

Annexe relative au rapport final du mois d'octobre 2021

Guide d'information pour la mesure non destructive de la valeur U d'éléments de construction extérieurs



O. Sevim, Ferrara Architekten AG

Auteurs

Caroline Hoffmann, INEB, Haute Ecole spécialisée de la Suisse du Nord-Ouest

Achim Geissler, INEB, Haute Ecole spécialisée de la Suisse du Nord-Ouest

Cette étude a été réalisée sur mandat de SuisseEnergie.

Les auteurs sont seuls responsables de son contenu.

Sommaire

1.	Principes de mesure de la valeur U	5
1.1	Remarques préliminaires	5
1.2	Le principe de mesure	5
1.3	Instruments de mesure et composants.....	6
1.4	Calcul de la valeur U.....	8
1.5	Détermination de la validité de la mesure (ISO 9869-1).....	9
1.6	Détermination de l'incertitude de mesure	10
1.6.1	Description de la procédure de détermination de l'incertitude de mesure	10
1.6.2	Ajustement de l'incertitude de mesure en fonction d'appareils spécifiques	10
2.	Mesure sur place.....	12
2.1	Planification de la mesure.....	12
2.1.1	Saison et durée.....	12
2.1.2	Matériel nécessaire.....	12
2.1.3	Essai de mesure	12
2.1.4	Nombre de mesures	13
2.2	Mise en place de la mesure	13
2.2.1	Choix de l'emplacement de mesure	13
2.2.2	Fixation murale des sondes	13
2.2.2.1	Adhésifs et produits de contact.....	13
2.2.2.2	Plaque de flux thermique	14
2.2.2.3	Sonde de température d'air intérieur	14
2.2.2.4	Sonde de température surfacique intérieure	14
2.2.2.5	Sonde de température d'air extérieur	14
2.2.2.6	Sonde de température surfacique extérieure	15
2.2.3	Enregistrement des données.....	15
2.2.4	Contrôle de la mesure en cours.....	15
2.3	Consignes spécifiques à l'instrument	15
2.3.1	greenTEG gSKIN U-Value KIT [2]	16
2.3.2	Testo 635-2 U-Wert-Set [3].....	16
2.3.3	Ahlborn Almemo [1]	16
3.	Liste de contrôle pour les autorités aux fins de contrôle des mesures	17

4.	Table des abréviations	18
4.1	Variables	18
4.1	Indices.....	18
5.	Littérature	18

1. Principes de mesure de la valeur U

1.1 Remarques préliminaires

Le présent guide d'information a pour but de fournir des explications et des remarques afin d'aider les consultants en énergie, les physiciens du bâtiment et les experts de la branche à réaliser des mesures de la valeur U sur place. Le contenu se fonde sur un projet de recherche dans le cadre duquel des mesures de valeur U ont été réalisées sur place avec trois instruments de mesure différents et comparées avec des mesures réalisées en laboratoire. En complément, des simulations ont été effectuées et des produits de contact et adhésifs ont été testés pour la fixation des capteurs sur les éléments à mesurer. Les éléments examinés étaient des éléments de construction lourds et homogènes, raison pour laquelle les remarques se rapportent principalement à ce type d'élément. Le présent document se concentre sur l'application. Vous trouverez des informations détaillées sur le contexte et les conclusions ayant mené aux présentes recommandations dans le rapport final du projet.

Lorsque certaines expériences se rapportent directement à un instrument de mesure concret, le texte l'indique clairement.

1.2 Le principe de mesure

Le principe de mesure se base généralement sur la méthode dite « de paroi auxiliaire » qui consiste à mesurer la densité de flux thermique q en W/m^2 à l'aide d'une plaque de flux thermique directement sur la surface de l'élément. En complément, deux capteurs de température mesurent la température de l'air intérieur et de l'air extérieur. Pour compléter le tout, il est aussi possible d'enregistrer les températures surfaciques sur les faces intérieure et extérieure de l'élément. Il est donc aussi possible de déterminer le coefficient de transmission thermique à l'intérieur, h_{si} , et à l'extérieur, h_{se} (vous trouverez des informations ainsi qu'un débat critique sur le sujet dans le rapport final du projet). Certains instruments de mesure renoncent à la détection directe du flux thermique et calculent la valeur U en déterminant la température surfacique dans le local en supposant une valeur pour h_{si} . Le tableau 2 récapitule la manière dont la valeur U est calculée et avec quelles grandeurs de mesure disponibles.

Tous les principes de mesure ont une chose en commun : la valeur U obtenue doit varier le moins possible. Cette faible variation est garantie par la durée de la mesure et sur cette base, par le procédé de détermination utilisé lors de l'évaluation (voir section 1.5). Une condition préalable pour obtenir une mesure valable est la présence de conditions-cadres les plus constantes possible sur l'ensemble de la durée de la mesure. Par ailleurs, la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur doit être la plus importante possible (> 15 K). L'élément de construction doit être le plus homogène possible. Pour la mesure de la valeur U, on fixe les sondes de mesure (en fonction de l'instrument de mesure et de l'équipement, à l'intérieur et à l'extérieur) sur ou près de l'élément. La mesure dure au moins 72 heures. Elle est ensuite évaluée et sa validité est vérifiée.

