In-situ-Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrades von Verglasungen

Erfahrungen zu g-Wert-Messungen



1

Autoren
Thomas Wüest, Daniel Plörer, Susanne Gosztonyi, Institut für Bauingenieurwesen, HSLU T&A
Christoph Zumbühl, Raphael Kummer, Institut für Elektrotechnik, HSLU T&A

Foto
S. Gosztonyi

1 In-situ g-Wert Messgerät der HSLU im Einsatz
Instrument pour mesurer la valeur g de la HSLU en action (appareil noire) et les deux pyranomètres extérieurs et intérieurs

Der erste Teil dieser Serie (Fassade 1-2026) stellte das Messprinzip und den Aufbau eines neu entwickelten In-situ-Messgeräts zur Bestimmung des g-Werts eingebauter Verglasungen vor. Dieser Beitrag erläutert nun, wie die Messdaten mithilfe eines digitalen Zwillings ausgewertet und daraus belastbare g-Werte bestimmt werden. Zudem werden zentrale Randbedingungen und Grenzen des Verfahrens eingeordnet. Am Beispiel einer modernen Dreifachverglasung werden die Methodik und der Vergleich der Ergebnisse mit den deklarierten Datenblattwerten veranschaulicht. Der dritte Teil der Serie widmet sich schliesslich umfangreichen Praxismessungen und zeigt, wie stark real gemessene g-Werte bei eingebauten Verglasungen von nominellen Werten abweichen können – und welche Konsequenzen sich daraus für Planung und Sanierung ergeben.

Messprozess

Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) ist eine zentrale Grösse für den sommerlichen Wärmeschutz, energetische Bilanzierungen sowie die Planung von Verglasungen und Verschattungssystemen. Die Kenngrösse beschreibt den Anteil der einfallenden solaren Strahlung, der durch direkte Transmission und sekundäre Wärmeabgabe in den Innenraum gelangt. Bei der In-situ-Messung erfolgt eine simultane Erfassung von solarer Einstrahlung, transmittierter Strahlung, Innen- und Aussentemperaturen sowie dem Wärmestrom an der raumseitigen Glasoberfläche. Das von der Hochschule Luzern gemeinsam mit der Universität Innsbruck entwickelte Messgerät wurde im ersten Teil dieser Serie (Fassade 1-2026) detailliert vorgestellt. Es sei nochmals erwähnt, dass das Hauptgerät sowie das innere Pyranometer auf der Raumseite der Verglasung angebracht werden. Das äussere Pyranometer wird auf der Aussenseite der Scheibe möglichst

nahe am Hauptgerät positioniert. Dafür ist ein entsprechender Zugang zur Aussenseite erforderlich. Für eine Messung sollte mindestens ein halber Tag mit möglichst ungehinderter direkter Besonnung eingeplant werden. Aufgrund der dynamischen Randbedingungen lässt sich der g-Wert nicht unmittelbar aus den Messdaten bestimmen. Das Messgerät liefert die zeitaufgelösten, energetischen Rohdaten, die anschliessend mithilfe eines digitalen Zwillings ausgewertet werden.

