

MESURES DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DE DEUX CELLULES PLACEES EN ENVIRONNEMENT EXTERIEUR (ESSAIS IN SITU)



AVERTISSEMENT

Par convention, l'ADEME a financé la réalisation d'une étude par le CSTB et ARMINES (Centre Energétique et Procédés de l'Ecole des Mines) sur les "méthodes d'évaluation et performances thermiques des produits réfléchissants (hiver et été)".

L'ADEME a autorisé et validé la présente communication du rapport d'avancement car les méthodes d'essais et les résultats de mesure qui y sont exposés sont par nature définitifs.

Il convient de souligner que le contenu de cette communication ayant pour objectif de faire progresser la connaissance dans le domaine considéré et qu'il a été réalisée indépendamment de tout intérêt commercial et que par conséquent ni ses auteurs ni l'ADEME ne sauraient être tenus responsables de toute utilisation qui pourrait en être faite.

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | www.cstb.fr
ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229
MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

SOMMAIRE

1. OBJET	3
2. CELLULES D'ESSAIS	3
2.1. CONSTITUTION	3
2.2. TRAITEMENT DES AUTRES POSTES DÉPERDITIFS	5
2.2.1. Perméabilité à l'air de l'enveloppe	5
2.2.2. Ponts thermiques	8
2.2.3. Déperditions par le sol	8
2.2.4. Déperditions par la porte d'entrée	9
3. INSTRUMENTATION	9
3.1. APPAREILS ET CAPTEURS	9
3.2. INCERTITUDES DE MESURE	10
4. RÉSULTATS D'ESSAIS	11
4.1 TEMPÉRATURES INTÉRIEURES	11
4.2 TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES, ENSOLEILLEMENT ET VITESSE DU VENT	12
4.3 CONSOMMATION D'ÉNERGIE	13
4.4 BILAN ENERGETIQUE	14
5. CONCLUSION	16

1. OBJET

La présente étude a été réalisée dans le cadre du « Programme de Recherche sur l'énergie dans le Bâtiment : PREBAT »

L'objectif de cette étude est l'évaluation de l'ordre de grandeur de la contribution thermique d'un produit réfléchissant associé à deux lames d'air non ventilées, à la consommation d'énergie en période d'hiver d'une cellule placée en environnement extérieur. Cette contribution pourrait ensuite être analysée par comparaison à une cellule de référence isolée avec un produit isolant traditionnel pré évalué au laboratoire conformément aux normes existantes.

Les deux cellules sont maintenues à la même température moyenne intérieure par le biais d'un dispositif de régulation associé à un chauffage électrique.

Les murs et la toiture ont été isolés selon le même procédé; le plancher bas et la porte d'entrée ont été fortement isolés. La perméabilité à l'air et certains ponts thermiques, ont été traités pour limiter les postes déperditifs autres que les parois.

La consommation d'énergie des cellules étant liée, entre autres, à la mise en œuvre des deux produits. Nous avons choisi de les installer dans les conditions les plus favorables de mise en œuvre :

- Le produit réfléchissant est un produit multicouche courant pris à l'état neuf (émissivité non vieillie et absence d'empoussièrement) placé entre deux lames d'air non ventilées. Afin de maintenir les mêmes dimensions intérieures et extérieures que la cellule de référence, ces lames d'air ont entre 6 et 8 cm d'épaisseur nominale.
- La laine de verre en deux couches d'épaisseur totale égale à 200 mm a été recouverte côté extérieure d'un pare air fixé sur les chevrons et de panneaux de contreventement en OSB par dessus.

2. CELLULES D'ESSAIS

2.1. CONSTITUTION

La cellule d'essais avec produit réfléchissants (nommée A), est construite de la même façon que la cellule de référence (nommée B).

Les deux cellules sont à ossature bois avec une surface carrée intérieure au sol d'environ 13 m². L'épaisseur des parois permet la mise en œuvre de procédés d'isolation de 200 mm d'épaisseur. La hauteur des murs sous toiture est de 2,5 m. La pente de toit est d'environ

25 degrés, les murs pignons ont une hauteur sous faitage de 3,3 m. Les deux cellules ont la même orientation : une toiture est orientée au Nord, l'autre au Sud et les murs pignon à l'Est et à l'Ouest.

Le mur est constitué des éléments suivants :

- Un parement extérieur fixé sur des tasseaux de bardage
- Une lame d'air ventilée de quelques centimètres d'épaisseur
- Des panneaux de contreventement OSB de 19 mm : les joints sont rendus étanches au silicone,
- Une membrane d'étanchéité à l'air avec traitement des jonctions et des points singuliers,

- Des montants porteurs en bois de 100 mm de profondeur, 80 mm d'épaisseur et de 600 mm d'entraxe,
- Le produit réfléchissant est un produit multicouche (mousse plastique et ouate en plusieurs couches séparées par des feuilles réfléchissantes intermédiaires) d'épaisseur comprise entre 20 et 25 mm il est agrafé sur les montants côté intérieur et rendu étanche au niveau des jonctions et des points singuliers. La laine minérale de 200 mm d'épaisseur a une résistance thermique préalablement mesurée de $5 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Elle est déroulée en deux couches. La première est insérée entre les montants et la deuxième passe devant les montants.
- Des tasseaux en bois de section 20X20 mm, fixés à l'aide de tiges (2 par montant) sur les montants et distants de 80 mm de ces derniers,
- Une plaque de parement en plâtre à faces cartonnées BA 13 fixée sur les tasseaux