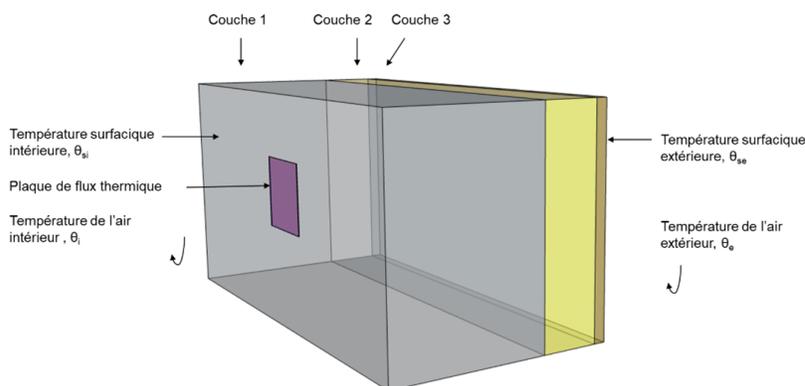


Fig. 1 : grandeurs de mesure pour la mesure de la valeur U.

1.3 Instruments de mesure et composants

Le Tableau 1 reprend l'équipement possible des instruments avec des sondes de mesure. Si la mesure des coefficients de transmission thermique n'est pas explicitement prévue, l'équipement suivant suffit pour l'instrument de mesure :

- Plaque de flux thermique
- Sonde température ambiante
- Sonde température de l'air extérieur

Attention : dans le cas de mesures effectuées avec une différence de température faible entre l'intérieur et l'extérieur (< 15 K), les valeurs U obtenues peuvent être significativement trop basses avec des instruments de mesure uniquement basés sur la température.

Les Fig. 2 à Fig. 4 montrent des exemples d'instrument de mesure de la valeur U. Elles permettent de visualiser le principe, sans toutefois être représentatives de l'aspect des instruments.

Tableau 1 : équipement possible des instruments de mesure de la valeur U sur place. Les sondes entre parenthèses sont nécessaires à la mesure des coefficients de transmission thermique.

	Cinq grandeurs de mesure	Trois grandeurs de mesure	Trois grandeurs de mesure (basées sur la température)
Exemple d'instrument	Almemo [1]	gSKIN U-Value KIT [2]	Testo 635-2 U-Wert-Set [3]
Fabricant	Ahlborn	greenTEG	Testo
Plaque de flux thermique (mesure la densité du flux thermique)	1	1	-
Sonde température surfacique intérieure, θ_{si}	(1)		3
Sonde température surfacique extérieure, θ_{se}	(1)	-	-
Sonde température intérieure proche du mur, θ_i	1	1	
Sonde température intérieure, θ_i , sur la fiche de sonde de l'instrument de mesure	-	-	1
Sonde température extérieure, θ_e	1	1	1

Connexion avec l'enregistreur de données :

De plus en plus souvent, les instruments proposés disposent d'une connexion radio. Le câblage n'est donc plus nécessaire, ce qui facilite grandement le travail quand il s'agit de passer dans des éléments de construction extérieurs surtout. Ces instruments présentent toutefois deux inconvénients auxquels il faut réfléchir : si l'énergie est alimentée en extérieur par une batterie, celle-ci peut rapidement se décharger, surtout s'il fait froid dehors. Sans oublier que la connexion radio peut causer des pertes de données si la connexion est interrompue.

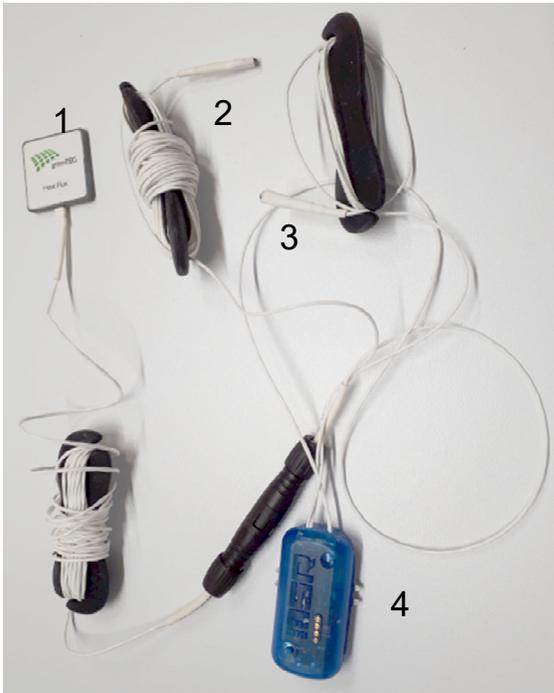


Fig. 2 : instrument de mesure de GreenTEG. 1 = plaque de flux thermique, 2 = sonde température extérieure, θ_e (câble de raccordement long), 3 = sonde température intérieure, θ_i , 4 = enregistreur de données.

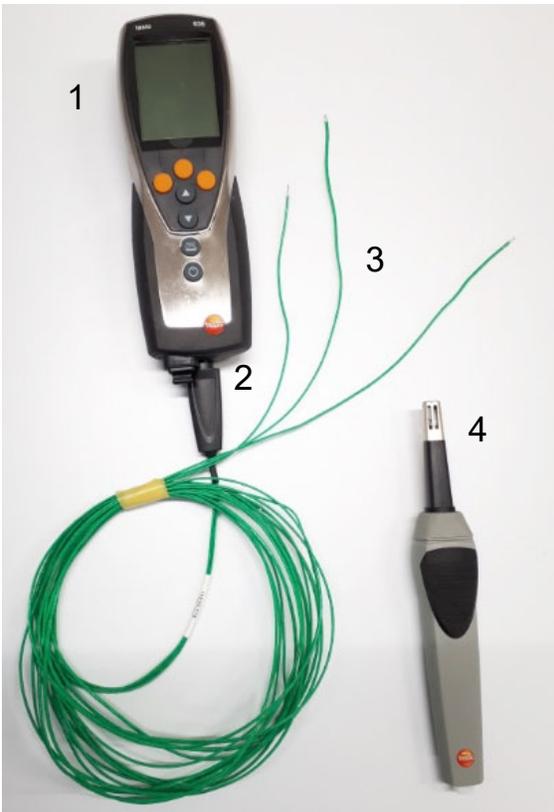


Fig. 3 : instrument de mesure de Testo. 1 = enregistreur de données, 2 = capteur sur la face inférieure de l'enregistreur de données pour la température intérieure, θ_i , 3 = trois sondes pour la température surfacique intérieure, θ_{si} , 4 = sonde radio température extérieure, θ_e .



