



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final 27 juin 2013

G-box

Mesure in situ des performances énergétiques de façades transparentes et translucides

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche énergie dans les bâtiments
CH-3003 Berne
www.bfe.admin.ch

Cofinancement:

ISAAC–DACD–SUPSI et LEEA–HEPIA–HESSO

Mandataire:

ISAAC–DACD–SUPSI et LEEA–HEPIA–HESSO
Campus Trevano, CH-6952 Canobbio et Rue de la Prairie 4, CH-1202 Genève
www.supsi.ch/isaac et www.leea.ch

Auteurs:

Daniel Pahud, daniel.pahud@supsi.ch
Peter Gallinelli, peter.gallinelli@leea.ch
Dimitri Crivellin, dimitri.crivellin@leea.ch
Sylvie Margot, sylvie.margot@leea.ch
Reto Camponovo, reto.camponovo@hesge.ch
Marco Belliardi, marco.belliardi@supsi.ch

Responsable de domaine de l'OFEN: Andreas Eckmanns

Chef de programme de l'OFEN: Rolf Moser

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 153'784 / 102'947

Les auteurs de ce rapport portent seuls la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Riassunto

La moda architettonica contemporanea è caratterizzata da un crescente utilizzo del vetro nella costruzione: sia attraverso degli involucri completamente trasparenti (singola pelle, doppia pelle), sia attraverso delle aperture trasparenti di notevoli dimensioni (finestre, lucernari).

Il vetro resta tuttavia un elemento debole dal punto di vista termico: in inverno le perdite per trasmissione sono sempre più rilevanti rispetto a quelle attraverso le pareti opache e, in estate, gli apporti energetici solari concorrono ad aumentare il surriscaldamento.

Il g-box consiste nello sviluppare un apparecchio di misura in grado di misurare in-situ le performance energetiche degli elementi da costruzione trasparenti o traslucidi.

Nel contesto del finanziamento consentito dall'UFE, sono stati costruiti nei laboratori dell'HEPIA due apparecchi, ciascuno composto da due calorimetri. Questi permettono la misura in simultanea di due vetri, e di valutare l'effetto di una protezione solare o di paragonarlo con un altro intervento. Un apparecchio è stato consegnato ed installato alla SUPSI, mentre l'altro è stato utilizzato a Ginevra durante due stagioni.

È stata elaborata una procedura di calibrazione dei sensori per affinare le misure della potenza termica prima della campagna di misura. Dall'altro lato le misure registrate di notte, attraverso il bilancio energetico notturno di un box, permettono di calibrare il coefficiente di perdite termiche del vetro.

Sono state effettuate delle misure su cinque tipi di facciate e con diversi tipi di protezioni solari. Queste misure hanno permesso di acquisire una approfondita comprensione dei fenomeni fisici ed in particolar modo termici in gioco. Due maggiori difficoltà sono state messe in evidenza attraverso l'analisi delle misure e delle incertezze. La prima riguarda la precisione delle misure di temperatura. Una importante pista riguarda la temperatura di riferimento del data-logger, che deve essere la più uniforme possibile dove ci sono i contatti delle termocoppie. Questa può essere senza alcun dubbio migliorata con un intervento relativamente semplice. L'altra difficoltà riguarda gli effetti di bordo generati tra il box ed il contatto con il vetro. Se il bilancio energetico notturno permette di calibrare le perdite dal box verso l'esterno, manca ancora di considerare i guadagni solari secondari provenienti dalla parte del box a contatto con il vetro. Rimangono da fare delle specifiche esperienze per identificare, quantificare e correggere questi effetti indesiderati.

L'analisi delle misure ha quindi condotto a valutare un coefficiente g più elevato di quello che dovrebbe essere. Tuttavia la sopravvalutazione è molto variabile e dipende dalle condizioni e dal tipo di vetro. Le più grandi differenze sono state osservate con i moduli BIPV. Va tuttavia notato la presenza di condizioni di misura particolarmente difficili, che hanno presentato delle forti e rapide variazioni di temperatura ambiente, generando dei fenomeni transitori per il g-box. Tuttavia le migliori misure sono state ottenute nell'aula scolastica A204 di Trevano, che ha presentato delle temperature ambiente relativamente stabili.

Le misure del coefficiente g dei vetri dell'aula A204, senza protezione solare, forniscono un valore giornaliero medio di 0.38 ± 0.03 con il box 1. Questo valore è compatibile con quello del fabbricante, che fornisce un valore puntuale di 0.38. Le misure permettono di misurare l'evoluzione del coefficiente g nel corso di una giornata, come anche il coefficiente g globale di un vetro con una protezione solare esterna. Con il g-box vengono messi in evidenza gli effetti dinamici di ombreggiamento, come un pilastro laterale alla finestra, o la posizione delle lamelle di una tenda veneziana.

Le misure del coefficiente g necessitano di una bella giornata soleggiata. Si osserva una dispersione dei risultati da una bella giornata all'altra, è quindi necessario poter prolungare le misure su una serie di belle giornate in modo da limitare le incertezze aleatorie, generalmente causate da differenti condizioni climatiche ed ambientali. Le dispersioni osservate e le incertezze calcolate hanno prodotto un margine di errore che, valutato a due deviazioni standard per avere un intervallo di confidenza del 95%, è tipicamente di 0.03 - 0.06 in valore assoluto sul coefficiente g.

La sopravvalutazione del valore g , causata da un fenomeno non considerato nel modello termico di un box, può creare un errore sistematico superiore all'incertezza indicata qui sopra. Questa è la ragione per la quale sono ancora necessari degli studi con lo scopo di migliorare il metodo e l'analisi delle misure. Il dispositivo g-box sviluppato in questo progetto ha dimostrato buone caratteristiche e presenta un buon potenziale di miglioramento. Le misure in continuo permettono inoltre di stabilire il bilancio dei guadagni solari giornalieri di un vetro e della sua protezione solare. Questo apre nuove prospettive in modo da considerare l'influenza dell'utilizzatore o della regolazione delle tende esterne.

Résumé

La mode architecturale contemporaine se caractérise par une grande utilisation du verre dans la construction : soit en tant qu'enveloppe entièrement transparente (simple peau, double peau), soit dans des ouvertures transparentes d'importantes dimensions (baies vitrées, verrières).

Par contre du point de vue thermique le verre reste un élément faible : en hiver les pertes par transmission sont toujours plus importantes que celles des parties opaques et, en été, les apports énergétiques occasionnent de la surchauffe.

g-box consiste dans le développement d'un équipement de mesure permettant de mesurer in-situ les performances énergétiques des éléments de construction transparents ou translucides.

Dans le contexte du financement consenti par l'OFEN, deux installations comportant chacune deux enceintes calorimétriques ont été fabriquées dans les ateliers de hepia. Elles permettent la mesure simultanée de deux vitrages et d'évaluer l'effet d'une protection solaire ou d'une autre intervention par comparaison. Une installation a été livrée et installée à la SUPSI alors que l'autre a été exploitée à Genève pendant deux saisons.