La toiture est constituée des éléments suivants :

- Une couverture en tuile,
- Des liteaux de 20 mm d'épaisseur,
- Des contre liteaux de 20 mm d'épaisseur,
- Des panneaux de contreventement OSB de 19 mm,
- Des chevrons en bois de 100 mm de profondeur et de 600 mm d'entraxe,
- Le produit réfléchissant est agrafé par-dessous les chevrons (cellule A). La laine minérale a été posée entre et devant chevrons en deux couches croisées (cellule B).
- Des suspentes métalliques ponctuelles ($1,4 \text{ par m}^2$) fixées sur les chevrons pour supporter les fourrures métalliques servant à fixer la plaque de plâtre.
- Des plaques de parement en plâtre, fixée sur les fourrures métalliques

Le plancher sur terre plein est constitué des éléments suivants (de bas en haut):

- Une dalle béton de 150 mm d'épaisseur,
- Une membrane d'étanchéité à l'air en polyane avec traitement des jonctions et des points singuliers
- Des panneaux en polyuréthane à parements étanches en aluminium, de 200 mm d'épaisseur totale posé en plusieurs couches croisées,
- Des panneaux en bois de 18 mm d'épaisseur.

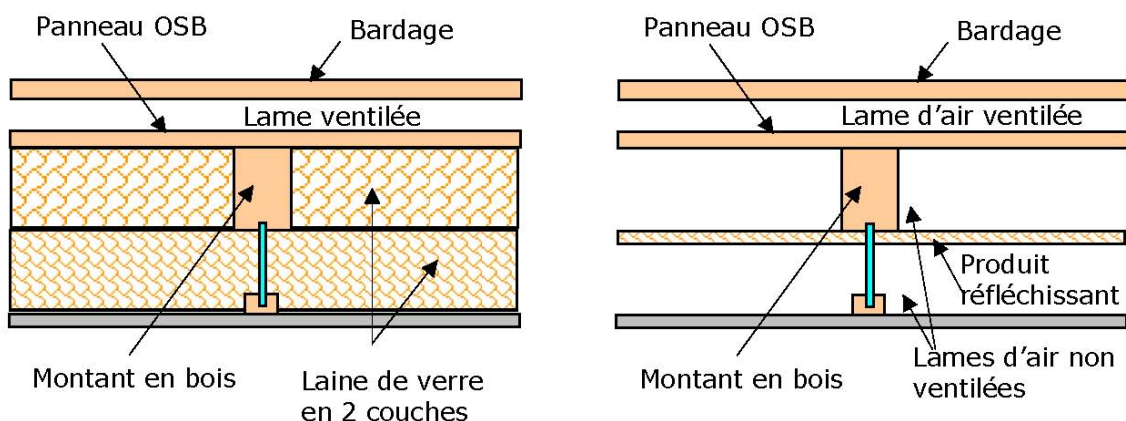


Figure 1 : coupes schématiques dans un mur (même principe en toiture)



Photographie 1 : Vue de l'intérieur avant la pose de l'isolant et du parement : pose de la membrane d'étanchéité à l'air

2.2. TRAITEMENT DES AUTRES POSTES DÉPERDITIFS

Certains paramètres et points singuliers pouvant avoir une influence significative sur les résultats des mesures, ont eu un soin particulier notamment:

- la perméabilité à l'air de l'enveloppe,
- les ponts thermiques
- les déperditions par le sol,
- les déperditions par la porte d'entrée.

2.2.1. La perméabilité à l'air de l'enveloppe

L'étanchéité à l'air extérieure est renforcée par trois barrières successives :

- la première est faite par les panneaux de contreventement. Ils sont juxtaposés et le joint entre panneaux est traité par un joint silicone,
- la deuxième barrière est obtenue par la mise en place d'une membrane pare air continue qui enveloppe la charpente en passant entre les panneaux de contreventement et les montants.

Les raccords restant entre les membranes sont assurés par un ruban adhésif spécialement adapté.

Au niveau du sol, la continuité de l'étanchéité est assurée par un film polyane. Le raccord entre ce film et la membrane pare air est effectué par pincement sous la lisse horizontale sur laquelle reposent les montants.

- la troisième barrière est réalisée par le parement intérieur en plaques de parement en plâtre. Les joints entre plaques sont traités avec une bande de papier couvre joint et un enduit de jointement adaptés. Le raccord avec le sol est traité par un joint silicone.



Photographie 2 : Mise en place de la membrane pare air

Les mesures de la perméabilité à l'air ont été réalisées suivant la méthode de pressurisation à l'aide de la « fausse porte ». Une porte spécifique en bois a été conçue pour être adaptée au dispositif de mesure.

Les cellules ont été mises en surpression à l'aide d'un ventilateur à vitesse variable relié à un conduit porte-diaphragme spécifiquement adapté à la mesure des faibles débits. Il a été choisi de retenir une méthode par pressurisation plutôt que par dépressurisation pour éviter de décoller les lés de plastique servant à l'étanchéité de l'enveloppe.

Deux essais de perméabilité à l'air ont été réalisés en utilisant le test de la fausse porte :

- Le premier avant la pose des procédés d'isolation avec seulement deux premières barrières d'étanchéité (courbes pointillées).
- Le second après la mise en place des procédés d'isolation et du parement intérieur (avec les 3 barrières d'étanchéité). Il a été réalisé à la fin de la campagne de mesure de la consommation et tient compte des mouvements différentiels éventuels dans la construction (courbes pleines).