Fig. 4 : instrument de mesure d'Ahlhorn : 1 = enregistreur de données, 2 = plaque de flux thermique, 3 = sonde température intérieure, θ_i , 4 = il faut connecter au moins encore une sonde pour la température extérieure, θ_e , (même aspect, non illustré).

1.4 Calcul de la valeur U

La plupart des instruments de mesure (y compris tous les instruments figurant dans le Tableau 1) émettent une valeur U directement à l'aide du logiciel fourni. L'utilisation directe des valeurs U obtenues doit être remise en question. En effet, la moyenne des valeurs mesurées est calculée différemment, voire pas du tout. Sans oublier que la validité de la mesure n'est pas donnée pour tous les instruments (à l'exception de GreenTEG) conformément aux critères cités dans la norme ISO 9869-1.

Pour calculer la valeur U à partir des grandeurs mesurées, il est possible d'utiliser les formules indiquées dans le

Tableau 2 en fonction de l'équipement des instruments de mesure.

Tableau 2 : possibilités de calcul de la valeur U en fonction de l'instrument de mesure ou des grandeurs de mesure enregistrées.

Source F1 : [4], source F2 : indications du fabricant Testo.

Formule	Désignation dans le texte	Almemo (Ahlborn)	gSKIN U-Value KIT (greenTEG)	Testo 635-2 U-Wert-Set (Testo)
$U = \frac{q}{\theta_i - \theta_e}$ (F1)	ValeurU_F1	✓	✓	✗
$U = h_{si} \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(\theta_i - \theta_e)}$ (F2)	ValeurU_F2	✓	✗	✓

avec :
 $h_{si} = 7,69 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

1.5 Détermination de la validité de la mesure (ISO 9869-1)

Une mesure de valeur U doit avoir pour résultat une valeur stable et pas une valeur instantanée. Pour s'en assurer, il faut appliquer l'« Average Method » telle que définie par la norme ISO 9869-1 [4] pour l'analyse des données. Dans cette méthode, on divise la somme des densités de flux thermique par la somme des différences de température. L'équation F3 correspond à une description formelle de la marche à suivre pour la ValeurU_F1. Ce type de calcul de la moyenne peut aussi être appliqué par analogie pour la ValeurU_F2¹.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (\theta_{ij} - \theta_{ej})} \text{ en } (W/(m^2 K)) \text{ (F3)}$$

Avec, pour une mesure dans un intervalle $[\tau_1 \dots \tau_n]$ avec n pas

- n le nombre de mesures / pas pendant la période observée
- j l'indice de la mesure à l'instant τ_j
- θ_{ij}, θ_{ej} la température d'air intérieur ou extérieur en (°C) à l'instant τ_j
- q_j la densité de flux thermique en W/m^2 à l'instant τ_j

Cette approximation ne vaut que si les conditions-cadres sont quasi-constantes selon [4] :

- Contenu thermique quasiment identique de l'élément de construction sur toute la période d'enregistrement des données ; cela signifie des variations de température les plus faibles possible ainsi qu'une teneur en humidité constante.
- La plaque de flux thermique et les sondes de température ne sont pas exposées aux rayons directs du soleil ; par principe, il faudra privilégier une orientation pleine Nord pour les mesures. Dans ce cas, aucun rayon à ondes courtes direct ne pénètre normalement dans le local, même par la fenêtre. Le cas échéant, verrouiller la porte d'accès au local « de mesure ».
- La conductivité thermique de l'élément de construction est constante ; cette condition est en général garantie sur les matériaux courants du commerce. Les couches d'air ou les matériaux spécifiques comme les PCM par exemple peuvent toutefois être sources d'incertitudes.

Pour les éléments moyennement lourds et lourds avec une capacité thermique surfacique spécifique de $c' > 20 \text{ kJ}/(m^2 K)^2$, la durée de calcul de la moyenne utilisée pour l'analyse est toujours égale à un multiple de 24 h. La mesure peut être stoppée ou considérée comme valide lorsque les trois critères d'arrêt cités dans [4] sont remplis :

1. Durée minimum 72 h,
2. La valeur mesurée (valeur U) à la fin de la mesure ne dévie de pas plus de $\pm 5 \%$ de la valeur mesurée 24 h avant,
3. La valeur mesurée obtenue pendant les deux premiers tiers de la période d'analyse ne dévie de pas plus de $\pm 5 \%$ de la valeur des deux derniers tiers de la période d'analyse.

Cette détermination de la validité de la mesure est fortement conseillée. Si elle n'a pas lieu, il faut impérativement le mentionner dans le rapport. Si l'on indique par exemple la valeur U émise par l'instrument et si la moyenne des résultats de la mesure n'est pas calculée conformément à la norme ISO 9869-1, l'on obtient des variations de la valeur U mesurée de l'ordre de -5% à $+15 \%$. L'utilisation de la dernière moyenne de la journée à la place de la valeur U pondérée conformément à la norme aussi peut engendrer des écarts considérables (de l'ordre de -4% à $+28 \%$).

L'instrument de mesure de la société greenTEG détermine la validité de la mesure conformément à la norme ISO 9869-1 parallèlement à l'enregistrement des données. Selon l'état actuel, cette détermination de la validité doit être effectuée par l'utilisateur pour les instruments de mesure des autres fabricants.