Datenauswertung mit dem digitalen Zwilling

Die erfassten Messdaten unterliegen kurzfristigen Schwankungen, insbesondere infolge wechselnder solarer Einstrahlung, thermischer Trägheit der Verglasung und weiterer variabler Umgebungsbedingungen. Anders als bei Messungen unter kontrollierten Laborbedingungen liegen bei In-situ-Messungen somit keine stationären Randbedingungen vor. Für eine Auswertung der gesammelten Daten werden daher geeignete Zeitfenster gewählt, in denen die Randbedingungen erfüllt sind und Messdaten in ausreichend guter Qualität vorliegen.
Die Auswertung erfolgt mithilfe eines detaillierten instationären Simulationsmodells des Verglasungsaufbaus, eines sogenannten digitalen Zwillings (Digital Twin). Dieses bildet die relevanten thermischen und strahlungsphysikalischen Prozesse sowie deren zeitlichen Verlauf ab.
Die gemessenen Umgebungsbedingungen, das heisst die äussere Solarstrahlung und die Aussen- und Innenlufttemperatur, dienen als zeitabhängige Randbedingungen für die Simulation. Anschliessend werden die simulierten Ergebnisse, insbesondere die solare Transmission und der Wärmestrom an der raumseitigen Glasoberfläche, mit den Messdaten verglichen.
Da die tatsächlichen Eigenschaften des Verglasungsaufbaus oft nicht vollständig bekannt sind, basiert die erste Simulation auf angenommenen Material- und Bauteilparametern. Diese werden im Rahmen eines iterativen Prozesses schrittweise angepasst, um die Abweichungen zwischen Simulation und Messung zu minimieren. Auf Grundlage des so kalibrierten Modells kann der g-Wert anschliessend unter definierten normativen Randbedingungen berechnet werden. Damit lassen sich die unter realen, veränderlichen Umgebungsbedingungen gewonnenen Messergebnisse auf standardisierte Bedingungen übertragen und mit deklarierten Kennwerten vergleichen.

Erfahrungen zu Randbedingungen und Einschränkungen

Sowohl das Messgerät als auch die Simulation benötigen eine gewisse Einschwingzeit, somit werden die ersten 30 Minuten einer Messung in der Regel nicht für eine Auswertung herangezogen. Auch stark wechselnde Witterungsbedingungen, wie etwa rasch wechselnder Sonnenschein, Bewölkung oder starke Windschwankungen, beeinträchtigen die Messstabilität. Für eine aussagekräftige Auswertung ist daher eine Messdauer von mindestens zwei bis drei Stunden bei stabilen Bedingungen nötig.
Die Simulation kann zudem nur den mittleren, ungestörten Bereich einer Verglasung abdecken. Rand- und Anschlusseffekte sowie lokale Einflüsse werden nicht berücksichtigt. Bei hinterlüfteten Fassaden kann dies zum Beispiel zu grösseren Unsicherheiten und Abweichungen führen, da die lokalen Strömungsverhältnisse und damit die Wärmeübergangsbedingungen von der Messposition abhängen. Auch die Sonnenposition hat einen Einfluss, da sowohl die optischen Eigenschaften der Verglasung als auch die Absorption von opaken Oberflächen (Sonnenschutzsysteme, Bleche, Gerätekomponenten) vom Einfallswinkel abhängen. Je flacher der Einstrahlungswinkel ist, umso stärker verändern sich die optischen Eigenschaften.

Der Abgleich zwischen Messung und Simulation erlaubt es, die Plausibilität verschiedener Verglasungs- und Fassadenaufbauten zu beurteilen. Eine eindeutige Identifikation des tatsächlichen Aufbaus ist jedoch nicht immer möglich, da sich bestimmte Systeme in ihren thermischen und optischen Eigenschaften nur geringfügig unterscheiden. In der Realität sind diese Unterschiede nur minimal, sodass resultierende Abweichungen innerhalb der Modelltoleranzen liegen können.

Im Rahmen der bisher durchgeführten Messungen liegen auch Erfahrungen zu richtungsabhängigen Verschattungssystemen vor. Es zeigt sich, dass auch Sonnenschutzsysteme mit richtungsabhängigen optischen Eigenschaften ausgewertet werden können. Voraussetzung dafür ist einerseits eine ausreichend homogene Messfläche, sodass die Sensoren repräsentative Werte erfassen. Andererseits müssen die winkelabhängigen optischen Eigenschaften des Systems ausreichend bekannt sein, beispielsweise aus ergänzenden goniophotometrischen Messungen. Für die rechnerische Bestimmung solar-optischer Eigenschaften von Sonnenschutzsystemen in Kombination mit Verglasungen steht mit der Norm EN ISO 52022-3 ein standardisiertes Berechnungsverfahren zur Verfügung.