Les courbes bleues représentent la cellule A et les rouges, la cellule B

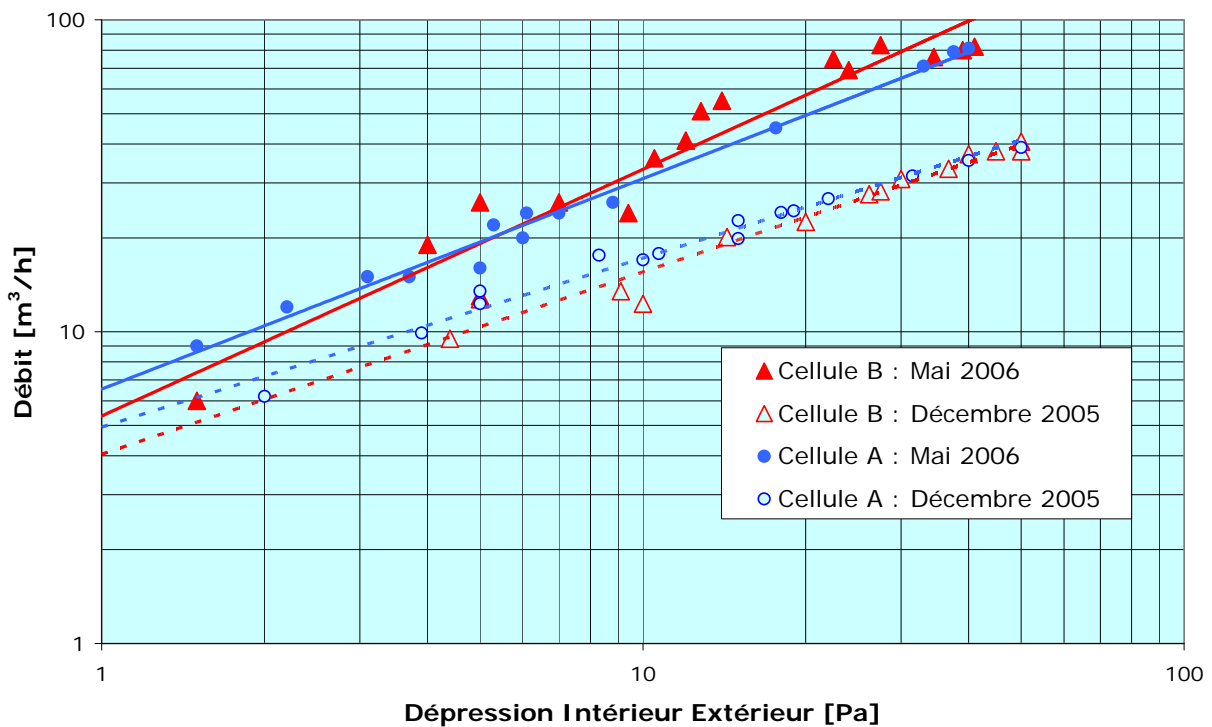


Figure 2: Résultats de perméabilité à l'air des cellules

A partir des points de mesures, on a déterminé par régression linéaire l'équation caractéristique de fuite $Q = C \times DP^n$, le débit sous 10 Pa et le débit de fuite surfacique à 4 Pa.

Le tableau 1 donne les différents résultats obtenus lors des deux campagnes et sur chaque cellule.

	Cellule A		Cellule B	
	Décembre 2005	Mai 2006	Décembre 2005	Mai 2006
Equation caractéristique de fuite	$Q = 4,9 DP^{0,54}$	$Q = 6,54 DP^{0,675}$	$Q = 4,1 DP^{0,58}$	$Q = 5,36 DP^{0,78}$
Débit sous 10 Pa [m³/h]	17	31	16	33
Débit de fuite surfacique sous 4 Pa [m³/h/m²]	0,21	0,33	0,18	0,32

Tableau 1 : Résultats de perméabilité à l'air des cellules

La seconde campagne de mesures a montré que, d'une manière générale, la perméabilité à l'air des cellules reste faible : l'aire équivalente de fuites est de l'ordre de 32 cm^2 . Cela laisse penser que les défauts d'étanchéité seraient plutôt des orifices de type trous de dimensions moyennes, que des petites fissures.

L'étanchéité des 2 cellules est toutefois moins bonne que lors de la première campagne de mesure où l'on a trouvé un trou équivalent de 15 cm^2 . Cette détérioration s'explique par les trous réalisés entre les deux campagnes de mesures pour le passage de câbles par le sol.

A l'examen des résultats, on constate que les caractéristiques d'étanchéité à l'air des deux cellules sont très voisines. En termes de débits d'air, les écarts sont généralement inférieurs à 10%.