Une procédure de calibration des senseurs de température a été élaborée pour affiner la mesure de la puissance thermique avant une campagne de mesure. D'autre part les mesures enregistrées la nuit permettent de calibrer le coefficient des pertes thermiques du vitrage en établissant le bilan énergétique nocturne d'un box.

Des mesures sur cinq systèmes d'enveloppe et avec différents systèmes de protection solaire ont été effectuées. Ces mesures ont permis d'acquérir une compréhension approfondie des phénomènes physiques et particulièrement thermiques en jeu. Deux difficultés majeures ont été mises en évidence par l'analyse des mesures et des incertitudes. La première concerne la précision des mesures de température. Une piste sérieuse concerne la température de référence du datalogger, qui doit être la plus uniforme possible dans les contacts des thermocouples. Elle peut sans aucun doute être améliorée avec une intervention relativement simple. L'autre difficulté concerne les effets de bord engendrés par le box en contact avec le vitrage. Si le bilan énergétique de nuit permet de calibrer les pertes du box vers l'extérieur, il manque encore la prise en compte de gains solaires secondaires en provenance de la tranche du box en contact avec le vitrage. Des expériences spécifiques restent à faire pour identifier, quantifier et corriger ces effets indésirables.

L'analyse des mesures a donc conduit à évaluer un coefficient g plus élevé que ce qu'il devrait être. Toutefois la surévaluation est très variable et dépend des conditions et du type de vitrage. Les plus grandes différences ont été observées avec les modules BIPV. Mais il faut relever des conditions de mesure particulièrement difficiles, qui ont présenté des variations de température d'ambiance fortes et rapides, engendrant des phénomènes transitoires pour le g-box. En revanche les meilleures mesures ont été obtenues dans la salle de cours A204 à Trevano, qui a présenté des températures d'ambiance relativement stables.

Les mesures du coefficient g des vitrages de la salle A204, sans protection solaire, livrent une valeur moyenne journalière de 0.38 ± 0.03 avec le box 1. Cette valeur est compatible avec celle du fabricant qui donne une valeur ponctuelle de 0.38. Les mesures permettent de mesurer l'évolution du coefficient g au cours d'une journée, de même que le coefficient g global d'un vitrage avec une protection solaire extérieure. Les effets dynamiques d'ombrage, comme un pilier latéral à la fenêtre, ou la position des lamelles d'un store, sont mis en évidence par le g-box.

Les mesures du coefficient g nécessitent une belle journée. Une dispersion des résultats est observée d'un beau jour à un autre, et donc il est nécessaire de pouvoir prolonger les mesures sur une série de beaux jours de façon à limiter les incertitudes aléatoires, généralement causées par les diverses conditions climatiques et d'ambiance. Les dispersions observées et les incertitudes calculées ont produit une marge d'erreur qui, évaluée à deux écart types pour avoir un intervalle de confiance de 95%, est typiquement de 0.03 - 0.06 en valeur absolue sur le coefficient g.

La surévaluation du coefficient g , causé par un phénomène non pris en compte dans le modèle thermique d'un box, peut créer une erreur systématique supérieure à l'incertitude indiquée ci-dessus. C'est la raison pour laquelle des études spécifiques sont encore nécessaires pour améliorer la méthode et l'analyse des mesures. Le dispositif g -box développé dans ce projet fait preuve de très bonnes caractéristiques et présente un bon potentiel d'amélioration. Les mesures continues permettent en outre d'établir le bilan des gains solaires journaliers d'un vitrage et de sa protection solaire, ce qui ouvre des perspectives nouvelles pour prendre en compte l'influence de l'utilisateur ou de la régulation des stores.

Summary

Contemporary architectural style is characterised by an extensive use of glass in construction. It may be a complete transparent building envelope (single skin, double skin), or large transparent openings (bay windows, glass sky).

From the thermal point of view glass is still a weak element. In Winter the transmission heat losses are always larger than that of an opaque wall. In Summer the passive solar gains are often causing overheating.

g-box is the development of a monitoring device designed to measure in situ the thermal performances of construction elements that are transparent or translucent.

In the framework of this SFOE (Swiss Federal Office of Energy) project, two devices having each two calorimetric boxes were built in the hepia workshops. They allow for the simultaneous measure of two glazing, enabling thus the assessment of the effect of a solar protection or any intervention aiming at reducing solar gains. One of the device has been delivered and installed at SUPSI and the other one has been used in Geneva for two years.

A calibration procedure for the temperature sensors has been elaborated to improve the accuracy of the thermal power measure before a monitoring campaign. On the other hand the night measurements allow for the calibration of the heat transfer coefficient of the glazing by doing a heat balance of a box.

Measurements on five types of envelopes and with different types of solar protections were realised. The measurements allow us to gain a deep knowledge of the physical processes involved, and particularly the thermal ones. Two major difficulties were highlighted through the analysis of the measurements and their uncertainties. The first one is related to the temperature measurement accuracy. An important factor is the reference temperature of the thermocouple contacts on the datalogger, which has to be as uniform as possible. This can be easily improved with a simple intervention. The other difficulty is related to the part of the box in contact with the glazing. If the night heat balance makes it possible to calibrate the box heat losses through the glazing, the secondary heat gains resulting from the heating of the glass in contact with the box border are not taken into account. Specific experiments have still to be done to identify, quantify and correct these unwanted effects.

Measurement analysis lead to assess an over estimated g-factor. The overestimation is dependent on the type of glazing and the measurement conditions. The larger differences were observed with the BIPV modules. It has to be noticed that the measurement conditions were particularly difficult. Large and fast variations of room air temperature have created transitory phenomena for the g-box. On the contrary the best measurements were obtained in the lecture room A204 in Trevano. The air room temperature was rather stable in this case.

G-factor measurements of the glazing in room A204, without solar protection, provide a mean daily value of 0.38 ± 0.03 with box 1. This value is compatible with that of the manufacturer who gives a punctual value of 0.38. The measures allow to follow the evolution of the g-factor during the day, as the overall g-factor resulting from the use of an external solar protection. Dynamic effect of shadows, such as a lateral pillar or the strip position of a venetian blind, can be highlighted by the g-box.

G-factor measurements require a sunny day. A scatter of the results is observed from a beautiful day to another. It is thus necessary to have the possibility to extend the measurement period over a series of sunny days in order to limit the aleatory uncertainties. This latter is generally caused by the various climatic and ambience conditions. The observed scatter and calculated uncertainties lead to an error margin of typically 0.03 to 0.06 in absolute value of the g-factor, corresponding to a confidence interval of 95%.

The g-value overestimation, caused by a phenomenon non taken into account in the thermal model of a box, may create a systematic error larger that the above given uncertainty. This is the reason why specific studies are still necessary to improve the measurement procedure and analysis. The g-box device developed in this project has very good characteristics and presents a good potential of improvement. Furthermore the continuous measures allow to establish a daily heat balance of the solar gains related to a glazing and its solar protection. This open a new perspective that would allow to take into account the influence of the user or the blind control.