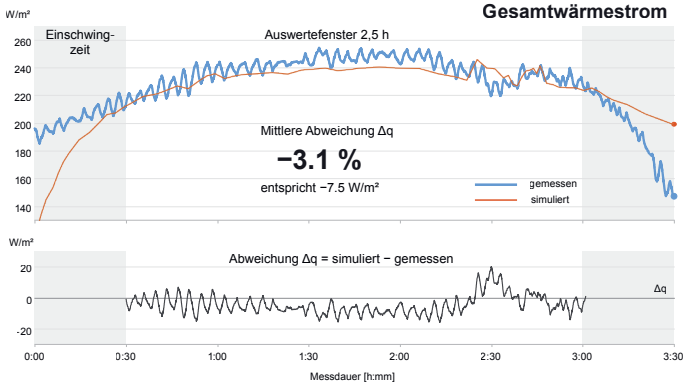
Praxisanwendung am Beispiel einer Dreifachverglasung

Nachfolgend wird die Messung an einem modernen 3-fach Schallschutzisolierglas auf der unverschatteten Südseite einer Fassade vorgestellt. Obwohl moderne Verglasungen nicht im primären Fokus der Entwicklung des Messgerätes liegen, eignen sie sich aufgrund der gut dokumentierten Eigenschaften sehr gut für die Überprüfung des Simulationsmodells und Messprozesses.
Dazu werden in einem ersten Schritt die berechneten U- und g-Werte unter normierten Randbedingungen mit den deklarierten Kennwerten der Verglasung verglichen. Wie die Tabelle zeigt, lassen sich die statischen Glaskennwerte mit hoher Genauigkeit reproduzieren.

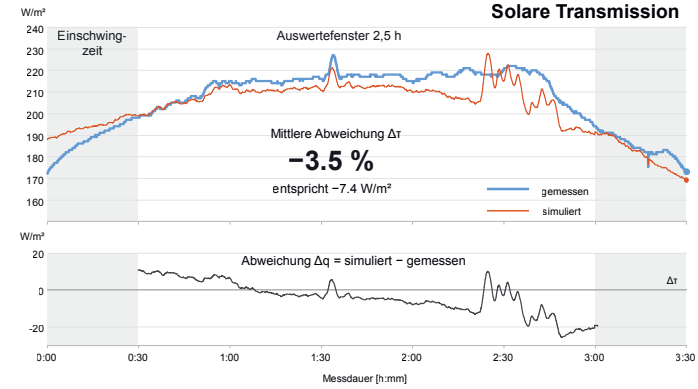
Vergleich der statischen Kennwerte

Glaskennwerte	U_g [W/(m²K)]	Solare Transmission	g-Wert*
Datenblatt	0,482	41,9 %	49,0 %
Simulation	0,502	41,9 %	49,1 %
Differenz	0,020	0 %	0,1 %

*Die Datenblattwerte basieren auf EN 410 (g-Wert, mit einem äusseren Wärmeübergang von 25 W/(m²K)) resp. EN 673 (Ug-Wert). Eine Berechnung des g-Werts nach EN ISO 52022-3 mit den dort definierten symmetrischen Randbedingungen (25 °C/25 °C) ergibt demgegenüber 49,6 % – der kleine Unterschied zeigt, wie empfindlich der g-Wert bereits auf geringfügig abweichende Annahmen zum äusseren Wärmeübergang reagiert.