2.2.2. Ponts thermiques

- L'isolant du plancher posé directement sur la dalle en béton, est en contact périphérique avec l'isolation verticale réduisant ainsi les ponts thermiques avec les murs.
- En toiture, l'isolation est continue par-dessus la panne faîtière afin de réduire ce pont thermique comme le montre la photographie 3 (cellule B)

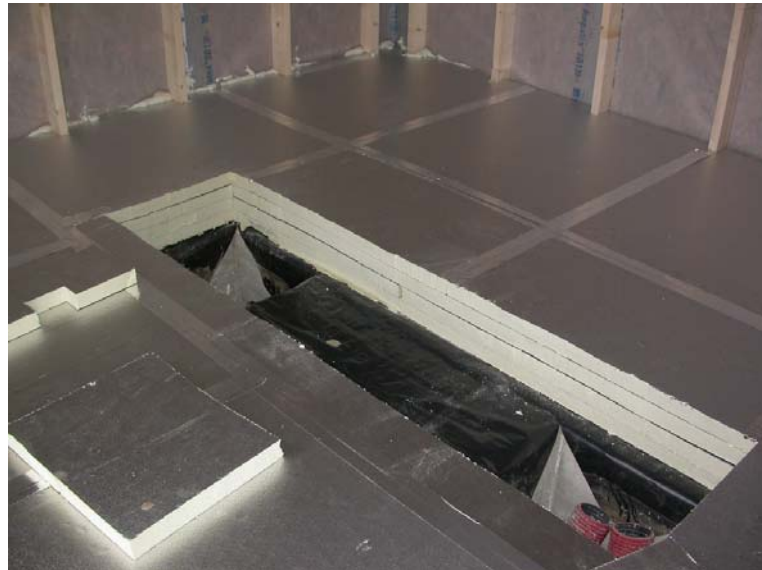


Photographie 3 : Vue de l'isolation de la panne faîtière

- Pour les deux systèmes d'isolation l'ossature porteuse en bois a été partiellement protégée ce qui réduit le pont thermique correspondant (traitement par une couche de laine minérale en cellule A et par une lame d'air continue non ventilée en cellule B)

2.2.3. Déperditions par le sol

- Pour limiter les déperditions par le sol, des panneaux en mousse polyuréthane d'épaisseur 200 mm (soit une résistance thermique de $8.7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ environ) ont été posés sur la dalle en béton comme le montre la photographie 4.
- Pour limiter les fuites thermiques et ne pas percer les parois, les câbles ont été passés par le sol. L'isolation thermique des ouvertures pratiquées a été assurée par des panneaux d'isolant de même résistance thermique comme le montre la photographie 4.



Photographie 4 : Isolation par le sol et passage des câbles

2.2.4. Déperditions par la porte d'entrée

Une double porte a été réalisée et un panneau d'isolant a été inséré dans le sas pour assurer une meilleure étanchéité à l'air. Cf. figure2

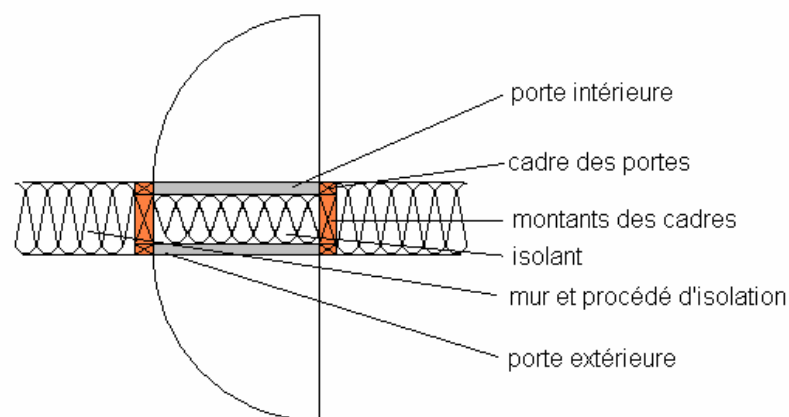


Figure 3 : isolation de la porte d'entrée

3. INSTRUMENTATION

3.1. APPAREILS ET CAPTEURS

Les deux cellules sont équipées de capteurs de mesure des principaux paramètres permettant d'influencer les transferts thermiques.

Le chauffage des cellules est assuré par des radiateurs électriques identiques reliés à un système de régulation permettant de maintenir l'ambiance intérieure à une température moyenne constante. Cette température de consigne est identique pour les deux cellules.

Au centre de chaque cellule, une sonde de régulation est placée à 1,20 m du sol, Cf. Photographie 5



Photographie 5 : Vue des radiateurs et de la sonde de régulation

La mesure de la puissance électrique consommée par les radiateurs a été réalisée à l'aide d'un wattmètre. Ceci permet de mesurer la quantité d'énergie consommée par les cellules en fonction du temps pour se maintenir à la même température moyenne de régulation.

Des paramètres météorologiques ont été enregistrés en parallèle à la campagne d'essais, notamment la température extérieure, l'humidité relative, l'ensoleillement, la vitesse et la direction du vent la pression atmosphérique et les précipitations.

3.2. INCERTITUDES DE MESURE

Toutes les incertitudes données sont des incertitudes types sur une mesure. L'incertitude type donnée est obtenue par la somme quadratique des écart-types de chaque cause.

- l'incertitude sur la mesure de la puissance est la combinaison des incertitudes sur le wattmètre, le convertisseur analogique et la centrale d'acquisition : $\sigma_p \approx 4W$
- l'incertitude sur la mesure des températures de l'air par les sondes de régulation est la combinaison des incertitudes sur la classe du capteur : $\sigma_{\text{Sonde}} \approx 0,6^\circ C$

