



**Simulation numérique des doubles fenêtres du cloître St Amandsberg
Projet Erfgoedenergieloket (2013-2047)**

Nicolas Heijmans, 10/06/2021

Table des matières

1	INTRODUCTION	2
2	PROCÉDURE DE CALCUL	3
3	CALCULS NUMÉRIQUES	4
3.1	Mur uniquement	4
3.2	Situation initiale	5
3.2.1	<i>Calcul de la fenêtre d'origine et d'une portion de mur (en 2D)</i>	5
3.2.2	<i>Fenêtre d'origine uniquement</i>	6
3.2.3	<i>Fenêtre d'origine dans le mur</i>	6
3.3	Situation rénovée avec un double vitrage	7
3.3.1	<i>Calcul de la double fenêtre et d'une portion de mur (en 2D)</i>	7
3.3.2	<i>Double fenêtre uniquement</i>	8
3.3.3	<i>Double fenêtre dans le mur</i>	9
3.4	Situation rénovée avec un simple vitrage	9
4	CONCLUSION	9

1 Introduction

Le cloître St Amandsberg est équipé de doubles fenêtres. La fenêtre d'origine, composée d'un simple vitrage monté dans un châssis bois, a été doublée par un double vitrage ($U_g = 1.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) monté dans un châssis bois. La distance entre les deux vitrages est de 23.5 cm.

Cette double fenêtre a fait l'objet d'un monitoring afin d'évaluer ses performances thermiques. En parallèle, un calcul numérique a également été effectué. Ce calcul est simplifié : il s'agit d'un calcul 2D (et non 3D), la géométrie est simplifiée, le double vitrage est simulé comme un matériau unique, l'effet de l'espaceur est négligé... En outre, la fenêtre est supposée étanche à l'air.

Le présent rapport présente ce calcul numérique.

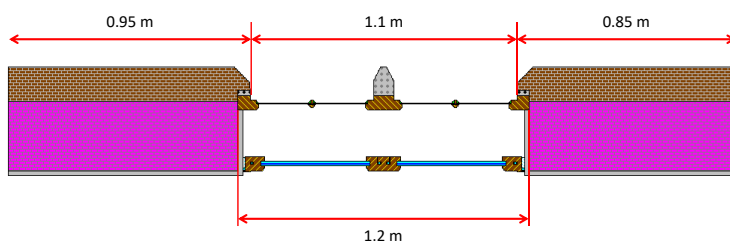
2 Procédure de calcul

Selon les normes de calcul relative à la performance thermique, il y a tout d'abord lieu d'évaluer les performances des éléments d'une paroi séparément.

La performance du mur est donnée par sa valeur U , en $W/(m^2.K)$. Elle peut se calculer avec un calcul simple, selon la norme NBN EN ISO 6946. Les pertes de chaleur au travers le mur sont proportionnelles à la valeur U , à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur et à la surface du mur mesurée depuis l'extérieur.

La performance de la fenêtre est également donnée par sa valeur U_w , qui elle-même dépend des propriétés des composants de la fenêtre (vitrage, châssis, espaceur). Pour déterminer celles-ci, des procédures simplifiées existent, mais une valeur plus précise nécessite de recourir à des calculs numériques. Les pertes de chaleur au travers la fenêtre sont proportionnelles à sa valeur U_w , à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur et à la surface de la fenêtre.

Lorsqu'on calcule la performance de la paroi, on ne peut pas simplement additionner les pertes au travers du mur et celles au travers de la fenêtre, et ce pour deux raisons. Premièrement, la surface de la paroi n'est pas simplement égale à la somme des surfaces du mur et de la fenêtre. En effet, le mur peut recouvrir en partie la fenêtre. Or, ce recouvrement peut varier d'une paroi à l'autre, et n'est donc pas une information disponible lorsque le fabricant détermine la valeur U_w de sa fenêtre.