Zusammenfassung

Moderne Architektur ist durch umfangreichen Einsatz von Glas gekennzeichnet sei es als transparente Bauhülle oder grosszügiger Verglasungen (Fenster, Oberlichter). Dabei ist und bleibt Glas trotz potentieller solarer Gewinne ein Schwachpunkt in Bezug auf Wärmeverluste während der Wintermonate, immer grösser als opake Bauteile, und sind im Sommer verantwortlich für beträchtliche Wärmegewinne und ein potenzielles Risiko zu Überhitzung der Gebäude.

Das g-Box Projekt besteht in der Entwicklung einer Messeinrichtung zur vor-ort Prüfung der Gesamtenergieeffizienz transparenter oder transluzenter Gebäudehüllenelemente. Dank der finanziellen Unterstützung des BFE, konnten zwei Anlagen mit jeweils zwei kalorimetrischen Messvorrichtungen entwickelt und hergestellt werden. Diese ermöglichen die gleichzeitige Messung von zwei verschiedenen Gläsern und erlauben damit eine experimentelle Bewertung der Effizienz von mit Sonnenschutz und Benutzerverhalten gekoppelten Verglasungssystemen. Eine Anlage wurde an die SUPSI geliefert und installiert, während die andere an der hepia in Genf betrieben wird.

Es wurde ein Protokoll zur Kalibrierung der Temperatursensoren entwickelt, um die Messung der thermischen Dynamik der Kalorimeter zu verfeinern. Es wurden auch Nachtmessungen ausgeführt, um mittels der Energiebilanz den Wärmeverlust-Koeffizienten der Verglasung zu bestimmen.

Im Rahmen des Projektes wurden Messungen an fünf Verglasungen mit unterschiedlichen Sonnenschutzvorrichtungen vorgenommen. Durch diese Messungen konnte ein gründliches Verständnis der physikalischen und insbesondere thermischen Phänomene gewonnen werden. Dabei wurden zwei besondere Schwierigkeiten betreffend Auswertung der Messungen und Unsicherheiten hervorgehoben:

Die erste betrifft die Genauigkeit der Temperaturmessungen. Einerseits handelt es sich um die Referenz-Temperatur des Datenloggers, die so stabil wie möglich sein muss. Dieser Punkt kann relativ einfach verbessert werden. Eine andere Schwierigkeit betrifft die Nebenwirkungen, die durch das ungleichmässige Temperaturfeld in Kontakt mit dem Glas verursacht wird. Während die nächtliche Energiebilanz eine Erwägung der Wärmeverluste ermöglicht, so fehlt noch die Messung der sekundären solaren Gewinne aus dem in Kontakt mit dem Glas befindlichem Kalorimeterrahmens. Weitere Erfahrungen und Messungen sind notwendig, um diese Effekte besser zu identifizieren, zu quantifizieren und letztendlich zu korrigieren.

Die Analyse der Messresultate hat generell einen höheren g-Wert als sein sollte ergeben. Allerdings ist die Überbewertung sehr variabel und hängt sehr stark von den Umgebungsbedingungen und der Art der Verglasung ab. Die größten Unterschiede wurden mit BIPV-Modulen beobachtet. Allerdings müssen dabei besonders anspruchsvolle Messbedingungen mit grossen Temperatur- und Einstrahlungsschwankungen berücksichtigt werden, die transiente Phänomene in den g-box-Kalorimetern bewirken. Die besten Messungen wurden im Klassenzimmer Trevano A204 mit einer relativ stabilen Atmosphäre, das heisst geringen Temperaturschwankungen, gemacht.

Die täglichen Messungen des g-Wertes der Verglasungen von Zimmer A204 ohne Sonnenschutz, ergeben einen durchschnittlichen Wert von 0.38 ± 0.03 . Dieser Wert überschneidet sich gut mit dem vom Hersteller angegebenen Punktwert von 0.38. Die Messungen erlauben die Erfassung des variierenden g-Wertes über den Tag, sowie die Ermittlung des globalen g-Wertes von Verglasungen inklusive Sonnenschutz. Dynamische Schattierung, wie zum Beispiel ein Fenster mit einseitig vorgesetzter Säule oder die Position der Lamellen einer Jalousie, kann mit der g-Box beobachtet werden.

Die Messungen erfordern einen sonnigen Tag. Eine Streuung der Ergebnisse kann von einem Tag auf den anderen beobachtet werden. Es ist daher notwendig, die Messungen an einer Reihe von klaren Tagen auszuführen, um allfällige Unsicherheiten zu minimieren. In der Regel sind diese durch variierende klimatische Bedingungen verursacht. Die beobachtete Dispersion und die berechneten Unsicherheiten ergeben eine Toleranz, die für zwei Standardabweichungen für ein

Vertrauensintervall von 95% in der Regel auf 0.03 bis 0.06 in absolutem g-Wert abgeschätzt werden kann.

Die Überbewertung des g-Wertes kann durch ein nicht in der Energiebilanz berücksichtigtes Phänomen erklärt werden. Dieses kann einen systematischen Fehler der größer als die oben beschriebene Unsicherheit ist induzieren. Diese Erkennung macht es notwendig weitere Experimente zu machen um das Verfahren und die Analyse der Messungen zu verbessern.

Allgemein hat die g-Box sehr gute Eigenschaften aufgewiesen und verfügt weiterhin über ein gutes Potenzial für Verbesserungen. Fortdauernde Messungen ermöglichen unter anderem die Bilanz der täglichen solaren Gewinne von Verglasungen inklusive Sonnenschutz zu bestimmen, was neue Perspektiven eröffnet den Einfluss von Benutzern, Sonnenschutzvorrichtungen oder lokalem Klima und Umgebung zu messen.

Table des matières

1. Introduction	3
2. Objectifs	4
3. Principe de fonctionnement et de contrôle des g-box	5
3.1 Principe de mesure	5
3.2 Problématique de contrôle de la température intérieure d'un box	5
3.3 Contrôle PID	7
4. Description et construction d'un g-box	9
4.1 Schéma synoptique	9
4.2 Construction	10
5. Grandeurs mesurées et acquisition des mesures	15
5.1 Grandeurs mesurées	15
5.2 Calibration	15
5.3 Acquisition	15
6. Caractéristiques thermiques des box	17
6.1 Introduction	17
6.2 Modèle thermique simplifié d'un box	17
6.3 Pertes spécifiques des box sans l'effet d'un vitrage	19
6.4 Capacité thermique de l'échangeur des box	21
6.5 Calibration secondaire des mesures de puissance thermique	23
6.6 Coefficient de transfert de chaleur des échangeurs de chaleur	26
6.7 Effet du vitrage triple sur les caractéristiques thermiques	27
6.8 Résultats de la caractérisation thermique des box	29
7. Analyse des mesures et calcul d'erreur	31
7.1 Introduction	31
7.2 Calcul du coefficient g	31
7.3 Erreurs aléatoires	33
7.4 Calcul des erreurs aléatoires	35
7.5 Erreurs systématiques	38
7.6 Corrections possibles des erreurs systématiques	39
7.7 Discussions des corrections	42
8. Résultats des mesures	43
8.1 Introduction	43
8.2 SUPSI – Aula A204	44
8.3 SUPSI – Tetto BIPV	55
8.4 HEPIA – Bâtiment A	59
8.5 HEPIA – Bâtiment B	61
8.6 HEPIA – Bâtiment C	63
9. Conclusions	65
10. Remerciements	67
11. Références	67