4. RÉSULTATS D'ESSAIS

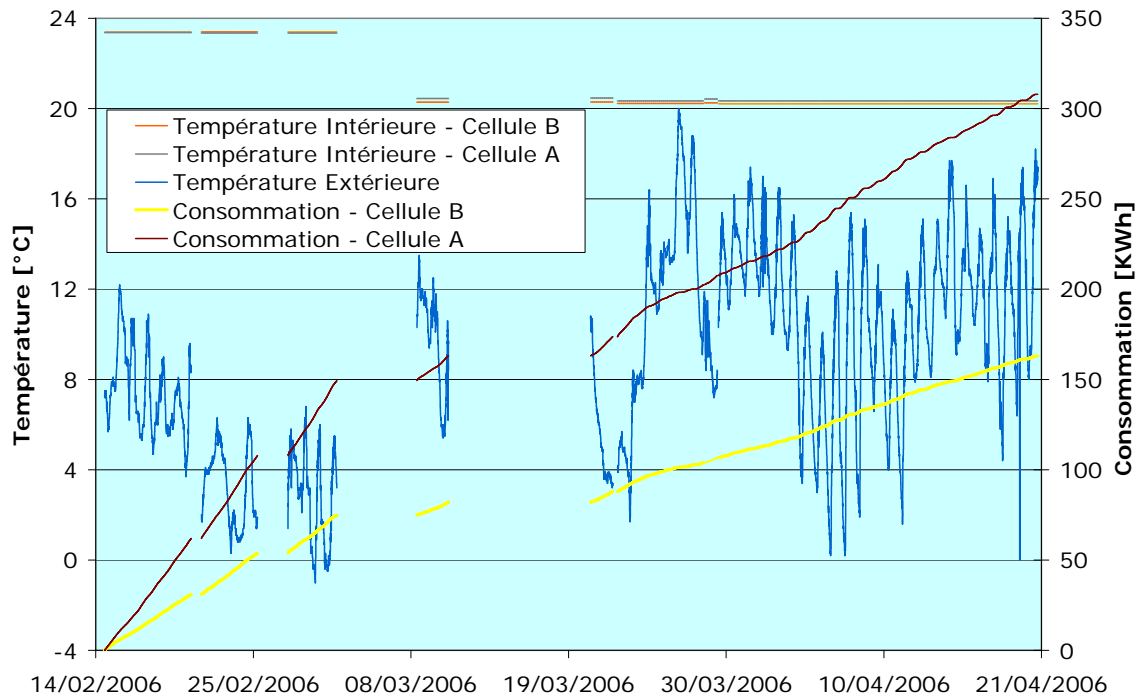


Figure 4 : Consommation et températures observées – Campagne 2006

Cellule A : avec produit réfléchissant

Cellule B : cellule de référence

La durée de la campagne d'essai est de deux mois environ. Le cumul des consommations des deux cellules en fonction des températures intérieures et extérieures est présenté en figure 4. L'interruption des courbes qui apparaît sur le graphique correspond aux interventions pour la maintenance et la vérification des équipements et capteurs de mesure. L'évolution de la consommation étant linéaire avec le temps, nous avons choisi de détailler les résultats sur 5 jours consécutifs (15 au 19 février 2006) représentatifs de l'ensemble de la campagne.

4.1. TEMPÉRATURES INTÉRIEURES

Le tableau 2 résume pour la période du 15 au 19 février 2006, les températures intérieures moyennes mesurées.

	Température moyenne en °C – Période du 15 au 19 février 2006			
	Régulation		Ambiance	
	Cellule A	Cellule B	Cellule A	Cellule B
Moyenne	23,4	23,4	24,0	23,7
Ecart type	0,5	0,4	0,9	0,8
Minimum	22,5	22,8	21,8	22,7
Maximum	24,3	24,4	25,5	25,8

Tableau 2 : Températures intérieures moyennes

Le relevé des deux températures de régulation, donné à la figure 5, lors de la journée du 17 février 2006, montre l'établissement d'un régime cyclique de l'évolution de la température de l'air dû à la régulation du chauffage (marche/arrêt)