2



3

2 Gesamtwärmestrom, gemessen und simuliert, sowie Abweichung

3 Solare Transmission, gemessen und simuliert, sowie Abweichung

Die Messverläufe des Gesamtwärmestromes und der direkten solaren Transmission sind in Bild 2 und Bild 3 dargestellt: Die Messung schwankt aufgrund der Regelung leicht, die Simulation bildet deren zeitlichen Verlauf jedoch sehr gut ab. Über ausgewertete Zeitfenster von 2,5 Stunden ergeben sich mittlere Abweichungen von −7,4 W/m² (−3,5 %) für die direkte Transmission und −7,5 W/m² (−3,1%) für den Gesamtwärmestrom.
Bezogen auf die mittlere gemessene Globalstrahlung von 548,9 W/m² (siehe Tabelle) entspricht dies lediglich 1,3 % bzw. 1,4 %. Dies verdeutlicht die gute Übereinstimmung von Simulation und Messung, wenn stabile Umgebungsbedingungen und eine hohe Globalstrahlung vorliegen.

Vergleich der Mittelwerte der Messung und Simulation bei aussen gemessener Globalstrahlung von 548,9 W/m²

Globalstrahlung, gemessen (aussen)	548,9 W/m² (100 %)			
	Transmission		Gesamtwärmestrom	
gemessen	212,4 W/m²	38,7 %	238,1 W/m²	43,4 %
simuliert	205,0 W/m²	37,3 %	230,6 W/m²	42,0 %
Differenz	−7,4 W/m²	−1,3 %	−7,5 W/m²	−1,4 %

Die Abweichung zu den statischen Standardwerten ist indes um einiges höher. Die gemessene Transmission liegt rund 3 %, die simulierte gut 4 % unter dem Datenblattwert. Da die Messungen im Frühjahr 2026 um die Mittagszeit stattfanden, können unter anderem der Sonnenstand und mögliche Verschmutzungen der Glasoberflächen zu diesen Abweichungen beitragen.
Der Gesamtwärmestrom, als Summe der direkten Transmission und sekundärer Wärmeabgabe, sinkt dadurch ebenfalls. Zudem reduziert die geringere Einstrahlung auch die Absorption der Scheiben, wodurch sich dieser Effekt noch verstärkt. Darüber hinaus beeinflussen die tatsächlichen Einstrahlungs- und Temperaturbedingungen sowie die thermische Speicherwirkung der Glasscheiben das dynamische Verhalten der Verglasung.
Messung und Simulation zeigen somit eine hohe Übereinstimmung und bilden das tatsächliche Verhalten der Verglasung unter realen Umgebungsbedingungen konsistent ab. Dieses Messbeispiel zeigt zum einen, dass sich selbst moderne, gut dokumentierte Verglasungen in der Realität etwas anders verhalten, als das Datenblatt besagt. Zum anderen zeigt die gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation das Potenzial des Verfahrens, auch bei Verglasungen mit unbekanntem Aufbau Rückschlüsse auf deren thermische und solaroptische Eigenschaften zu ermöglichen.

Ausblick

Die bisherigen Messkampagnen fanden im Rahmen von Projekten statt, deren Ergebnisse noch nicht veröffentlicht werden können. Weitere Messkampagnen sind daher geplant, um das Potenzial des Verfahrens anhand konkreter, öffentlich dokumentierbarer Praxisanwendungen aufzuzeigen.
Der digitale Zwilling ermöglicht es, verschiedene Kompositionen bei Verglasungen zu untersuchen und mit Messdaten abzugleichen. Dies ist besonders bei Bestandsverglasungen von Bedeutung, wenn normative Kennwerte allein keine ausreichende Entscheidungsgrundlage bieten. Auch fehlen häufig Unterlagen zum konstruktiven Aufbau, oder deren tatsächliches Verhalten weicht von den Erwartungen auf Basis vorhandener Unterlagen ab. Durch die Kombination von Messung und Simulationsabgleich lassen sich die effektiven Systemeigenschaften besser eingrenzen und das Verhalten unter realen Bedingungen beurteilen.
Das Potenzial für Re-Use oder Sanierungsmassnahmen ist damit sehr hoch: Ausgehend vom messtechnisch erfassten Istzustand können unterschiedliche Massnahmen im digitalen Modell untersucht und ihre Auswirkungen auf die energetische Performance der Bestandsfassade verglichen und optimiert werden. ◆

Die Entwicklung des Messgeräts wurde im Rahmen des Horizon Europe Programms durch das Projekt Exploit4InnoMat gefördert (Fördervereinbarung Nr. 101092339).