¹ $U = h_{si} \frac{\sum_{j=1}^n (\theta_{ij} - \theta_{sij})}{\sum_{j=1}^n (\theta_{ij} - \theta_{ej})}$ en $(W/(m^2 K))$ (F4)

² Rien n'indique si cette valeur vaut avec ou sans résistances de transmission thermique. Indépendamment de cela, cette valeur est largement dépassée avec les constructions massives courantes.

1.6 Détermination de l'incertitude de mesure

Pour déterminer l'incertitude de mesure à ajouter obligatoirement à la valeur U mesurée, nous vous conseillons la procédure décrite dans la norme ISO 9869-1 [4]. Dans la suite, cette procédure est d'abord décrite, puis la section explique comment ajuster l'incertitude de mesure de manière spécifique à un instrument. L'incertitude de mesure totale est composée des incertitudes de l'instrument et de l'incertitude liée à l'installation de cet instrument. Vient aussi s'y ajouter la méthode de calcul utilisée.

1.6.1 Description de la procédure de détermination de l'incertitude de mesure

L'incertitude de mesure totale se compose des facteurs suivants conformément à la norme ISO 9869-1 (les chiffres cités sont repris de [4]) :

- (1) Précision d'étalonnage de la plaque de flux thermique et des
- (2) capteurs de température : au total 5 % de la valeur mesurée pour les capteurs bien étalonnés
- (3) Variations dues aux différences de contact thermique entre mur et plaque de flux thermique : 5 % de la valeur mesurée pour une plaque de flux thermique installée minutieusement. Peuvent être réduites en utilisant plusieurs plaques de flux thermique.
- (4) Erreur opérationnelle de la plaque de flux thermique à la condition que celle-ci soit prise en compte dans l'évaluation par le biais d'un facteur de correction. Le facteur de correction peut être ignoré si la plaque de flux thermique est très fine et dispose d'une résistance thermique faible. Incertitude restante : 2 à 3 % de la valeur mesurée
- (5) Erreur due aux fluctuations de température et de flux thermique pendant la durée de la mesure. Quand l'on choisit des critères d'arrêt adaptés (voir section 0 à cet effet), elle est égale à environ ± 10 % de la valeur mesurée. Pour la réduire, on peut prolonger la période de la mesure et garantir des températures ambiantes intérieures les plus stables possible.
- (6) Différences de température dans le local et différences entre température de l'air et température de rayonnement : 5 % de la valeur mesurée.

Si les conditions précitées sont remplies, l'incertitude de mesure est comprise entre

$$\sqrt{5^2 + 5^2 + 3^2 + 10^2 + 5^2} \% = 14 \% \text{ et } (5+5+3+10+5) \% = 28 \% \text{ selon la norme et si les instruments sont de bonne facture et la mesure réalisée minutieusement.}$$

Sur certains instruments de mesure, cette incertitude peut aussi être inférieure (voir chapitre 1.6.1). L'on calcule l'incertitude de mesure avec la racine de la somme des carrés en partant du principe que les différentes incertitudes sont indépendantes les unes des autres et sont de nature aléatoire. La somme arithmétique permet de calculer l'incertitude de mesure maximale [5].

1.6.2 Ajustement de l'incertitude de mesure en fonction d'appareils spécifiques

Les chiffres cités dans [4] pour les incertitudes peuvent être remplacés par des valeurs spécifiques à l'instrument le cas échéant. Ces valeurs sont spécifiées dans la documentation du fabricant. Vous trouverez ci-après un exemple de détermination de l'incertitude de mesure pour les trois instruments de mesure cités dans le Tableau 1. Les chiffres se rapportent à la liste du chapitre 1.6.1 précédent.

- (1) Précision d'étalonnage de la plaque de flux thermique :
 - a. Ahlborn : 5 % de la valeur mesurée,
 - b. greenTEG : 3 % de la valeur mesurée,
 - c. Testo : plaque de flux thermique inexistante.
- (2) Précision d'étalonnage des capteurs de température (à 20 °C) :
 - a. Ahlborn : 0,4 % de la valeur mesurée,
 - b. greenTEG : 2,5 % de la valeur mesurée,
 - c. Testo : 1,5 % de la valeur mesurée.
- (3) Variations dues aux différences de contact thermique entre mur et sondes de température ou plaque de flux thermique : 5 %, est appliqué parce que la mesure a (généralement) toujours lieu avec une seule plaque de flux thermique.
- (4) Erreur opérationnelle du capteur de flux thermique : celle-ci est causée par une perturbation du flux thermique de la surface du mur par le capteur de flux thermique lui-même. Si le capteur de flux thermique est très fin et si la résistance thermique du capteur est très faible, l'erreur peut

être ignorée (l'épaisseur n'est pas précisée. On part du principe que les instruments utilisés dans le projet satisfont à cette exigence). Dans tous les autres cas, il faut estimer l'erreur opérationnelle et corriger les données (pour des indications à ce sujet, reportez-vous à la norme ISO 9869-1 ; nous recommandons de contacter le fabricant). Après une correction des données, il reste une incertitude de : 2 à 3 %. On peut partir du principe que l'erreur opérationnelle des capteurs de flux thermique actuels est très faible. Sans correction des données mesurées, on part du principe d'une incertitude de 2 %. Chez Testo, cette valeur est ignorée à cause de l'absence de capteur de flux thermique.

- (5) Erreur due aux fluctuations de température et de flux thermique pendant la durée de la mesure : ± 10 % de la valeur mesurée, est appliquée.
- (6) Différences de température dans le local et différences entre température de l'air et température de rayonnement : 5 %, est appliqué étant donné qu'on n'utilise pas de bouclier anti-rayonnement.

Les incertitudes (1) et (2) sont clairement attribuables à l'instrument utilisé, (3) dépend, du moins en partie, aussi de l'installation. L'incertitude (4) doit soit être estimée, soit être définie clairement par le fabricant de la plaque de flux thermique. Les sources d'incertitude (5) et (6) quant à elles sont largement attribuables aux conditions-cadres régnant pendant la mesure. (5) ne peut pratiquement pas être influencé et (6) peut être partiellement réduit par l'utilisation d'un bouclier anti-rayonnement.