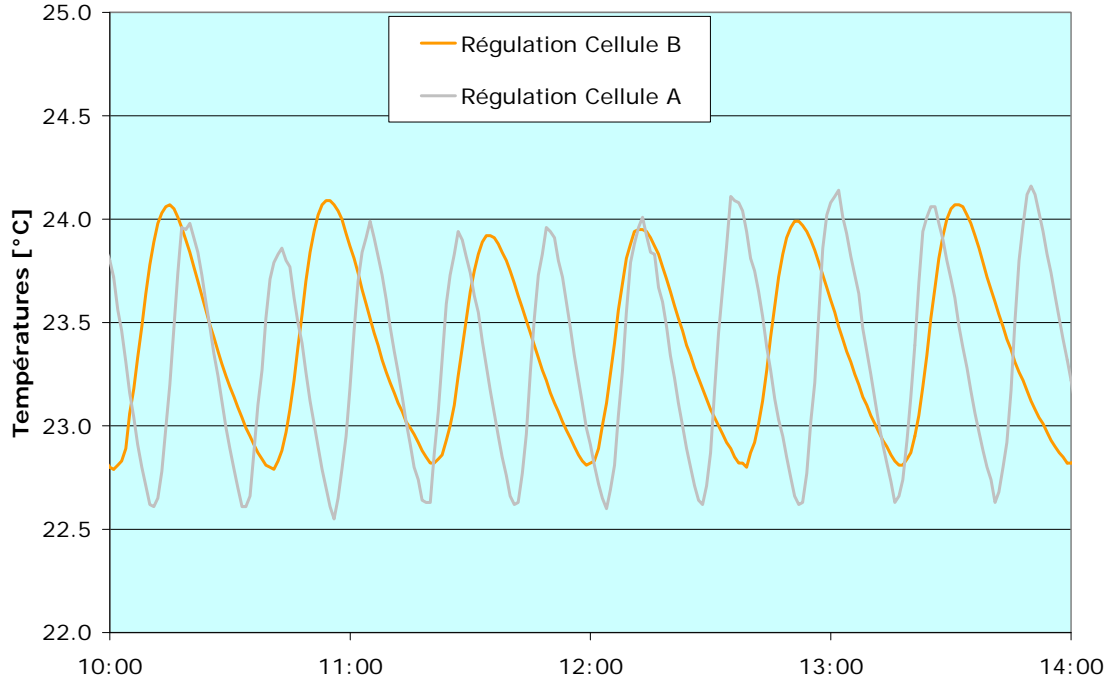


Figure 5 : Relevé des deux températures de régulation

4.2 TEMPÉRATURES EXTÉRIEURES, ENSOLEILLEMENT ET VITESSE DU VENT

La figure 6 donne pour la période du 15 au 19 février 2006 le relevé des températures extérieures, la vitesse du vent et l'intensité du rayonnement solaire.

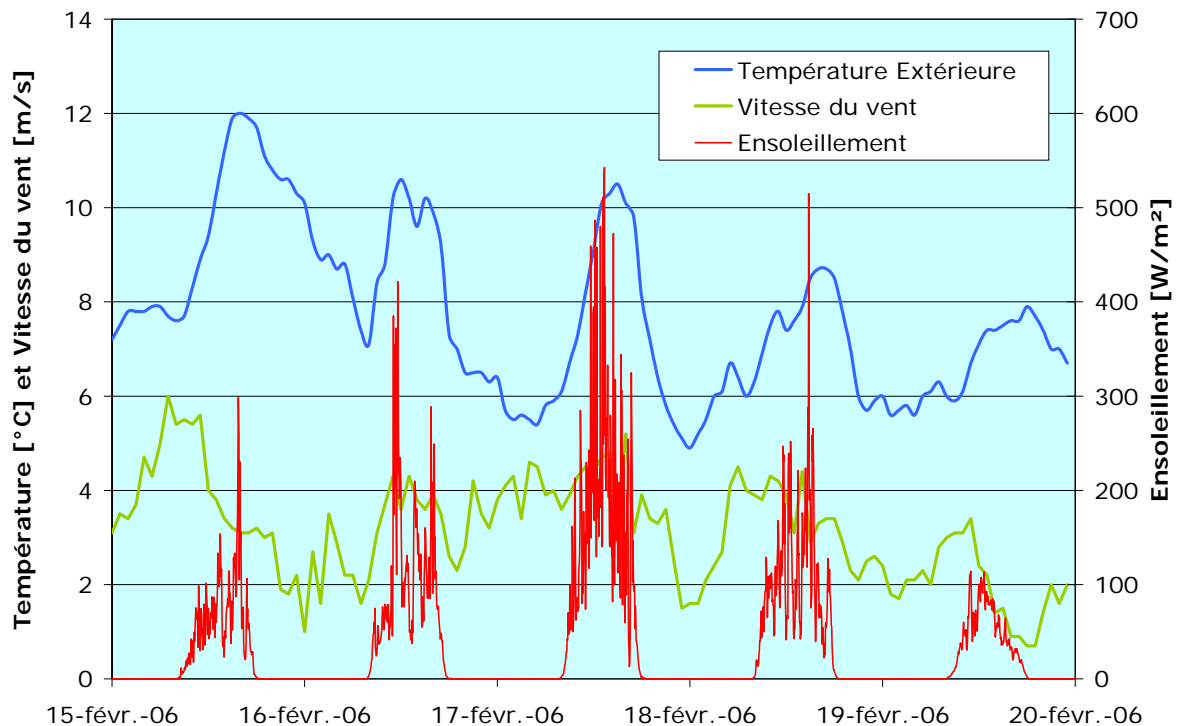


Figure 6 : Températures extérieures, vitesse du vent et ensoleillement

4.3 CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Le tableau 3 ci-dessous résume la consommation d'énergie totale observée sur la période du 15 au 19 février 2006 des deux cellules A et B.

Consommation d'énergie en Wh – Période du 15 au 19 février 2006	
Cellule A	50 793
Cellule B	25 289

Tableau 3 : Consommation d'énergie

La figure 7 montre pour la période du 15 au 19 février 2006, les consommations d'énergie comparée aux variations des températures extérieure et intérieure pour les deux cellules.