Lorsqu'on effectue le calcul des pertes à travers les parois, on considère les dimensions extérieures, soit $0.95 + 0.85 = 1.80$ m de mur et 1.1 m de fenêtre.

Lorsqu'on calcule la valeur U de la fenêtre, on prend la dimension de celle-ci, sans tenir compte du mur, soit 1.2 m.

Deuxièmement, il faut prendre en compte des pertes de chaleur supplémentaires dues à la jonction entre ces deux éléments¹. Pour cela, il convient de calculer un coefficient de déperditions thermique linéique Ψ , en $W/(m.K)$. Les pertes supplémentaires dues à cette jonction seront proportionnelles à sa valeur Ψ , à la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur et à la longueur de la jonction.

Cependant, cette séparation entre pertes surfaciques ($= U \cdot A$) et linéiques ($= \Psi \cdot l$) ne permet pas d'appréhender immédiatement l'importance de ces pertes supplémentaires. C'est pourquoi, une approche non orthodoxe sera également calculée : la perte de chaleur supplémentaire sera intégrée à la valeur U de la fenêtre.

Trois configurations seront étudiées :

- la fenêtre initiale ;
- la fenêtre rénovée par l'ajout d'une fenêtre avec simple vitrage ;
- la fenêtre rénovée par l'ajout d'une fenêtre avec double vitrage.

¹ Et, le cas échéant, les pertes de chaleur supplémentaires dues aux nœuds constructifs ponctuels.

3 Calculs numériques

3.1 Mur uniquement

Le mur est composé de 42.7 cm de briques et 2 cm de plâtre. La brique étant exposée à l'humidité, il convient d'utiliser la valeur λ_e . Cependant, l'expérience montre qu'il n'est pas réaliste d'appliquer cette valeur sur toute l'épaisseur. C'est pourquoi, la brique est scindée en 2 : la valeur λ_e est utilisée sur un tiers de l'épaisseur, la valeur λ_i sur deux tiers.

- Briques humides :
 - λ_e briques : 1.35 W/(m.K) (source : NBN B 62-002, Table A.3, $1900 < \rho \leq 2000$)
 - λ_e mortier : 1.55 W/(m.K) (source : NBN B 62-002, Table A.12, mortier de ciment)
 - fraction joint : 28% (source : NBN B 62-002, maçonnerie extérieures)
 - $\lambda_e = 1.35*(1-0.28) + 1.55 * 0.28 = 1.41$ W/(m.K)
- Briques sèches :
 - λ_i briques : 0.69 W/(m.K) (source : NBN B 62-002, Table A.3, $1900 < \rho \leq 2000$)
 - λ_i mortier : 1.00 W/(m.K) (source : NBN B 62-002, Table A.12, mortier de ciment)
 - fraction joint : 28% (source : NBN B 62-002, maçonnerie extérieures)
 - $\lambda_i = 0.69*(1-0.28) + 1.00 * 0.28 = 0.78$ W/(m.K)
- Plâtre : $\lambda_i = 0.56$ W/(m.K) (source : NBN EN ISO 10456, Tableau 3, plâtre 1500 kg/m³)
- Mortier (en contact avec le châssis extérieur) : λ_e mortier : 1.24 W/(m.K) (source : NBN B 62-002, Table A.12, mortier de chaux)

La valeur U du mur vaut donc : 1.49 W/(m².K).