Si l'on part du principe que les différentes incertitudes citées sont indépendantes les unes des autres et de nature aléatoire et qu'il n'y a pas d'erreurs systématiques, l'on obtient les incertitudes de mesure suivantes pour les instruments utilisés, les instruments installés et finalement la mesure elle-même en se basant sur l'approche selon [4].

(1) et (2) sont pris en compte pour les instruments et l'on obtient les **incertitudes d'instrument** suivantes.

$$\begin{aligned} \text{Ahlborn} &: \sqrt{5^2 + 0.4^2} &= 5,0 = 5 \% \\ \text{greenTEG} &: \sqrt{3^2 + 2.5^2} &= 3,9 = 4 \% \\ \text{Testo} &: \sqrt{1.5^2} &= 1,5 = 2 \% \end{aligned}$$

En incluant l'incertitude liée à l'installation, l'on obtient l'incertitude totale suivante pour les **instruments installés** en tenant compte de (3) (y compris (1) et (2)).

$$\begin{aligned} \text{Ahlborn} &: \sqrt{5^2 + 0.4^2 + 5^2} &= 7,1 = 7 \% \\ \text{greenTEG} &: \sqrt{3^2 + 2.5^2 + 5^2} &= 6,3 = 6 \% \\ \text{Testo} &: \sqrt{1.5^2 + 5^2} &= 5,2 = 5 \% \end{aligned}$$

Les résultats obtenus présentent finalement les **incertitudes de mesure totales** suivantes en tenant compte de (4), (5) et (6), (y compris (1), (2) et (3)).

$$\begin{aligned} \text{Ahlborn} &: \sqrt{5^2 + 0.4^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2} &= 13,4 = 13 \% \\ \text{greenTEG} &: \sqrt{3^2 + 2.5^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2} &= 13,0 = 13 \% \\ \text{Testo} &: \sqrt{1.5^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2} &= 12,3 = 12 \% \end{aligned}$$

Dans ces incertitudes totales, on peut remplacer les incertitudes des instruments de mesure (deux premiers points) en tenant compte des instruments de mesure dans les **méthodes de calcul** et en suivant la liste ci-dessous. Dans ce cas, on tient compte des grandeurs de mesure et de la quantité de grandeurs de mesure utilisées dans la formule de calcul de la valeur U (avec l'incertitude associée).

$$\begin{aligned} \delta F_{1m, \text{Ahlborn}} &= 0,06 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) &= 5 \%, \\ \delta F_{1m, \text{greenTEG}} &= 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) &= 4 \%, \\ \delta F_{2m, \text{Ahlborn}} &= 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) &= 3 \% \text{ et} \\ \delta F_{2m, \text{Testo}} &= 0,14 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) &= 12 \%. \end{aligned}$$

Plus le nombre de grandeurs de mesure utilisées dans la formule de calcul augmente (et donc aussi le nombre d'incertitudes), plus le résultat est incertain. L'**incertitude totale de la mesure en tenant compte de la méthode de calcul en cas d'utilisation des instruments de mesure cités** est la suivante :

$$\text{Ahlborn, F1 : } \sqrt{5^2 + 5^2 + 2 + 10^2 + 5^2} = 13 \%$$

$$\text{Ahlborn, F2 : } \sqrt{3^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2} = 13 \%$$

$$\text{greenTEG, F1 : } \sqrt{4^2 + 5^2 + 2^2 + 10^2 + 5^2} = 13 \%$$

$$\text{Testo, F2 : } \sqrt{12^2 + 5^2 + 10^2 + 5^2} = 17 \%$$

Ce résultat, ou le résultat modifié en cas d'utilisation d'un autre instrument, doit être joint à l'indication de la valeur U mesurée comme incertitude totale de la mesure, avec la méthode de calcul comprise. Généralement en indiquant <Valeur mesurée> ± x %, ou comme barre d'erreur positive ou négative dans le cas d'un graphique.

2. Mesure sur place

2.1 Planification de la mesure

2.1.1 Saison et durée

La différence de température entre l'intérieur et l'extérieur doit être la plus grande possible. Une bonne valeur de référence est de 15 K au moins et dans l'idéal 20 K. Plus la différence de température est faible, plus les valeurs U sont généralement variables. Une mesure valide sera donc plus difficile à obtenir. Dans le cas de différences de température faibles (< 15 K), les instruments de mesure basés sur la température peuvent dans certains cas ne pas autoriser de résultat de mesure fiable.

La durée minimum dans des conditions de mesure idéales est de 72 heures. Nous vous conseillons toutefois de prévoir une durée de mesure supérieure (comme par ex. une semaine si la validité peut être contrôlée pendant la mesure), car il est possible de ne pas obtenir de mesure valide au bout de 72 heures. Pour les instruments de mesure qui n'affichent pas la validité conformément à la norme pendant la mesure, il faudra évaluer la mesure directement sur place avant de l'interrompre ou choisir une période de mesure suffisamment longue (env. 10 jours). Dans le pire des cas, et même en appliquant la dernière marche à suivre, il est possible de ne toujours pas obtenir de mesure valide.