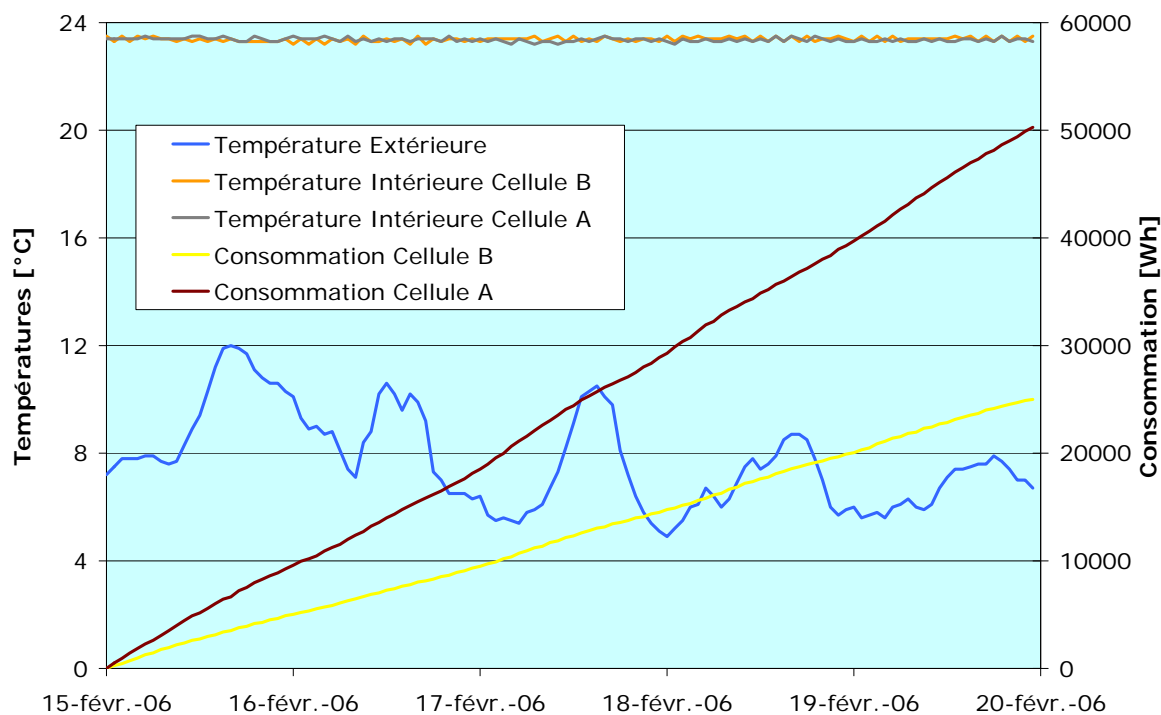


Figure 7 : Consommation et températures observées – Période du 15 au 19 février 2006

La figure 8 détaille la journée du 17 février 2006

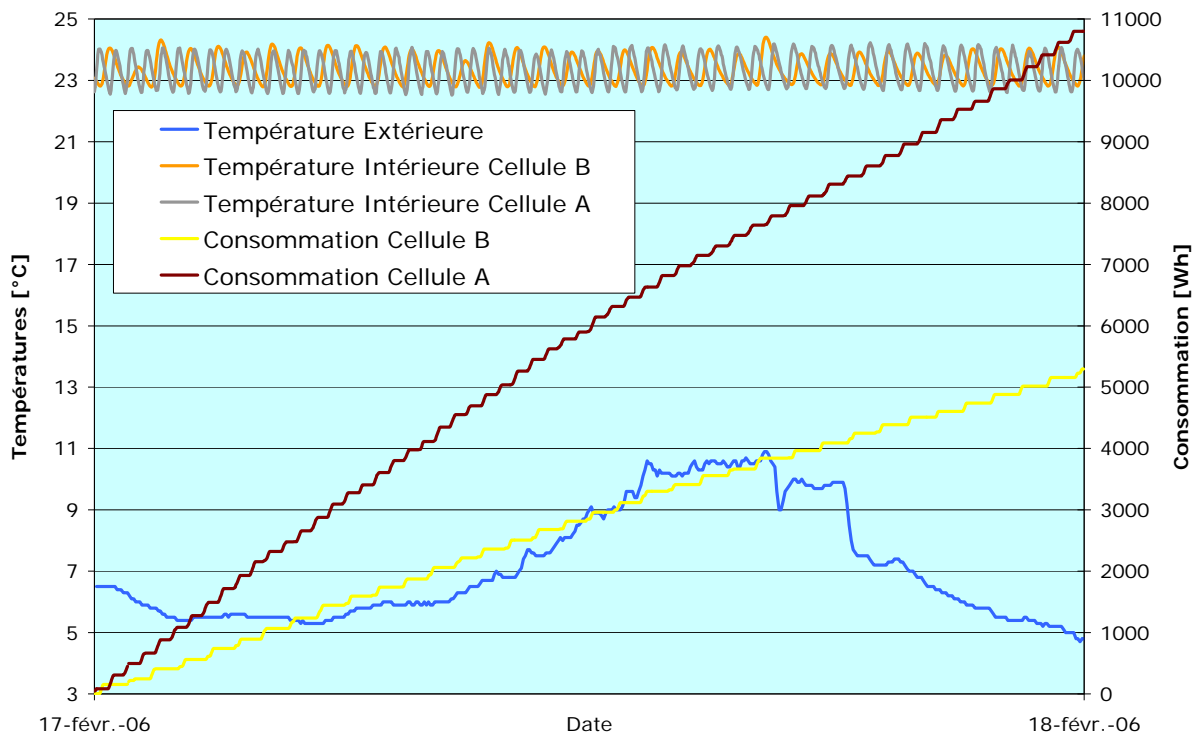


Figure 8 : Consommation et températures observées – Journée du 17 février 2006

4.4. BILAN ENERGETIQUE

D'après la figure 7 la consommation d'énergie des deux cellules, évolue presque linéairement avec le temps. Les légers fléchissements des courbes correspondent à des périodes d'ensoleillement visibles sur la figure 6.

Les températures intérieures moyennes des deux cellules sont quasiment identiques.

D'après la figure 7, en période de chauffage, la cellule A consomme environ deux fois plus d'énergie que la cellule B pour la même température intérieure de régulation.

La consommation d'énergie des cellules ne permet pas de remonter jusqu'aux résistances thermiques intrinsèques des produits puisqu'elle dépend de bien d'autres paramètres comme les apports solaires, le taux de renouvellement d'air, les ponts thermiques intégrés et de liaisons, la mise en œuvre des produits ainsi que les conditions aux limites des parois (températures, vitesse du vent et coefficients d'échanges superficiels).