Détermination in situ du coefficient de transmission énergétique totale des vitrages

Expériences relatives aux mesures du coefficient g

La première partie de cette série (Façade 1-2026) présentait le principe et la méthode de mesure et la conception d'un nouvel instrument, destiné à déterminer sur site la valeur g des vitrages installés. Cet article explique désormais comment les relevés de l'appareil sont analysés à l'aide d'un jumeau numérique et comment des valeurs g fiables sont ainsi déterminées. Il présente également les conditions limites essentielles et les contraintes de la méthode. L'exemple d'un triple vitrage moderne permet d'illustrer la méthodologie et la comparaison des résultats avec les valeurs déclarées dans la fiche technique. La troisième partie de la série sera enfin consacrée à des mesures pratiques approfondies et montrera à quel point les valeurs g réellement mesurées sur des vitrages installés peuvent s'écarter des valeurs nominales – et quelles en seront les conséquences pour la conception et la rénovation.

Processus de saisie des données

Le coefficient global de transmission énergétique (valeur g) est un paramètre essentiel pour la protection thermique estivale, les bilans énergétiques ainsi que la conception des vitrages et des systèmes d'ombrage. Ce paramètre décrit la part du rayonnement solaire incident qui pénètre dans l'espace intérieur par transmission directe et par dégagement de chaleur secondaire.

Lors de la mesure en site (donc sur une façade), sont simultanément enregistrés le rayonnement solaire, le rayonnement transmis, les températures intérieures et extérieures ainsi que le flux thermique au niveau de la surface vitrée côté pièce.

L'instrument nouvellement développé conjointement par l' Université des Sciences appliquées de Lucerne (HSLU) et l'Université d'Innsbruck a été présenté en détail dans la première partie de cette série (voir Façade 1-2026). Principalement, le dispositif installé sur site consiste en trois composants – l'appareil principal lui-même et deux pyranomètres. Il convient de rappeler que l'appareil principal ainsi que le pyranomètre intérieur sont fixés du côté intérieur du vitrage. Le pyranomètre extérieur est positionné sur la face extérieure de la vitre, aussi près que possible de l'appareil principal. Cela nécessite un accès approprié à la face extérieure.

Pour effectuer une série de mesures, il convient de prévoir au moins une demi-journée avec un ensoleillement direct aussi dégagé que possible.

En raison des conditions aux limites dynamiques, la valeur g ne peut pas être déterminée directement à partir des données saisies lors d'une campagne de mesure. L'appareil ici présenté fournit les données énergétiques brutes résolues dans le temps, qui sont ensuite analysées à l'aide d'un jumeau numérique.

Analyse des données à l'aide du jumeau numérique

Les relevés enregistrés sont soumis à des fluctuations à court terme, notamment en raison des variations du rayonnement solaire, de l'inertie thermique du vitrage et d'autres conditions environnementales variables. Contrairement aux mesures effectuées dans des conditions de laboratoire contrôlées, les mesures en site ne bénéficient donc pas de conditions aux limites stationnaires. Pour analyser les données collectées, on choisit alors des plages de temps appropriées pendant lesquelles les conditions limites sont remplies et où les données saisies sont d'une qualité suffisante.

L'analyse s'effectue à l'aide d'un modèle de simulation non stationnaire détaillé du vitrage, appelé « jumeau numérique » (« digital twin »). Celui-ci reproduit par simulation numérique les processus thermiques et de rayonnement pertinents ainsi que leur évolution dans le temps.