3.2 Situation initiale

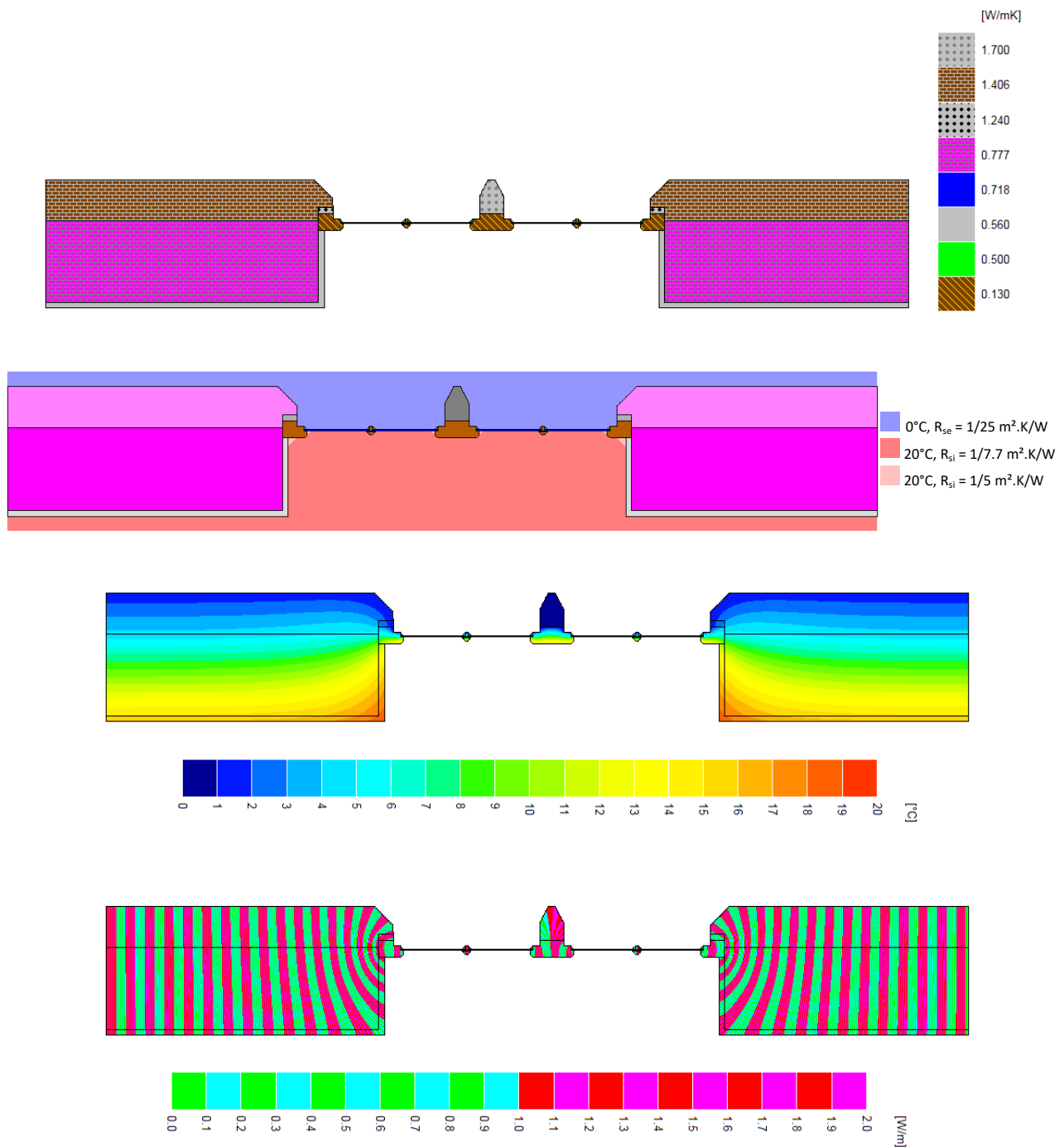
3.2.1 Calcul de la fenêtre d'origine et d'une portion de mur (en 2D)

La fenêtre d'origine et une portion de mur sont simulées dans BISCO, comme suit. A défaut d'information plus précise sur l'espèce de pin, on suppose $\lambda = 0.13 \text{ W}/(\text{m.K})$.