En revanche l'estimation d'un bilan énergétique par mètre carré de paroi (murs et toit) et par degré d'écart de température peut être effectuée pour les deux cellules ; cette estimation a pour seul objectif de donner à titre indicatif les ordres de grandeur du bilan énergétique des deux procédés d'isolation. Elle ne peut en aucun cas se substituer aux méthodes normatives du CEN/TC89 où les conditions aux limites et la mise en œuvre sont mieux maîtrisées.

Ce bilan sera représenté par un coefficient noté U' , donné à titre indicatif, qui intègre l'impact des paramètres cités plus haut et permet ensuite d'en déduire un **ordre de grandeur** de la résistance thermique globale de la paroi..

Ce coefficient U' se calcule en divisant la consommation d'énergie mesurée pendant une période donnée et pour une différence de température moyenne entre les ambiances intérieure et extérieure, par la surface des parois isolées par le même procédé.

$$U' = \frac{C_{\text{totale}} - C_{\text{sol+porte}}}{\Delta T \times \Delta \theta \times S_{\text{mur+toit}}} \quad \text{en W/(m}^2\text{.K)}$$

$$C_{\text{sol+porte}} = \Delta T \times \Delta \theta \times (S_{\text{sol}} \times U_{\text{sol}} + S_{\text{porte}} \times U_{\text{porte}})$$

Où

- C_{totale} est la consommation d'énergie totale mesurée sur une période de 120 heures
= 50.79 kWh (cellule A)
= 25.3 kWh (cellule B)
- $C_{\text{sol+porte}}$ est la consommation d'énergie calculée à travers la porte et le sol = 3.39 kWh
- ΔT est la durée de la période de mesure en heure = 120 heures
- $\Delta \theta$ est la différence de température moyenne entre l'intérieur et l'extérieur = 15 K
- S_{sol} est la surface intérieure du sol = 13.03 m²
- U_{sol} est le coefficient de transmission surfacique du sol = 0.11 W/(m².K)
- S_{porte} est la surface intérieure de la porte = 1.76 m²
- U_{porte} est le coefficient de transmission surfacique de la porte = 0.26 W/(m².K)
- $S_{\text{mur+toit}}$ est la surface intérieure des murs et du toit = 47.76 m²

Les valeurs de U' (mur+toit) ainsi obtenues pour les deux cellules sont :

Cellule A: $U' = 0.55 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$

Cellule B: $U' = 0.25 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$

La déperdition thermique à travers 1 m² de paroi (mur +toit) est environ deux fois plus importante en cellule A qu'en cellule B.

Ces coefficients intègrent aussi bien les déperditions par transmission et renouvellement d'air, que les gains énergétiques par les apports solaires.

Dans la configuration testée et **si on néglige** l'impact du renouvellement d'air (faible perméabilité à l'air des deux cellules) et des apports solaires (présence d'un bardage extérieur avec lame d'air ventilée sur l'extérieur dans les deux cellules) l'ordre de grandeur de la **résistance thermique globale de la paroi** isolée avec le produit réfléchissant, déduit d'après le coefficient U' ($R_{\text{globale}} \sim (1/U'_{\text{celluleA}})$ -résistances superficielles), reste inférieure à 2 m².K/W.

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de mesurer la contribution thermique d'un produit mince réfléchissant multi couche à la consommation d'énergie d'une cellule placée en environnement extérieur hivernal. Le résultat est ensuite comparé à la consommation d'une cellule de référence identique par ailleurs mais isolée avec 200 mm d'un produit isolant traditionnel en laine de verre ayant une résistance thermique certifiée de 5 m²K/W.

Le produit mince réfléchissant a été installé dans les conditions les plus favorables à savoir avec deux lames d'air non ventilées situées de part et d'autre du produit et des faces réfléchissantes prises à l'état neuf et sans empoussièremment. La laine de verre a été protégée de l'environnement extérieur par un pare air fixé sur les chevrons et surmonté d'un panneau de contreventement en OSB.

Les deux cellules ont été régulées à la même température intérieure et placées sous les mêmes conditions climatiques extérieures. Les mesures ont été effectuées sur une période de 3 mois environ.

La consommation d'énergie mesurée sur les deux cellules montre que la cellule isolée par le produit réfléchissant multicouche consomme deux fois plus d'énergie que la cellule de référence isolée par un produit en laine de verre.

La contribution du produit réfléchissant à l'isolation thermique des parois en période hivernale, reste inférieure à 2 m².K/W. Cette valeur intègre l'impact des ponts thermiques (10 à 15 % environ) ; il est à noter qu'elle est du même ordre de grandeur que celle obtenue par l'application des normes existantes du CEN/TC89 (calcul et/ou mesure).

Il est à noter que la comparaison des consommations d'énergie de deux cellules isolées par deux produits différents ne permet pas de déterminer la résistance thermique intrinsèque d'un produit par comparaison avec celle de l'autre. En effet la résistance thermique du produit est loin d'être l'unique facteur pouvant avoir un impact déterminant sur la consommation d'énergie. On cite notamment la mise en œuvre des produits, les ponts thermiques, l'orientation des flux, la stratification de l'air dans le local, les apports solaires, les conditions climatiques extérieures pendant la période de mesure et la perméabilité à l'air du bâtiment. Concernant la mise en œuvre, il faut souligner l'attention qui doit être apportée aux règles de l'art spécifiques des nombreuses techniques de construction visées et la nécessité de respecter strictement ces règles.