Les conditions environnementales mesurées, c'est-à-dire le rayonnement solaire extérieur et les températures de l'air extérieur et intérieur, servent de conditions limites dépendantes du temps pour la simulation. Les résultats simulés, en particulier la transmission solaire et le flux thermique au niveau de la surface vitrée côté intérieur, sont ensuite comparés aux relevés de l'appareil capturés sur site.

Les propriétés réelles de la composition du vitrage isolant n'étant souvent pas entièrement connues, la première simulation repose sur des paramètres hypothétiques relatifs aux matériaux et aux composants. Ceux-ci sont ajustés progressivement dans le cadre d'une procédure itérative afin de minimiser les écarts entre la simulation et la mesure. Sur la base du modèle ainsi calibré, la valeur g peut ensuite être calculée dans le cadre des conditions aux limites définies par les normes. Cela permet de transposer les résultats de mesure obtenus dans des conditions environnementales réelles variables à des conditions normalisées et de les comparer aux valeurs caractéristiques déclarées.

Expériences relatives aux conditions limites et aux restrictions

Le dispositif de mesure sur site et la simulation nécessitent tous deux un certain temps de stabilisation ; c'est pourquoi les 30 premières minutes de relevés enregistrés ne sont généralement pas prises en compte pour l'analyse. De même, des conditions météorologiques très changeantes, telles qu'un ensoleillement, du brouillard variant rapidement, ou encore de fortes fluctuations du vent, nuisent à la stabilité des mesures. Pour obtenir une analyse pertinente, il est donc nécessaire de disposer d'une durée de mesure d'au moins deux à trois heures dans des conditions stables.

De plus, la simulation ne peut couvrir que la zone centrale et non perturbée d'un vitrage. Les effets de bord et de raccordement ainsi que les influences locales ne sont pas pris en compte. Dans le cas des façades ventilées, cela peut par exemple entraîner des incertitudes et des écarts importants, car les conditions locales d'écoulement et, par conséquent, les conditions de transfert thermique dépendent de la position du capteur.

La position du soleil a également une influence, car les propriétés optiques du vitrage ainsi que l'absorption des surfaces opaques (systèmes de protection solaire, tôles, composants d'appareils) dépendent de l'angle d'incidence. Plus l'angle d'incidence est faible, plus les propriétés optiques varient fortement.

La comparaison entre les relevés et la simulation permet d'évaluer la plausibilité de différentes configurations de vitrages et de façades. Il n'est toutefois pas toujours possible d'identifier sans ambiguïté la configuration réelle, car certains systèmes ne présentent que de légères différences au niveau de leurs propriétés thermiques et optiques. En réalité, ces différences sont minimes, de sorte que les écarts qui en résultent peuvent se situer dans les limites des tolérances du modèle.

Les mesures réalisées jusqu'à présent ont également permis d'acquérir de l'expérience concernant les systèmes d'ombrage dépendants de l'orientation. Il apparaît que les systèmes de protection solaire présentant des propriétés optiques dépendantes de l'orientation peuvent également être évalués. Pour cela, il faut d'une part disposer d'une surface de mesure suffisamment homogène pour que les capteurs enregistrent des valeurs représentatives. D'autre part, les propriétés optiques du système en fonction de l'angle doivent être suffisamment connues, par exemple grâce à des mesures goniophotométriques (distribution spatiale de l'intensité lumineuse d'une source de lumière ou d'un matériau sous différents angles) complémentaires. La norme EN ISO 52022-3 fournit une méthode de calcul normalisée pour la détermination mathématique des propriétés optiques solaires des systèmes de protection solaire associés à des vitrages.

Application pratique à l'exemple d'un triple vitrage

Nous présentons ci-après la mesure effectuée sur un triple vitrage isolant acoustique moderne, situé sur la face sud non ombragée d'une façade. Bien que les vitrages modernes / neufs à l'origine ne constituaient pas l'objectif principal du développement de l'appareil, leurs propriétés bien documentées les rendent particulièrement adaptés à la vérification du modèle de simulation et du processus de mesure. Ainsi, l'appareil est utilisé aussi bien pour les anciens vitrages aux propriétés entièrement inconnues que pour les nouveaux.