Annexe A : Contrôle PID – Programme de contrôle et d'acquisition des mesures du datalogger Campbell CR1000

Annexe B : Construction du g-box – Référence pour le matériel et les plans

Annexe C : Acquisition des mesures – Branchements du CR1000 et calibration des senseurs de température et des débitmètres

Annexe D : Mesures et analyses – Classe A204 – SUPSI – Trevano

Annexe E : Mesures et analyses – Tetto BIPV – SUPSI – Trevano

Annexe F : Mesures et analyses – Bâtiment A - HEPIA - Genève

Annexe G : Mesures et analyses – Bâtiment B - HEPIA - Genève

Annexe H : Mesures et analyses – Bâtiment C - HEPIA - Genève

1. Introduction

L'utilisation des apports solaires en période hivernale et la bonne protection solaire en période de canicule constituent les bases d'un fonctionnement harmonieux de l'enveloppe thermique des bâtiments avec le climat ambiant, permettant d'assurer un climat intérieur confortable tout en réduisant la part des énergies non renouvelables nécessaires pour le chauffage ou le refroidissement.

A la différence des valeurs physiques des verres obtenues en laboratoire (g, U), préconisés dans les plaquettes des fabricants et utilisés lors de simulations thermiques, les mesures effectuées in situ mettent en lumière la performance des verres et des systèmes de vitrage en conditions réelles.

A cet effet un calorimètre solaire, appelé g-box, a été développé.

2. Objectifs

Le projet proposé à l'OFEN comporte 4 parties distinctes :

- 1 - Développement d'un calorimètre transportable aisément reproductible sur la base du prototype. Contrairement aux bancs de mesure fixes (essais en laboratoire d'échantillons), le dispositif est temporairement monté sur les façades existantes pour la mesure du comportement réel (simple peau, double peau, façades vitrées opaques...) et de leur éventuel dispositif de protection solaire.
- 2 - Campagne de mesures sur des façades représentatives en condition d'exploitation réelle, ce qui va permettre d'obtenir un éventail d'études de cas parfaitement documentés et qui mettront en lumière les écarts éventuels entre théorie et réalité.
- 3 - Valorisation et diffusion des données récoltées et des connaissances acquises pour la formation des constructeurs (architectes, façadiers, etc.) dans des cours ad-hoc (bachelor, master, formation continue) par la création d'un site internet spécifique à cette problématique d'actualité.
- 4 - Disponibilité de l'appareil et du protocole de mesures pour des études préalables et des expertises de bâtiments existants.

3. Principe de fonctionnement et de contrôle des g-box

3.1 Principe de mesure

Le calorimètre est constitué d'une enceinte isolée tapissée d'un fond absorbant hermétiquement fixée contre l'échantillon de fenêtre. La chaleur transmise par la fenêtre est absorbée à l'intérieur du caisson isolé et évacuée moyennant un radiateur dans lequel circule de l'eau en provenance d'un réservoir d'eau froide. Une régulation thermostatique maintient la température à l'intérieur de cette enceinte à une valeur de consigne, choisie comme étant celle de la pièce dans laquelle se trouve le g-box. La chaleur ainsi évacuée par l'eau de refroidissement représente après corrections l'apport en énergie solaire et peut être déterminée sur la base des mesures du débit d'eau (débitmètre) et de la différence de température entre l'entrée et la sortie du radiateur (thermocouples installés dans des doigts de gant) :

$$Q_{corr} = Q_{fen\hat{e}tre} + Q_{pi\hat{e}ce} + Q_{capa} \quad (3.1)$$

$$Q_{soleil} = Q_{froid} - Q_{el.chaud} + Q_{corr} \quad (3.2)$$

...avec Q_{soleil} étant le total de l'énergie solaire transmise, Q_{froid} et $Q_{el.chaud}$ étant les énergies de refroidissement et de chauffage et Q_{corr} représentant des corrections suivantes : $Q_{fen\hat{e}tre}$ étant les déperditions calculées à travers la fenêtre, $Q_{pi\hat{e}ce}$ les pertes vers la pièce à travers la paroi du calorimètre, et finalement Q_{capa} qui tient compte de la chaleur stockée dans la masse thermique de la boîte lors de variations de température interne.

Le coefficient de transmission solaire du système, appelé facteur-g ou coefficient g (eng : solar heat gain coefficient, ou SHGC), se calcule en divisant Q_{soleil} par le produit du rayonnement solaire incident G_I et la surface de l'échantillon A_w :

$$g = Q_{soleil} / (G_I * A_w) \quad (3.3)$$

Un modèle physique simplifié des échanges thermiques et du calcul du coefficient g se trouve dans les chapitres 6 et 7.

Pour rendre compte de l'effet des hypothèses d'amélioration, deux mesures sont effectuées en parallèle :

- 1) échantillon de référence
- 2) échantillon étudié

3.2 Problématique de contrôle de la température intérieure d'un box

L'échangeur de chaleur d'un box (le radiateur mentionné ci-dessus) permet de le refroidir ou de le chauffer, grâce au contrôle d'une vanne mélangeuse 3-voies. Pour tester et développer le système de régulation de la température intérieure d'un box, la température de consigne est simplement fixée à une valeur constante de 25°C. Si la température de l'air est supérieure à 25°C, alors il faut refroidir le box en ouvrant davantage la vanne mélangeuse. La température de l'eau à l'entrée de l'échangeur du box baisse, ce qui a pour conséquence d'amener de l'eau plus froide dans le box et d'absorber plus de chaleur dans le but de baisser la température de l'air du box. La figure 3.1 montre l'évolution des températures de

l'eau à l'entrée et à la sortie du box, la température de l'air intérieur du box et l'état d'ouverture de la vanne pour un contrôle purement proportionnel. Ce dernier augmente ou réduit l'état d'ouverture de la vanne proportionnellement à une fonction « erreur », définie comme l'écart de température entre la mesure de température de l'air du box et la température de consigne fixée à 25°C.