2.1.2 Matériel nécessaire

En plus de l'instrument de mesure, vous aurez besoin du matériel suivant pour la mesure:

- Matériel de fixation pour les sondes de mesure (voir section 2.2.2)
- Si une mesure de la température surfacique est prévue : Ruban adhésif en cuivre et un morceau d'env. 2 cm x 2 cm x 1 cm d'EPS (ou un isolant similaire)
- Bouclier pour les sondes de température de l'air extérieur (voir section 2.2.2)
- Possibilité de fixer les sondes de température d'air extérieur à une distance d'env. 20 cm du mur extérieur (par ex. cintre en métal)

2.1.3 Essai de mesure

Si l'instrument de mesure est mis en service pour la première fois ou après une pause prolongée, nous vous recommandons d'effectuer un essai de mesure pour vérifier son bon fonctionnement. Cette opération est en particulier préconisée si la mesure sur place ne peut avoir lieu que durant une période prédéfinie et qu'il ne faut donc pas d'erreurs. Après une pause prolongée, il faut vérifier la validité de l'étalonnage à temps avant la date de la mesure.

2.1.4 Nombre de mesures

La mesure devra si possible être répétée à plusieurs endroits sur l'élément de construction pour éviter les effets du hasard. Dans l'idéal dans des conditions-cadres identiques, à savoir avec plusieurs instruments de mesure (avec la même construction) en même temps.

2.2 Mise en place de la mesure

2.2.1 Choix de l'emplacement de mesure

L'emplacement de mesure doit si possible présenter les caractéristiques suivantes :

- La température dans le local doit être la plus constante possible. Dans l'idéal, le local est chauffé pendant la mesure, mais pas utilisé (il faut éviter d'aérer en ouvrant les fenêtres).
- Le mur ne doit pas être humide.
- La face extérieure ne doit pas être exposée au soleil si possible. Une orientation Nord est donc à privilégier
- La face extérieure doit être accessible car l'on y installe les sondes de température d'air extérieur (et éventuellement aussi la sonde de température surfacique). En fonction de l'instrument de mesure utilisé, les sondes de température d'air extérieur et l'enregistreur de données sont reliés par un câble.
- L'emplacement de mesure à l'intérieur ne doit pas se trouver au-dessus d'un radiateur et être à au moins 1 m des fenêtres et du coin du local, du sol et du plafond (ou d'autres ponts thermiques) (voir Fig. 5).

Si vous disposez d'une caméra thermique, il peut être judicieux d'examiner le mur pour déceler d'éventuelles irrégularités (par ex. joints, changement de matériau, montant en métal sous la couche de crépi) sur le mur.

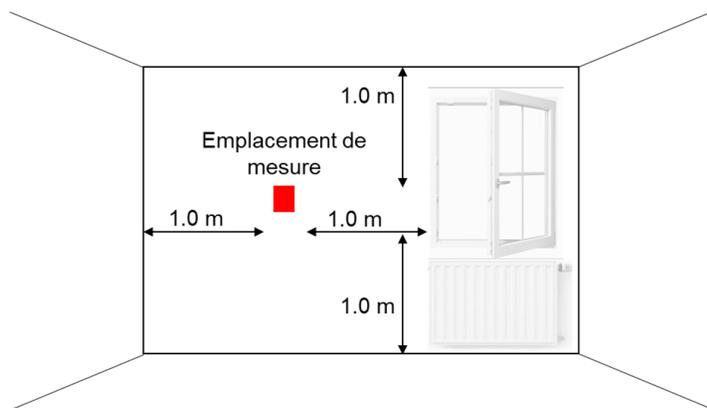


Fig. 5 : exigences posées à l'emplacement de mesure de la valeur U.

2.2.2 Fixation murale des sondes

La technique de mesure doit être fixée à la même hauteur environ à l'intérieur et à l'extérieur.

Même si le travail est réalisé minutieusement, il se peut que la fixation des sondes laisse des taches sur le mur. Il faut donc essayer de mesurer à un endroit où les taches ne seront pas gênantes ou importent peu (par ex. décrocher un tableau pendant la durée de la mesure ou déplacer un petit meuble).

2.2.2.1 Adhésifs et produits de contact

Exemple d'adhésifs qui ne laissent généralement pas de traces sur les surfaces lisses et adhèrent bien :

- Scotch 244 High Precision (ruban adhésif une face)
- Ruban adhésif pour peintres Tesa Profi-Malerband « intérieur » (ruban adhésif une face)
- Strips 3M Command (ruban adhésif double face, ne tient pas sur toutes les surfaces)

Exemple d'adhésifs qui ne laissent généralement pas de traces sur les surfaces rugueuses et adhèrent bien :

- « Putty », sté greenTEG (mastic d'adhérence/de contact souple de couleur crème)

- « Blue-Tack », sté Bostik (mastic d'adhérence/de contact moyennement dur et bleu clair)
- « UHU Patafix » (mastic d'adhérence/de contact blanc moyennement dur)

Dans le cas des mastics d'adhérence et de contact, des taches mineures d'huile et de petits grumeaux peuvent rester dans le crépi. Les grumeaux peuvent être éliminés en tamponnant avec une bille réalisée dans la même matière.

Par principe, l'on se rend immédiatement compte si les produits cités adhèrent ou pas. S'ils collent bien au mur dès le début, cela restera généralement le cas pendant la durée de fixation souhaitée.

La pâte thermique peut être essuyée avec précaution après la mesure des capteurs en utilisant du « Sterilium classic pur » (désinfectant disponible dans le commerce, regraissant). Avant de l'essuyer, tester d'abord dans un angle du capteur pour voir la surface du capteur n'est pas attaquée par le produit. L'acétone (dissolvant) attaque de nombreuses surfaces.

2.2.2.2 Plaque de flux thermique

Si le mur peut supporter des taches :

- Nous vous recommandons par principe de fixer la plaque de flux thermique au mur avec de la pâte thermique. Pour ce faire, on applique une couche de pâte thermique assez épaisse sur le dos de la plaque de flux thermique pour que la plaque soit contre le mur sur toute la surface. Il ne doit pas y avoir de bulles d'air entre le mur et la plaque. En complément, il faut bloquer la plaque au niveau des coins ou sur tout le tour avec du ruban adhésif.

