Mixte Casquette optimale Sud et Nord + BSO Est et Ouest	113	-6,3%

Avec isolation de toiture :

	Variantes	Mode climatisé (jour + nuit)		Mode non climatisé (jour + nuit)	
		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)	% du temps inconfortable sur l'année (T°op ≥ 30°C)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans protection	209	0,0%	16,4%	0,0%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m partout	191	-8,4%	10,8%	-34,1%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Nord	207	-0,8%	15,7%	-4,0%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Est	204	-2,5%	14,5%	-11,4%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Sud	204	-2,5%	15,0%	-8,4%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Ouest	203	-2,6%	14,5%	-11,3%
	BSO uniquement au Nord	206	-1,5%	15,1%	-8,0%
	BSO uniquement à l'Est	201	-3,7%	13,7%	-16,4%
	BSO uniquement au Sud	202	-3,2%	14,3%	-13,1%
	BSO uniquement à l'Ouest	201	-3,9%	13,5%	-17,6%
	BSO partout	183	-12,3%	8,3%	-49,7%
	Mixte Casquette optimale Sud et Nord + BSO Est et Ouest	186	-10,8%	9,2%	-43,8%

	Variantes	Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	
		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans protection	105	0,0%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m partout	96	-8,5%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Nord	104	-0,8%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Est	103	-2,3%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement au Sud	102	-2,5%
	Casquette de longueur 1m avec débord latéral 0,5m uniquement à l'Ouest	102	-2,8%
	BSO uniquement au Nord	103	-1,5%
	BSO uniquement à l'Est	101	-3,4%
	BSO uniquement au Sud	102	-3,1%
	BSO uniquement à l'Ouest	101	-4,1%
	BSO partout	92	-12,1%
	Mixte Casquette optimale Sud et Nord + BSO Est et Ouest	94	-10,8%

c) Gains en valeur absolue sur la protection des fenêtres



d) Résultats détaillés sur les protections combinée des fenêtres et des murs

Sans isolation de toiture :

Variantes	Mode climatisé (jour + nuit)		Mode non climatisé (jour + nuit)	
	Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)	% du temps inconfortable sur l'année (T [°] op ≥ 30°C)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base Sans protection	307	0,0%	38,1%	0,0%
Casquette 0,25m partout	304	-1,0%	37,6%	-1,3%
Casquette 0,5m partout	300	-2,2%	37,0%	-2,9%
Casquette 1m partout	292	-4,8%	35,7%	-6,3%
Casquette 2m partout	283	-7,8%	34,2%	-10,3%
Casquette 3m partout	278	-9,2%	33,5%	-12,2%
Casquette 0,5m uniquement au Nord	306	-0,3%	37,9%	-0,6%
Casquette 0,5m uniquement à l'Est	305	-0,6%	37,8%	-0,8%
Casquette 0,5m uniquement au Sud	304	-0,7%	37,8%	-0,8%
Casquette 0,5m uniquement à l'Ouest	305	-0,6%	37,8%	-0,8%
Casquette 1m uniquement au Nord	305	-0,5%	37,8%	-0,9%
Casquette 1m uniquement à l'Est	303	-1,3%	37,5%	-1,7%
Casquette 1m uniquement au Sud	302	-1,6%	37,4%	-1,9%
Casquette 1m uniquement à l'Ouest	302	-1,4%	37,4%	-1,8%
Casquette 2m uniquement au Nord	304	-0,8%	37,6%	-1,3%
Casquette 2m uniquement à l'Est	300	-2,2%	36,9%	-3,2%
Casquette 2m uniquement au Sud	299	-2,4%	37,1%	-2,8%
Casquette 2m uniquement à l'Ouest	299	-2,4%	36,8%	-3,3%
Casquette 2m Est, Ouest + 1m Sud	287	-6,3%	35,1%	-8,0%

		Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	
Variantes		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans protection	121	0,0%
	Casquette 0,25m partout	119	-1,4%
	Casquette 0,5m partout	117	-3,0%
	Casquette 1m partout	113	-6,1%
	Casquette 2m partout	109	-9,9%
	Casquette 3m partout	107	-11,7%
	Casquette 0,5m uniquement au Nord	120	-0,4%
	Casquette 0,5m uniquement à l'Est	120	-0,7%
	Casquette 0,5m uniquement au Sud	120	-1,0%
	Casquette 0,5m uniquement à l'Ouest	120	-0,9%
	Casquette 1m uniquement au Nord	120	-0,7%
	Casquette 1m uniquement à l'Est	119	-1,5%
	Casquette 1m uniquement au Sud	118	-2,1%
	Casquette 1m uniquement à l'Ouest	119	-1,9%
	Casquette 2m uniquement au Nord	120	-1,0%
	Casquette 2m uniquement à l'Est	118	-2,5%
	Casquette 2m uniquement au Sud	117	-3,1%
	Casquette 2m uniquement à l'Ouest	117	-3,3%
	Casquette 2m Est, Ouest + 1m Sud	111	-7,9%

Avec isolation de toiture :

		Mode climatisé (jour + nuit)		Mode non climatisé (jour + nuit)	
Variantes		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)	% du temps inconfortable sur l'année (T°op ≥ 30°C)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans protection	209	0,0%	16,4%	0,0%
	Casquette 0,25m partout	205	-1,8%	15,3%	-6,8%
	Casquette 0,5m partout	200	-4,2%	13,7%	-16,4%
	Casquette 1m partout	190	-8,9%	10,9%	-33,5%
	Casquette 2m partout	178	-14,5%	7,9%	-51,6%
	Casquette 3m partout	173	-17,2%	6,6%	-59,5%
	Casquette 0,5m uniquement au Nord	208	-0,6%	15,9%	-3,1%
	Casquette 0,5m uniquement à l'Est	207	-1,0%	15,6%	-4,9%
	Casquette 0,5m uniquement au Sud	206	-1,4%	15,7%	-4,3%
	Casquette 0,5m uniquement à l'Ouest	206	-1,1%	15,7%	-4,1%
	Casquette 1m uniquement au Nord	207	-1,0%	15,6%	-5,1%
	Casquette 1m uniquement à l'Est	204	-2,3%	14,6%	-10,8%
	Casquette 1m uniquement au Sud	202	-3,0%	14,7%	-10,2%
	Casquette 1m uniquement à l'Ouest	204	-2,5%	14,9%	-9,2%
	Casquette 2m uniquement au Nord	206	-1,5%	15,2%	-7,2%
	Casquette 2m uniquement à l'Est	200	-4,1%	13,4%	-18,3%
	Casquette 2m uniquement au Sud	200	-4,4%	14,2%	-13,6%
	Casquette 2m uniquement à l'Ouest	200	-4,4%	13,6%	-17,0%
	Casquette 2m Est, Ouest + 1m Sud	185	-11,6%	9,5%	-42,2%

		Mode climatisé (nuit uniquement : 20h-6h)	
Variantes		Besoin de froid (kWhf/m ² .an)	Ecart par rapport au cas de base (%)
Cas de base	Sans protection	105	0,0%
	Casquette 0,25m partout	103	-2,2%
	Casquette 0,5m partout	100	-4,7%
	Casquette 1m partout	95	-9,8%
	Casquette 2m partout	88	-16,0%
	Casquette 3m partout	85	-18,9%
	Casquette 0,5m uniquement au Nord	104	-0,7%
	Casquette 0,5m uniquement à l'Est	104	-1,1%
	Casquette 0,5m uniquement au Sud	103	-1,5%
	Casquette 0,5m uniquement à l'Ouest	104	-1,4%
	Casquette 1m uniquement au Nord	104	-1,1%
	Casquette 1m uniquement à l'Est	102	-2,4%
	Casquette 1m uniquement au Sud	102	-3,3%
	Casquette 1m uniquement à l'Ouest	102	-2,9%
	Casquette 2m uniquement au Nord	103	-1,6%
	Casquette 2m uniquement à l'Est	101	-4,1%
	Casquette 2m uniquement au Sud	100	-4,9%
	Casquette 2m uniquement à l'Ouest	100	-5,2%
	Casquette 2m Est, Ouest + 1m Sud	92	-12,7%