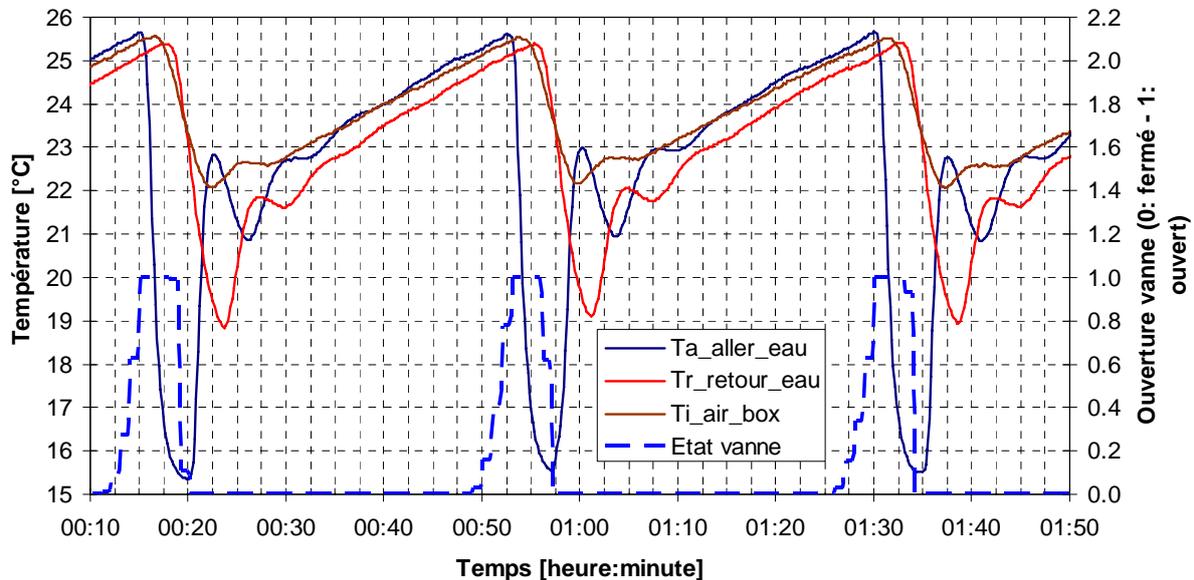


Figure 3.1 Contrôle purement proportionnel de la vanne mélangeuse pour maintenir la température du box (représentée avec la ligne brune) à 25°C.

Les courbes du graphique de la figure 3.1 montrent que la vanne commence à s'ouvrir lorsque la température du box ($T_{i_air_box}$) dépasse la température de consigne (25°C). On observe plusieurs effets de retard qui rendent le contrôle de la température du box difficile :

- La température de l'eau à l'entrée de l'échangeur du box ($T_{a_aller_eau}$) réagit avec un temps de retard à un changement d'état d'ouverture de la vanne. Par ailleurs cette dernière a le temps de s'ouvrir complètement avant que la température de l'eau ne soit affectée par le changement d'état de la vanne.
- La température de l'air du box ($T_{i_air_box}$) réagit également avec un temps de retard sur un changement de la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur du box, $T_{a_aller_eau}$. Il en résulte un temps de retard de 4 à 5 minutes sur un changement d'état d'ouverture de la vanne.
- La température de l'eau à la sortie de l'échangeur du box change après environ 2 minutes à un changement brutal de la température d'entrée. Avec le débit mesuré, cela correspond à un volume d'environ 1.7 litre, que l'on peut attribuer à l'eau contenue dans l'échangeur de chaleur.

Ces effets de retard conduisent à un mauvais contrôle de la température de l'air du box et à des oscillations importantes des températures de l'eau à l'entrée et à la sortie de l'échangeur. Ces dernières entraînent une série d'alternance de chauffage et de refroidissement du box, ce qui n'est pas idéal pour la mesure de la puissance thermique transférée et la précision de l'énergie nette échangée pendant une période de mesure.

Cette constatation a conduit à développer un control PID pour la vanne mélangeuse (P : proportional, I : integral, D : differential). Il ne tient compte non seulement de la température de l'air du box et de son évolution, mais aussi de l'évolution de la température de l'eau à l'entrée de l'échangeur du box.

3.3 Contrôle PID

Le contrôle de la vanne mélangeuse est intégré dans le programme d'acquisition de mesure du datalogger CampBell CR1000. Le listing du programme se trouve dans l'annexe A.

Pour éviter l'apparition d'un écart de température entre l'intérieur d'un box et l'air de la pièce, la température de consigne est fixée sur la température mesurée de la pièce. De cette manière les échanges thermiques du box à la pièce sont maintenus aussi bas que possible. La solution retenue consiste à exécuter un ordre de commande chaque 30 secondes. Afin d'éviter que des variations trop rapides de cette dernière mettent en difficulté l'algorithme de contrôle, une moyenne glissante sur 30 minutes de la température de la pièce est utilisée comme température de consigne. La recherche des paramètres les plus adéquats pour le contrôle de la vanne a montré que ce sont surtout les fonctions P (proportional) et D (differential) qui sont utilisées. Il n'a pas été possible d'éliminer les oscillations de température, mais, en revanche, aucune alternance de chauffage et de refroidissement n'a été observée. La figure 3.2 permet d'illustrer le fonctionnement de la régulation pour une belle journée.

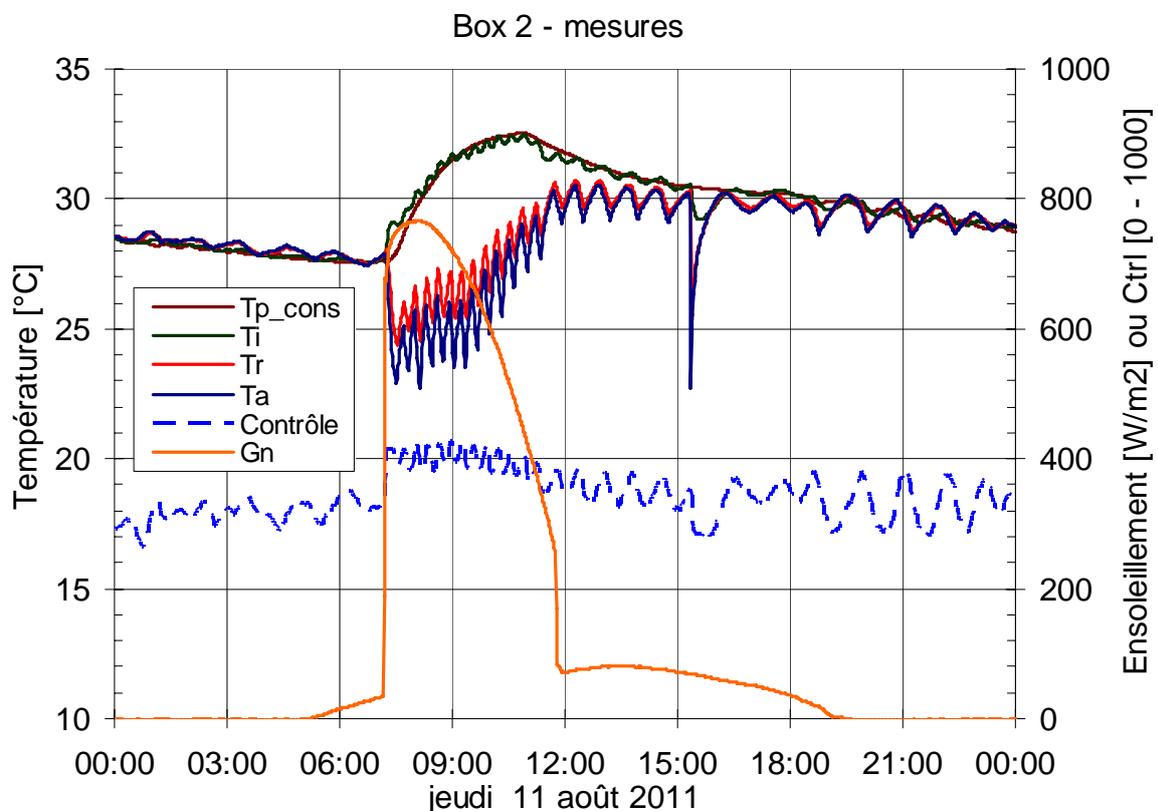


Figure 3.2 Contrôle PID de la vanne mélangeuse pour maintenir la température du box (Ti) à celle de la pièce (Tp_cons).