Les conductivités thermiques des autres éléments sont les suivantes :

- Pierre calcaire : $\lambda_e = 1.70 \text{ W}/(\text{m.K})$ (source : NBN B 62-002, Table A.2, Pierre calcaire ferme)
- Mastic extérieur (de nature inconnue) : $\lambda = 0.50 \text{ W}/(\text{m.K})$ (source : NBN EN ISO 10456, Tableau 3, Silicone, mastic)

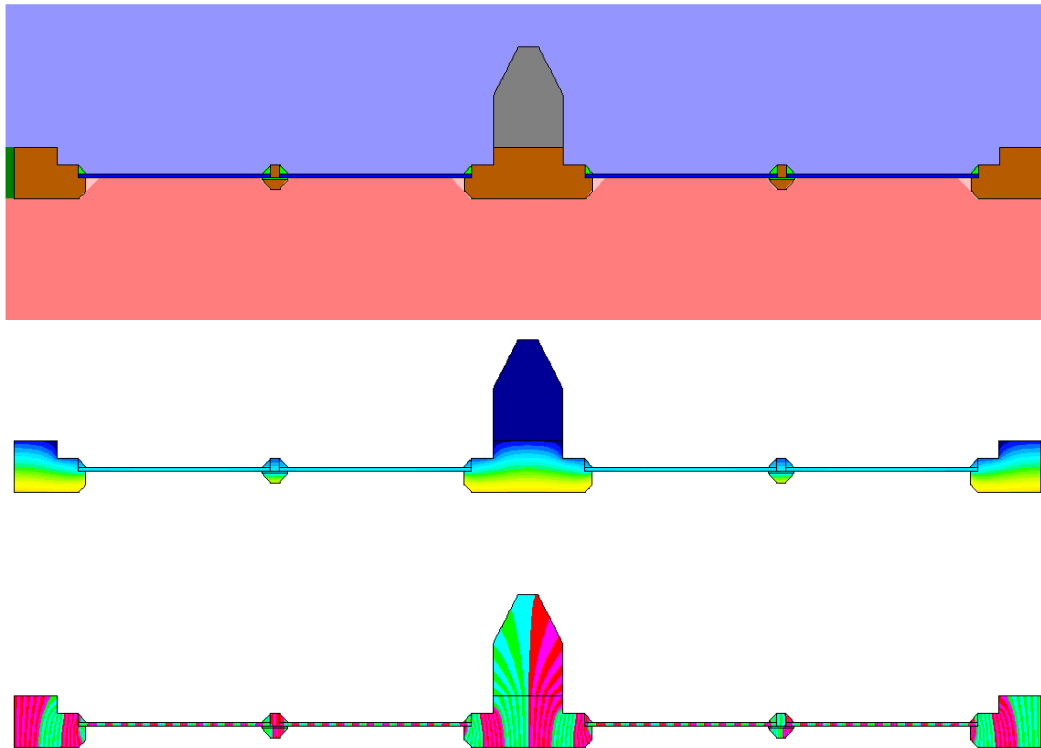
Les figures représentent les matériaux, les conditions aux limites, les champs de températures et de flux au travers du détail.



Pour une différence de températures de 20 K (et pour une hauteur de 1 m), les pertes à travers la fenêtre d'origine et la portion de mur valent 173 W.

3.2.2 Fenêtre d'origine uniquement

Le calcul est fait en ne considérant que la fenêtre d'origine uniquement. Le châssis bois est en contact avec des conditions adiabatiques (représentées en vert).



Pour une différence de températures de 20 K (et pour une hauteur de 1 m), les pertes à travers la fenêtre d'origine uniquement valent 112 W. La valeur U_w de la fenêtre (seule) vaut donc $4.7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

3.2.3 Fenêtre d'origine dans le mur

La valeur Ψ de la jonction mur/ fenêtre est calculée à partir des résultats mentionnés plus haut, comme suit :

$$\Psi = \frac{173}{20} - (1.49 * 1.89) - (4.7 * 1.10) = 0.713 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

L'intégration de ces pertes supplémentaires dans la valeur U de la fenêtre, selon l'approche non orthodoxe expliquée plus haut, se calcule comme suit :

$$U_w^* = \frac{170 - (1.49 * 1.89 * 20)}{(1.20 * 20)} = 4.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Rapportées à la surface de la fenêtre, les pertes supplémentaires dues à la jonction mur/ fenêtre sont limitées (+4%)².