Si le mur ne supporte pas de taches :

- Sur les surfaces lisses, on peut poser directement la plaque de flux thermique sur le mur et la bloquer sur tout le tour avec du ruban adhésif.
- Sur les surfaces rugueuses, on peut utiliser du « Putty ».

Selon des calculs de simulation, le potentiel d'incertitude lié à un adhésif ou un produit de contact conduisant mal la chaleur est de 2 % maximum par rapport à un produit de contact thermoconducteur en sous-évaluant la valeur U et reste donc plutôt faible.

Concernant la marche à suivre pour les mesures, on peut donc en déduire la recommandation suivante : pour éviter les erreurs dues à des bulles d'air emprisonnées entre la sonde de mesure et la surface du mur (cette erreur n'a pas été simulée), il faut à chaque fois que possible utiliser de la pâte thermique. Si les taches sur le mur ne sont pas admissibles, on peut renoncer à la pâte thermique sur les surfaces lisses sans augmenter l'incertitude. Dans le cas de surfaces rugueuses, il faudra utiliser du « Putty » ou, si c'est impossible, augmenter l'incertitude supposée (3).

2.2.2.3 Sonde de température d'air intérieur

La sonde doit se trouver à au moins 10 cm de distance de la surface du mur. Les câbles de mesure rigides (par ex. au niveau des thermocouples) peuvent être courbés comme nécessaire. Pour les sondes avec des câbles flexibles, on peut former une fixation en fil.

2.2.2.4 Sonde de température surfacique intérieure

Recouvrir la tête de sonde d'un petit morceau de ruban adhésif en cuivre, en option mais à recommander avec un dé d'env. 2 x 2 cm² d'EPS d'un centimètre d'épaisseur et coller le tout avec du ruban adhésif une face (voir Fig. 8).

2.2.2.5 Sonde de température d'air extérieur

Les sondes de température d'air extérieur doivent toujours être installées à l'ombre avec un bouclier anti-rayonnement.

Les sondes doivent se trouver à 20 cm minimum du mur. Comme bouclier anti-rayonnement, l'idéal est d'utiliser des boîtiers de protection courants pour capteurs de température/stations météo. En alternative, on peut aussi découper de petits pots de fleurs en plastique, des pots de yogourt ou des bouteilles en PET à la bonne dimension, les habiller de film aluminium et les enfiler sur le capteur (voir Fig. 6 et Fig. 7). Le capteur doit se trouver dans l'enveloppe de protection et ne pas la toucher. Il faut veiller à une aération suffisante (doter le fond d'ouvertures).

Le positionnement derrière des volets n'est pas recommandé parce qu'un coussin d'air chaud probablement présent à cet endroit fausserait la température de l'air extérieur.



Fig. 6 : boîtier de protection pour les sondes de température extérieure.

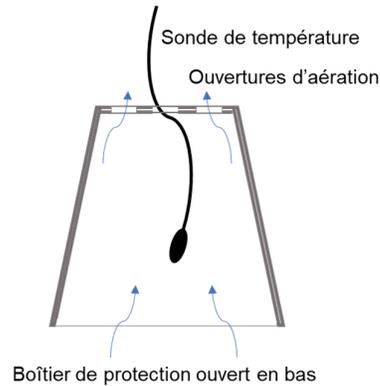


Fig. 7 : schéma boîtier de protection.

2.2.2.6 Sonde de température surfacique extérieure

La sonde ne doit pas être fixée sur un mur ensoleillé. Recouvrir la tête de sonde d'un petit morceau de ruban adhésif en cuivre, couvrir avec un dé d'env. 2 x 2 cm² d'EPS d'un centimètre d'épaisseur et coller le tout avec du ruban adhésif une face (voir Fig. 9).

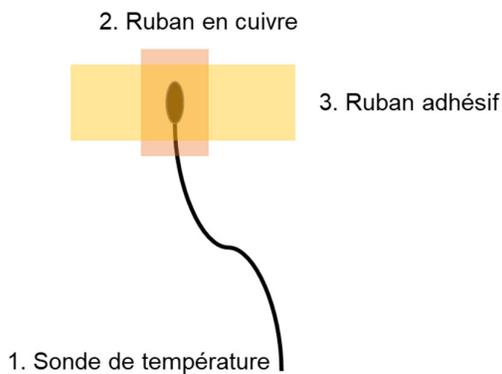


Fig. 8 : fixation sonde de température surfacique intérieure.

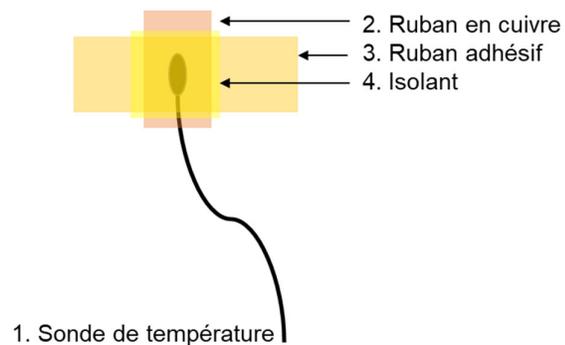


Fig. 9 : fixation sonde de température surfacique extérieure.

2.2.3 Enregistrement des données

Les instruments de mesure actuels sont le plus souvent équipés d'un enregistreur de données indépendant de tout ordinateur. Pour commander l'appareil et lire les données, on branche l'enregistreur à un PC. Si vous utilisez des ordinateurs avec des versions anciennes de Windows comme calculateurs de mesure, nous vous conseillons de vérifier la compatibilité.

Un enregistrement et une sauvegarde des données mesurées toutes les 10 minutes suffisent.

2.2.4 Contrôle de la mesure en cours

Contrôler les mesures au bout de 24 h pour savoir si l'enregistrement des données fonctionne.