Les courbes montrées dans la figure 3.2 ont les significations suivantes :

T_{p_cons} température de consigne pour l'air dans un box [°C]

T_i température de l'air à l'intérieur d'un box [°C]

T_r température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box [°C]

T_a température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box [°C]

Contrôle : état d'ouverture de la vanne (0 : fermée ; 1000 : complètement ouverte) [-]

G_n rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box [W/m²]

Les courbes de température d'eau du graphique montrent une anomalie après 15h. Il s'agit d'un reset automatique journalier de la vanne. La vanne est brièvement ouverte au maximum, ce qui a pour conséquence de baisser sensiblement la température du box. La régulation réagit en ramenant la température du box sur sa valeur de consigne.

4. Description et construction d'un g-box

4.1 Schéma synoptique

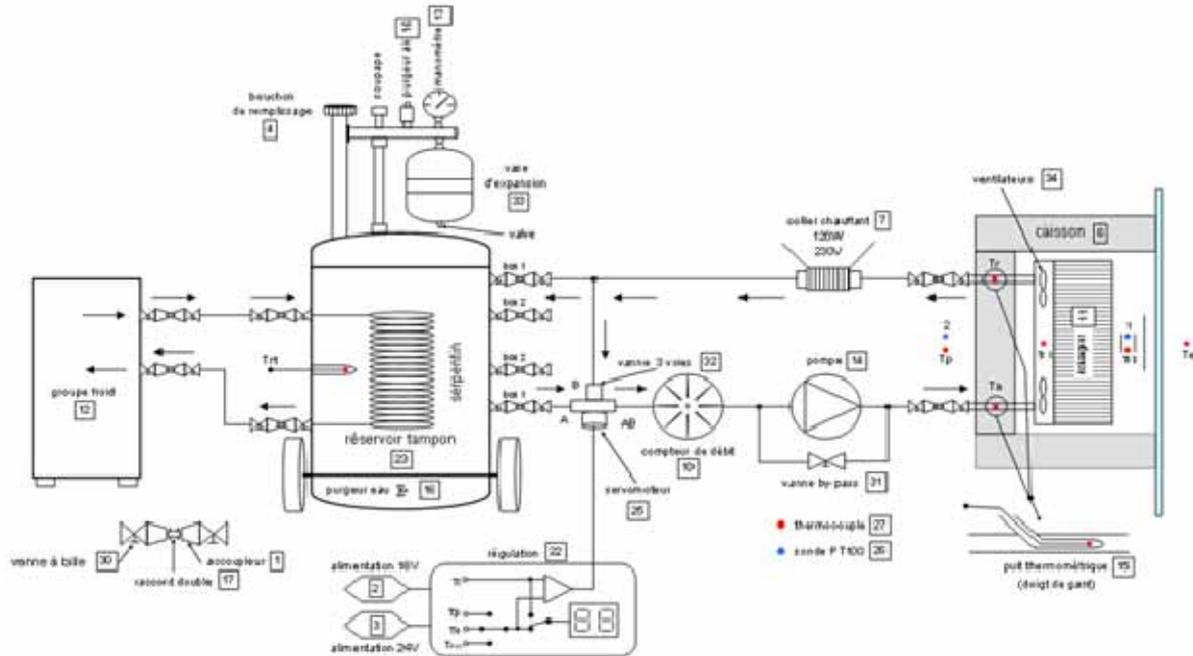


Figure 4.1 Schéma synoptique g-box.

De gauche à droite :

- groupe froid (circulateur intégré)
- circuit d'eau froide
- réservoir tampon (eau froide)
- circuit d'eau secondaire (mesure, régulation, circulation))
- enceinte thermique = calorimètre

Un groupe froid alimente un réservoir tampon de 100 litres via un échangeur de chaleur. Une boucle de circulation pompe l'eau à travers du radiateur à l'intérieur de l'enceinte isolée du calorimètre. Selon le besoin en refroidissement, la régulation commande une vanne à trois voies qui mélange l'eau extraite avec l'eau froide en provenance du réservoir tampon.

Selon le protocole, la température dans l'enceinte isolée peut être constante, réglée sur la température de la pièce, ou encore la température extérieure.

Pour les besoins de mesure comparative, un deuxième calorimètre avec un système de régulation et de mesure indépendant peut être connecté sur le réservoir tampon.

4.2 Construction

Enceinte thermique

L'échantillon de fenêtre est fixé contre un caisson isolé construit en polystyrène extrudé courant, épaisseur 100mm, de dimensions nettes de 500 x 500 x 500mm contenant un absorbeur (échangeur air/eau), un système de brassage d'air et des sondes de température.

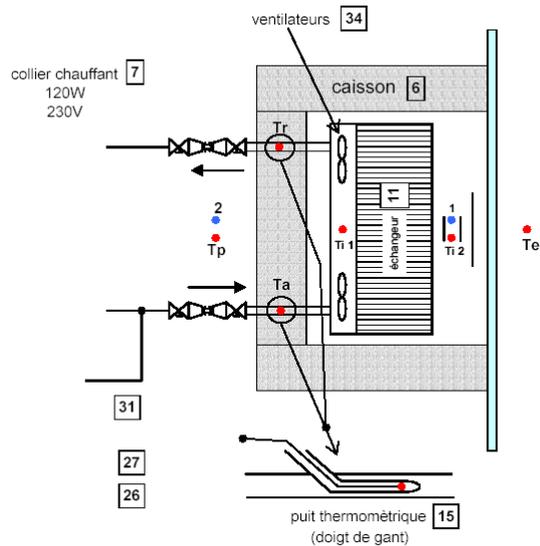


Figure 4.2 Schéma d'un box et mesures des températures.

Les sondes de température (thermocouples ; 15) sont installées dans des doigts de gant sur l'aller et le retour d'eau froide du radiateur / absorbeur.



Figure 4.3 Fabrication du caisson thermique.



Figure 4.4 Echangeur industriel et fond avec ventilateurs de brassage.



Figure 4.5 Boite thermique finie avec sondes de température entre l'absorbeur et l'échantillon (disque de protection de la sonde de température contre rayonnement solaire direct).