Pour ce faire, on compare dans un premier temps les valeurs U et g calculées dans des conditions limites normalisées avec les caractéristiques déclarées du vitrage. Comme le montre le tableau 1, les caractéristiques statiques du vitrage peuvent être reproduites avec une grande précision.

Les courbes de mesure du flux thermique total et de la transmission solaire directe déterminées avec l'appareil présenté ici sont représentées dans les figures 2 et 3 : les relevés présentent de légères fluctuations dues à la régulation, mais la simulation reproduit très fidèlement leur évolution dans le temps. Sur des plages temporelles analysées sur une durée de 2,5 heures, on obtient des écarts moyens de -7,4 W/m² (-3,5 %) pour la transmission directe et de -7,5 W/m² (-3,1 %) pour le flux thermique total. Par rapport au rayonnement global moyen mesuré de 548,9 W/m² (voir tableau 2), cela ne représente respec-

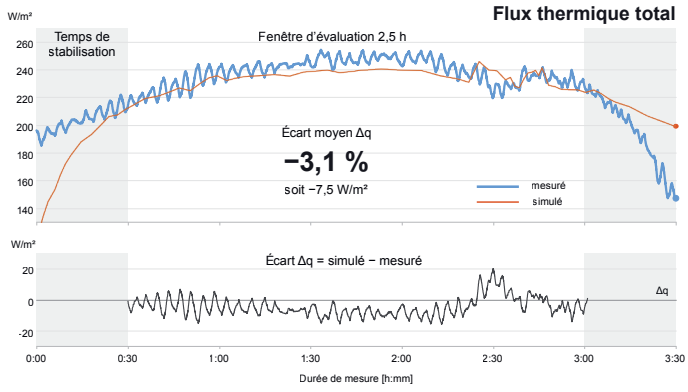
Comparaison des caractéristiques statiques
(simulation par le calcul vs. fiche technique)

Caractéristiques du verre	*U_g [W/(m²K)]*	*Transmission solaire*	*Valeur g**
Fiche technique	*0,482*	*41,9%*	*49,0%*
Simulation	*0,502*	*41,9%*	*49,1%*
Différence	*0,020*	*0%*	*0,1%*

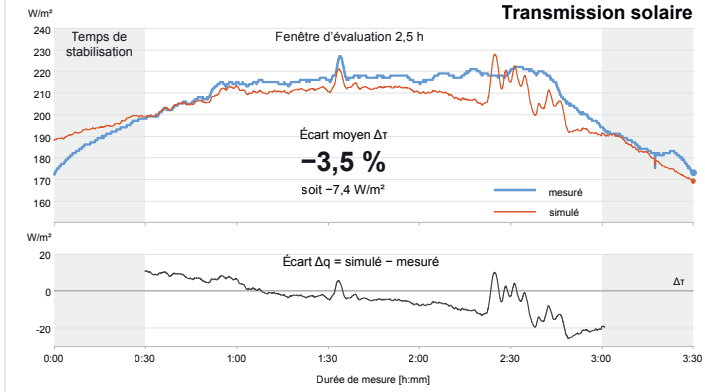
**Les valeurs indiquées dans la fiche technique sont basées sur la norme EN 410 (coefficient g, avec un transfert thermique extérieur de 25 W/(m²K)) ou sur la norme EN 673 (coefficient Ug). Un calcul de la valeur g selon la norme EN ISO 52022-3, avec les conditions limites symétriques qui y sont définies (25 °C/25 °C), donne en revanche 49,6 % – cette légère différence montre à quel point la valeur g est sensible à des hypothèses même légèrement différentes concernant le transfert thermique externe.*

Comparaison des valeurs moyennes obtenues par mesure et par simulation pour un rayonnement global de 548,9 W/m² mesuré à l'extérieur