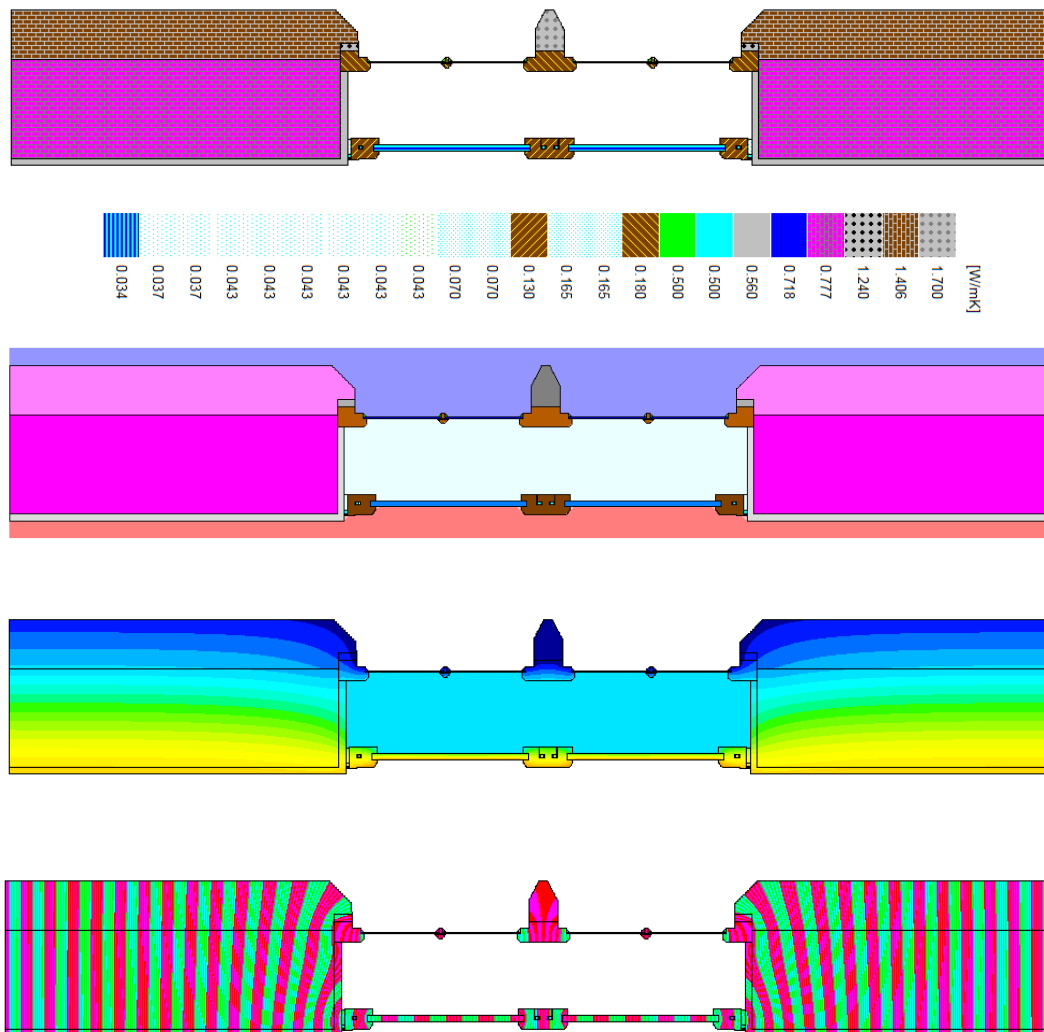
² Sur base des valeurs U_w non arrondies. Dans le rapport, les valeurs sont arrondies à deux chiffres significatifs, conformément à la norme NBN EN ISO 10077-1.