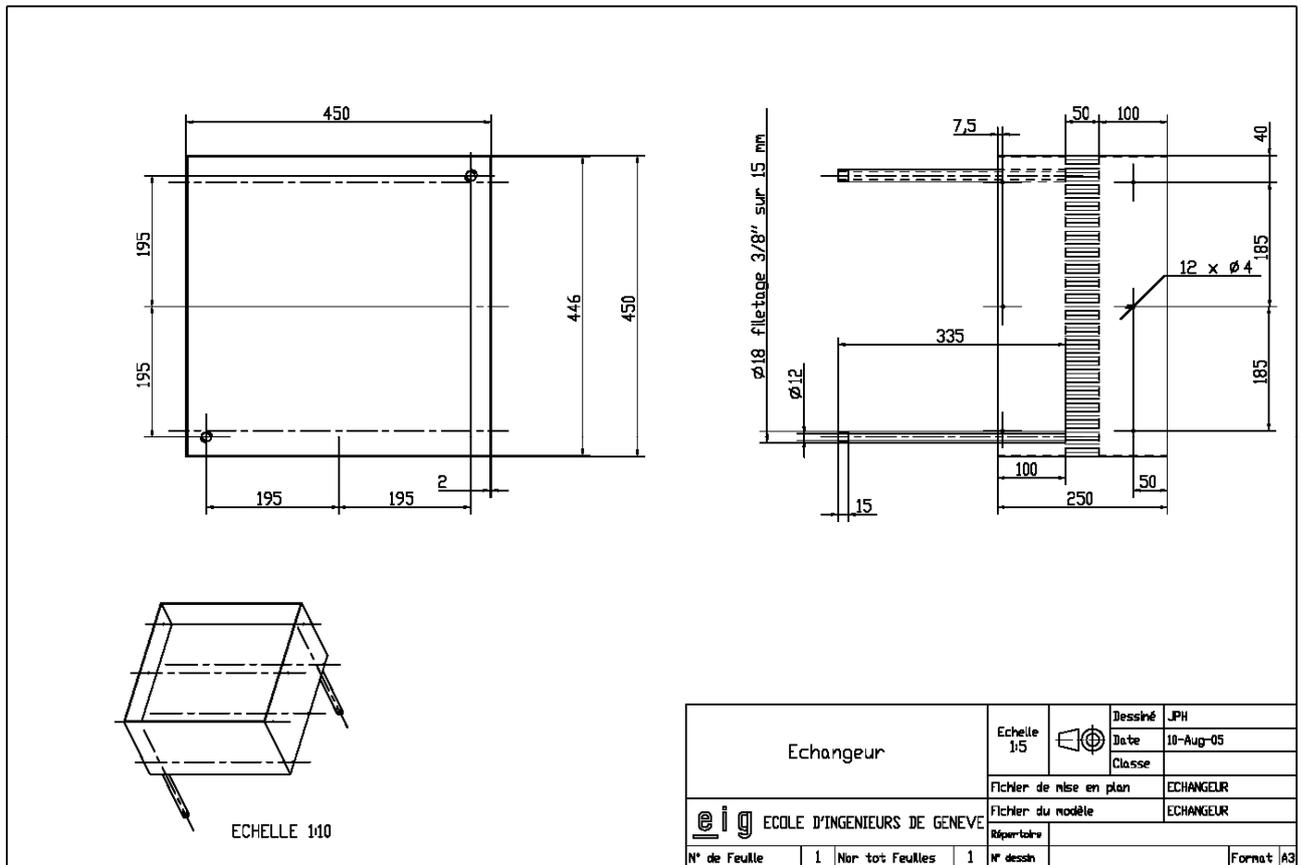


Figure 4.6 Dessin du radiateur / absorbeur.

Réservoir tampon

Le réservoir tampon contient environ 100 litres d'eau et sert à amortir les variations de température d'eau à la sortie du groupe de froid. Deux enceintes thermiques peuvent être raccordées sur ce réservoir.

Le circuit d'eau (glycolée) primaire du groupe de froid est séparé de l'eau du calorimètre moyennant un échangeur à spirale.

Pour assurer la portabilité, l'ensemble est équipé de roulettes de transport.

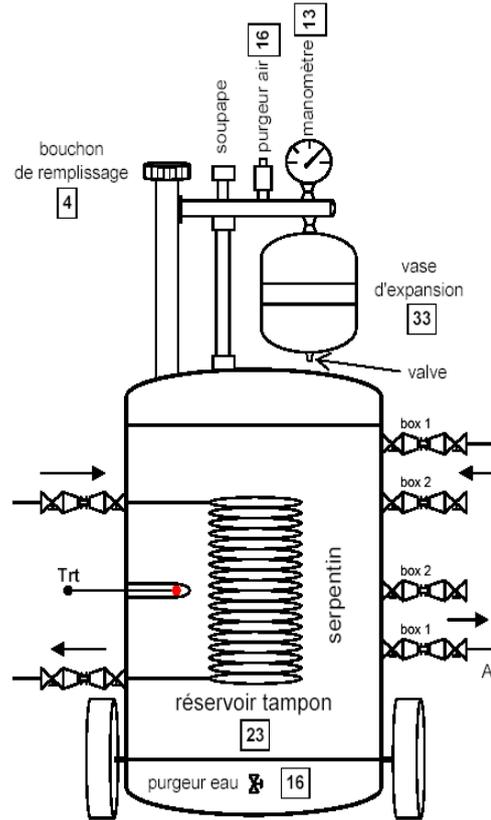


Figure 4.7 Réservoir tampon fini, avant isolation thermique.



Figure 4.8 Epreuve échangeur.

- **Circuit de régulation**

La régulation doit maintenir la température intérieure de l'enceinte thermique à une température de consigne. A cet effet, une vanne à 3 voies est commandée par une régulation en fonction de la différence de température entre :

- a) air extérieur et air intérieur de l'enceinte thermique
- b) température de consigne et air intérieur de l'enceinte thermique

Une pompe de brassage (14) fait circuler l'eau dans le circuit de calorimétrie.

Un collier chauffant (7) en option assure un apport de chaleur pour déterminer la valeur U en l'absence d'apports solaires (nuit).

Un capteur de débit de précision (10) évalue le débit d'eau de refroidissement.

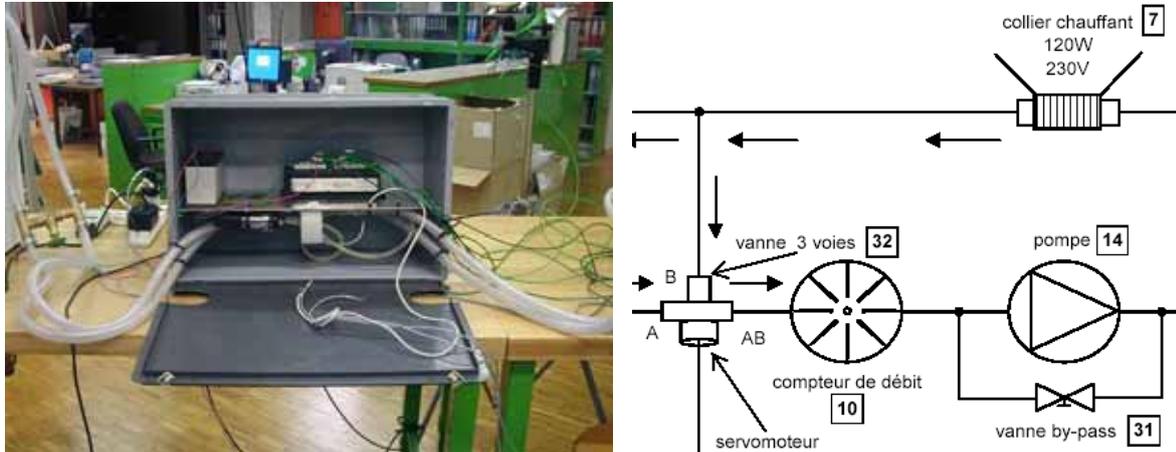


Figure 4.9 Boîtier contenant l'acquisiteur et la régulation.