2.3 Consignes spécifiques à l'instrument

Les astuces suivantes se rapportent à la génération et/ou la version d'instruments et de programmes utilisées dans le projet. Les éventuelles optimisations ou modifications mises en place depuis par les fabricants n'ont pas été prises en compte.

2.3.1 greenTEG gSKIN U-Value KIT [2]

- S'assurer que l'étalonnage de la plaque de flux thermique figure bien dans le logiciel.
- S'assurer que l'enregistreur de données est chargé.

2.3.2 Testo 635-2 U-Wert-Set [3]

- Concernant la durée de fonctionnement de sa batterie, l'instrument n'est par défaut pas conçu pour des mesures longue durée sur plusieurs jours. Le fabricant conseille d'utiliser un bloc d'alimentation (accessoire) dans ce cas.
- La sonde radio a une fonction marche/arrêt. Pour la désactiver, le curseur à gauche dans le compartiment de la batterie doit être dans la position indiquée (voir Fig. 10, flèche verte). Dans l'instrument de mesure aussi, il y a une fonction marche/arrêt. Nous vous conseillons de désactiver cette fonction et, en même temps, la fonction marche/arrêt dans le logiciel de l'instrument (si l'instrument est commandé par un PC pendant la mesure).
- Valeur U obtenue : calcul de la valeur U pour chaque pas de temps. Aucun test selon ISO 9869-1 n'a lieu.



Fig. 10 : curseur pour désactiver la fonction marche/arrêt (flèche verte) sur l'instrument de mesure de Testo.

2.3.3 Ahlborn Almemo [1]

- Valeur U obtenue : calcul d'une valeur U expérimentale (ValeurU_F2) pour chaque pas, puis moyenne de cette valeur U. Pas de test selon ISO 9869-1.

3. Liste de contrôle pour les autorités aux fins de contrôle des mesures

Cette liste de contrôle a pour but de vérifier la minutie et la qualité mises en œuvre pour la mesure de la valeur U. La vérification de la plausibilité des valeurs mesurées fait partie de l'évaluation. Il pourrait par exemple s'agir d'un calcul des valeurs U attendues sur les constructions supposées.

Thème		Commentaire / aide
Documentation	Données relatives à l'élément mesuré (emplacement sur l'ouvrage, emplacement de mesure, orientation, but de la mesure, type d'élément, épaisseur, structure)	Orientation de l'élément vers la face Nord, ou mur entièrement à l'ombre, distance par rapport aux ponts thermiques ou sources de chaleur (radiateurs) visibles > 1 m; éventuellement remarque expliquant pourquoi une condition ne peut pas être remplie et comment elle est gérée (par ex. augmentation de l'incertitude); informations, voir chapitre 2.1.1
	Différence entre température intérieure et température extérieure	Sur les instruments de mesure basés sur la température, les mesures doivent si possible avoir lieu à une différence de température d'au moins $\Delta\theta > 15$ K entre l'intérieur et l'extérieur (hiver); sur les appareils avec plaque de flux thermique, cette valeur peut être inférieure. Informations, voir chapitre 2.1.1
	Indication de la période de mesure	
	Intervalle d'enregistrement des données	≤ 30 minutes, se poser des questions en cas d'intervalle ≥ 60 minutes; informations, voir chapitre 2.2.3
	Durée de la mesure (au moins ≥ 72 h) pour assurer la validité selon ISO 9869-1	Les mesures plus courtes sans justification claire doivent être refusées, informations, voir chapitre 0
	Contrôle de la validité de la mesure selon ISO 9869-1	Recommandation: doit être compris et rempli; informations, voir chapitre 0
	Estimation de l'incertitude de mesure	Recommandation: doit être comprise; informations, voir chapitre 1.6
Mise en place de la mesure	Capteur de température extérieur pourvu d'un bouclier anti-rayonnement?	Recommandé; informations, voir chapitre 2.2.2.5
	Distance entre capteur de température extérieur (20 cm minimum env.) et intérieur (10 cm minimum env.) et mur?	Recommandé; informations, voir chapitre 2.2.2

4. Table des abréviations

4.1 Variables

ε = émissivité

h = coefficient de transmission thermique (W/m^2K)

λ = conductivité thermique ($W/(m K)$)

q = densité de flux thermique (W/m^2); grandeur obtenue avec la plaque de flux thermique

R = résistance à la transmission thermique ($m^2 K/W$)

RT = résistance thermique ($m^2 K/W$)

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 K^4)$)

θ = température ($^{\circ}C$)

θ_i = température ambiante intérieure ; selon la définition de la valeur U sur la base de la température de l'air, on utilise dans ce cas la température de l'air (pour des détails, voir [4], 4.2 & annexe A) ($^{\circ}C$)

T = température (K)

U = coefficient de transmission thermique ($W/(m^2 K)$)

Λ = conductivité thermique ($W/(m^2 K)$) = $q/(\theta_{si} - \theta_{se})$

W = flux thermique en (W)

4.1 Indices

c = convectif

e = extérieur

i = intérieur

r = rayonnement, longues ondes (radiatif)

s = simulation

si = surface intérieure

se = surface extérieure

5. Littérature

- [1] Ahlborn, "Wärmeflussplatte (Typ 117), Thermodratfühler (NiCr-Ni) Datenlogger Almemo 809 (V7)," 2018.
- [2] greenTEG, "gSKIN KIT-2615C calibrated (U-Value Kit)," 2018.
- [3] Testo, "Feuchte-/Temperatur-Messgerät mit Messwertspeicher, Testo 635-2," 2018.
- [4] ISO 9869-1, *Thermal insulation - Building elements - In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method*. 2014.
- [5] J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd ed. Melville: University Science Books, 1997.