3.3 Situation rénovée avec un double vitrage

3.3.1 Calcul de la double fenêtre et d'une portion de mur (en 2D)

La double fenêtre et une portion de mur sont simulées dans BISCO, comme suit. A défaut d'information plus précise sur l'espèce de mérianti, on suppose $\lambda = 0.18 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Le silicone a une valeur $\lambda = 0.50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (source : NBN EN ISO 10456, Tableau 3, Silicone, mastic). Pour rappel, l'espaceur n'est pas simulé et le double vitrage est simulé comme une simple couche ayant une valeur λ telle que la valeur U_g du double vitrage vaille $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

Les petites cavités présentent dans les châssis selon la méthode de la conductivité thermique équivalente. L'espace entre les deux châssis est simulé comme une grande cavité (convection et rayonnement séparés).

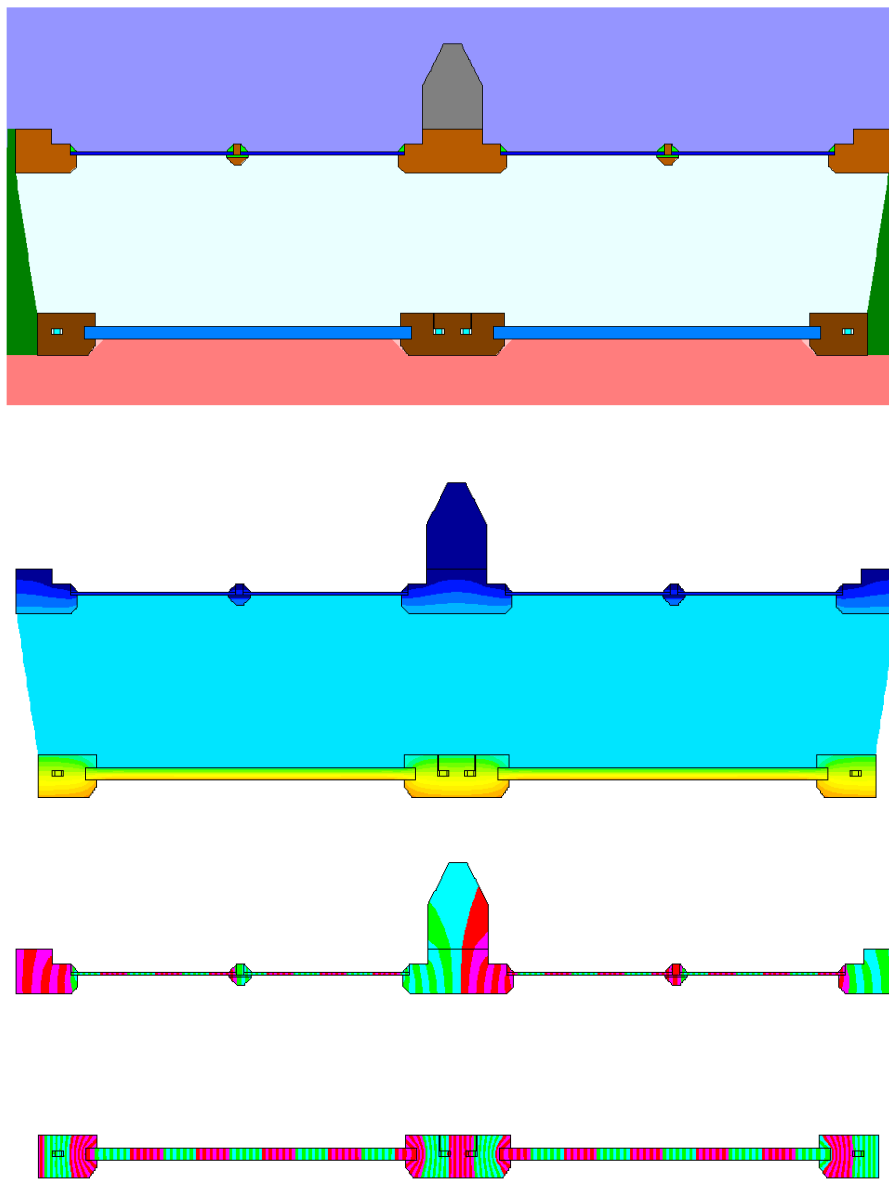


Pour une température extérieure de 0°C et une température intérieure de 20°C , (et pour une hauteur de 1 m), la température dans l'espace entre les deux vitrages est de 4.8°C et les pertes à travers la double fenêtre et la portion de mur valent 85 W.

La température d'air calculée dans l'espace entre les deux châssis peut être comparée avec les mesures réalisées durant la nuit du 30/04/2021. Pour des températures intérieure et extérieure de, respectivement, 23.1°C et 4.8°C , la température mesurée dans le vide était de 12.5°C . Pour des températures intérieure et extérieure de, respectivement, 20°C et 0°C , cela correspondrait à température d'air de 8.4°C . La température simulée est donc inférieure à la température mesurée. Il n'est pas évident de déterminer la raison de cette différence.

3.3.2 Double fenêtre uniquement

Le calcul est fait en ne considérant que la double fenêtre uniquement. Les châssis bois sont en contact avec des conditions adiabatiques (représentées en vert).



Pour une différence de températures de 20 K (et pour une hauteur de 1 m), les pertes à travers la double fenêtre uniquement valent 27 W. La valeur U_w de la double fenêtre (seule) vaut donc 1.1 W/(m².K).

Remarque