Rayonnement global, mesuré (à l'extérieur)	*548,9 W/m² (100%)*			
	Transmission		*Flux thermique total*	
Mesuré	*212,4 W/m²*	*38,7%*	*238,1 W/m²*	*43,4%*
Simulé	*205,0 W/m²*	*37,3%*	*230,6 W/m²*	*42,0%*
Différence	*-7,4 W/m²*	*-1,3%*	*-7,5 W/m²*	*-1,4%*



2



3

tivement que 1,3 % et 1,4 %. Cela illustre la bonne concordance entre la simulation et la mesure sur site lorsque les conditions environnementales sont stables et que le rayonnement global est élevé.

L'écart par rapport aux valeurs standard statiques est toutefois nettement plus important. La transmission mesurée est inférieure d'environ 3 % à la valeur indiquée dans la fiche technique, tandis que la transmission simulée l'est de plus de 4 %. Les mesures ayant été effectuées au printemps 2026 vers midi, la position du soleil et d'éventuelles salissures sur les surfaces vitrées peuvent notamment contribuer à ces écarts.

Le flux thermique total, qui correspond à la somme de la transmission directe et de la réémission thermique secondaire, diminue donc également. De plus, le faible rayonnement réduit également l'absorption des vitres, ce qui renforce encore cet effet. Par ailleurs, les conditions réelles de rayonnement et de température, ainsi que l'effet d'accumulation thermique des vitres, influencent le comportement dynamique du vitrage.

Les mesures et la simulation montrent ainsi une excellente concordance et reflètent de manière cohérente le comportement réel du vitrage dans des conditions environnementales réelles. Cet exemple de mesure montre d'une part que même les vitrages modernes et bien documentés se comportent en réalité quelque peu différemment de ce qu'indique la fiche technique. D'autre part, la bonne concordance entre la mesure et la simulation met en évidence le potentiel de cette méthode pour tirer des conclusions sur les propriétés thermiques et solaire-optiques de vitrages, même lorsque leur composition et performance sont inconnues.

Perspectives

Les campagnes de mesure menées jusqu'à présent s'inscrivaient dans le cadre de projets dont les résultats confidentiels ne peuvent pas encore être publiés. D'autres campagnes de mesure sont donc prévues afin de démontrer le potentiel de cette méthode à l'aide d'applications pratiques concrètes pouvant faire l'objet d'une documentation publique.

Le jumeau numérique permet d'étudier différentes configurations de vitrages et de les comparer aux données de mesure. Cela revêt une importance particulière pour les vitrages existants, lorsque les paramètres normatifs ne constituent pas à eux seuls une base décisionnelle suffisante. De plus, il arrive souvent que les documents relatifs à la structure du bâtiment fassent défaut ou que le comportement réel s'écarte des prévisions établies à partir des documents disponibles. En combinant les mesures et la comparaison par simulation, il est possible de mieux cerner les propriétés effectives du système et d'évaluer son comportement dans des conditions réelles. Le potentiel pour définir la manière de réutilisation d'un vitrage ancien ou de mesures de rénovation est ainsi très élevé : à partir de l'état de performance actuel obtenu par les valeurs captées avec l'appareil, différentes mesures de mise à niveau / modernisation du vitrage existant peuvent être étudiées dans le modèle numérique. Ainsi, leurs effets sur la performance énergétique de la façade existante peuvent être comparés et optimisés pour une potentielle réutilisation (angl. « reuse ») ou mise à niveau par refabrication (angl. « remanufacturing »). ◆

2 *Flux thermique total mesuré et simulé, ainsi que l'écart Δq entre les deux*

3 *Transmission solaire mesurée et simulée, ainsi que leur écart Δq*

Le développement de cet appareil de mesure a été financé dans le cadre du programme Horizon Europe par le projet Exploit4Inno-Mat (convention de subvention n° 101092339).