Cette valeur est quasi identique à la valeur qu'on trouve en faisant un simple calcul à partir des données des vitrages, et en considérant que la résistance thermique de la lame d'air vaut 0.18 m².K/W.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{5.7} - 0.13 + 0.18 + \frac{1}{1.5} - 0.04\right)} = 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$$

3.3.3 Double fenêtre dans le mur

La valeur Ψ de la jonction mur/ fenêtre est calculée à partir des résultats mentionnés plus haut, comme suit :

$$\Psi = \frac{85}{20} - (1.49 * 1.89) - (1.1 * 1.10) = 0.159 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

L'intégration de ces pertes supplémentaires dans la valeur U de la fenêtre, selon l'approche non orthodoxe expliquée plus haut, se calcule comme suit :

$$U_w^* = \frac{85 - (1.49 * 1.89 * 20)}{(1.20 * 20)} = 1.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Rapportées à la surface de la fenêtre, les pertes supplémentaires dues à la jonction mur/ fenêtre sont limitées (+3%).

3.4 Situation rénovée avec un simple vitrage

Les mêmes calculs sont réalisés que pour le cas précédent, en modifiant la valeur λ du vitrage intérieur pour correspondre à un simple vitrage (la géométrie n'est donc pas adaptée).

On obtient :

- Pertes au travers du détail, pour une différence de températures de 20 K (et pour une hauteur de 1 m) : 109 W.
- Température dans la cavité, si $t_{\text{ext}} = 0^\circ\text{C}$ et $t_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$: 7.9°C .
- $U_w = 2.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- $\Psi = 0.188 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- $U_w^* = 2.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

4 Conclusion

- Les valeurs U_w des fenêtres sont assez proches des valeurs U_g des (combinaisons de) vitrages considérés : les châssis bois ont peu d'impact. Pour rappel, les espaceurs sont négligés dans ces calculs.
- Les jonctions murs/fenêtres génèrent inévitablement des pertes de chaleur supplémentaires. Cependant, selon les calculs simplifiés 2D, l'impact de ces pertes supplémentaires est limité par rapport aux pertes de chaleur à travers la fenêtre. Cette conclusion est en partie due aux conventions de mesures des composants d'une paroi (mesure du mur selon les dimensions extérieures, donc en incluant le recouvrement de la fenêtre).
- Les calculs confirment les valeurs mesurées.