Station climatique

Une station climatique mesure le rayonnement solaire à l'extérieur de l'échantillon translucide et la température de l'air extérieur.

La mesure de l'intensité du rayonnement solaire se fait dans le plan du verre moyennant un pyromètre.

Le capteur de température est installé dans un abri multi-plateaux conçu pour une protection contre le rayonnement solaire et les intempéries.



Figure 4.10 Vue plongeante sur la 'station météo' installée devant la façade étudiée.

5. Grandeurs mesurées et acquisition des mesures

5.1 Grandeurs mesurées

Météo : rayonnement solaire normal à la fenêtre et température ambiante.

Calorimètre : débit d'eau, température du caloporteur aller et retour, température air de la pièce et air calorimètre

Suivi installation : température du réservoir tampon, puissance absorbée des ventilateurs de brassage, tension de contrôle des électrovannes

5.2 Calibration

Les mesures de température sont faites avec des thermocouples de type K (chromel / alumel). Les senseurs de mesure ont été calibrée à l'aide d'un bain thermostatique et d'une température de référence. Les débitmètres, quand à eux, ont été calibré en usine (cf. annexe C).

5.3 Acquisition

Le contrôle et l'acquisition est opérée par un acquiiseur programmable. Son exploitation se fait via réseau Ethernet pour être configurable et consultable à distance. Afin de suivre les mesures en temps réel, une interface graphique permet l'affichage des paramètres d'exploitation les plus importants :

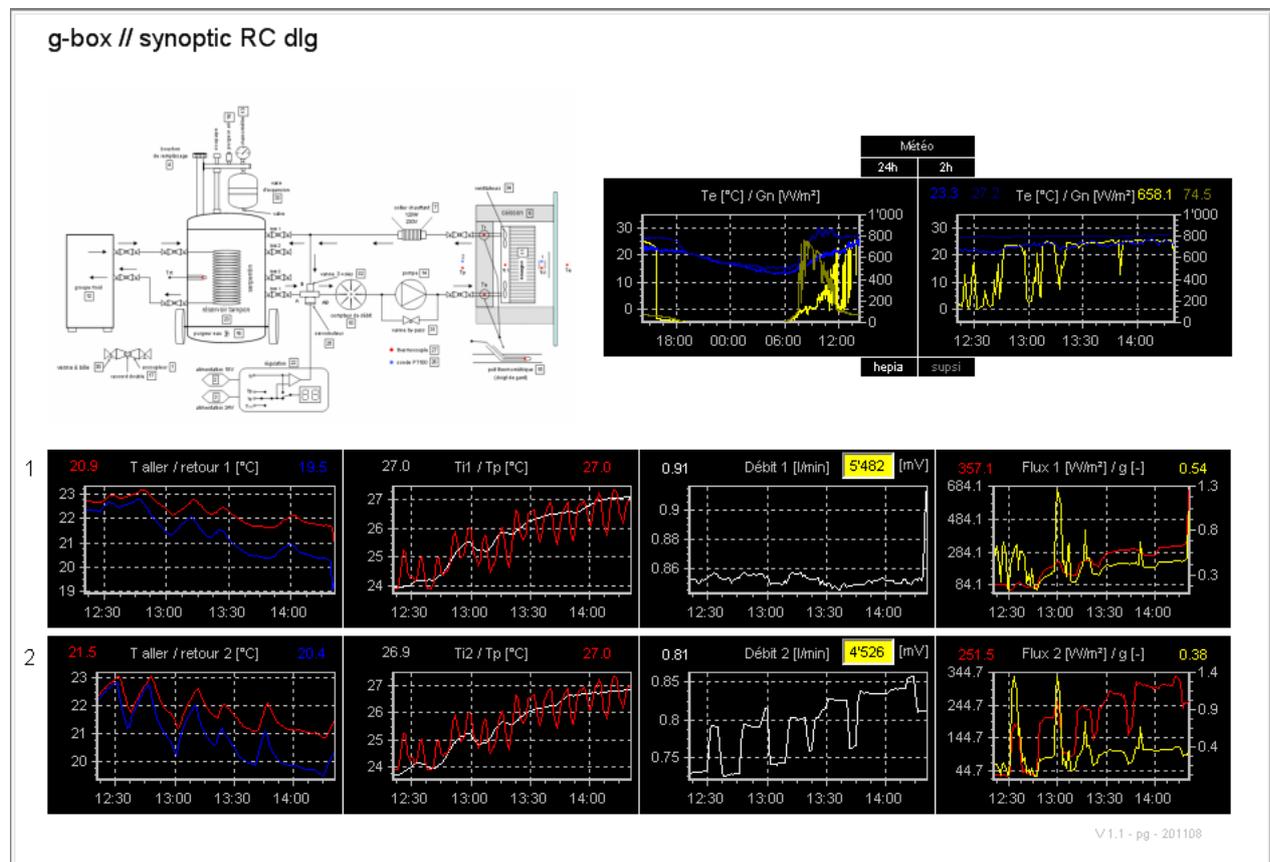


Figure 5.1 Capture d'écran de l'interface RTMC.



Figure 5.2 Coffret contenant l'acquisiteur, l'unité de contrôle analogique et l'alimentation

Les données sont rapatriées pour un post-traitement à la demande.

Le programme d'acquisition des mesures, listé dans l'annexe A, est édité et compilé par le programme Loggernet (2010). Chargé dans le datalogger CR1000, il configure les canaux d'acquisition du datalogger, définit les modalités de mesure, applique les corrections issues des calibrations et contrôle les vannes trois voies des boîtes.

Les mesures sont effectuées chaque 2 secondes. Les valeurs moyennes ou les sommes des grandeurs mesurées sont enregistrées chaque minute. Les branchements du datalogger et les grandeurs enregistrées sont rapportés dans l'annexe C.

6. Caractéristiques thermiques des box

6.1 Introduction

Un modèle thermique simplifié d'un box est proposé (cf. section 6.2). Des mesures de stagnation (section 6.3 et 6.5) et de relaxation (section 6.4) de deux box plaqués face à face, avec et sans vitrage entre eux, ont été réalisées pour déterminer leur caractéristiques thermiques et établir les paramètres thermiques d'un modèle thermique simplifié. Les deux box de l'ISAAC ont été utilisés pour les manipes.

6.2 Modèle thermique simplifié d'un box

Un modèle thermique simplifié d'un box est montré dans la figure 6.1. Deux nœuds sont définis, correspondant à T_i , la température mesurée de l'air dans le box, et T_{eau} , la température moyenne de l'eau dans l'échangeur de chaleur interne du box. Cette dernière est approximée et définie comme la moyenne arithmétique des températures mesurées de l'eau à l'aller (T_a) et au retour (T_r). On suppose que les puissances thermiques correspondant au ventilateur et aux gains solaires sont intégralement absorbées par le nœud défini par la température de l'air du box (T_i).

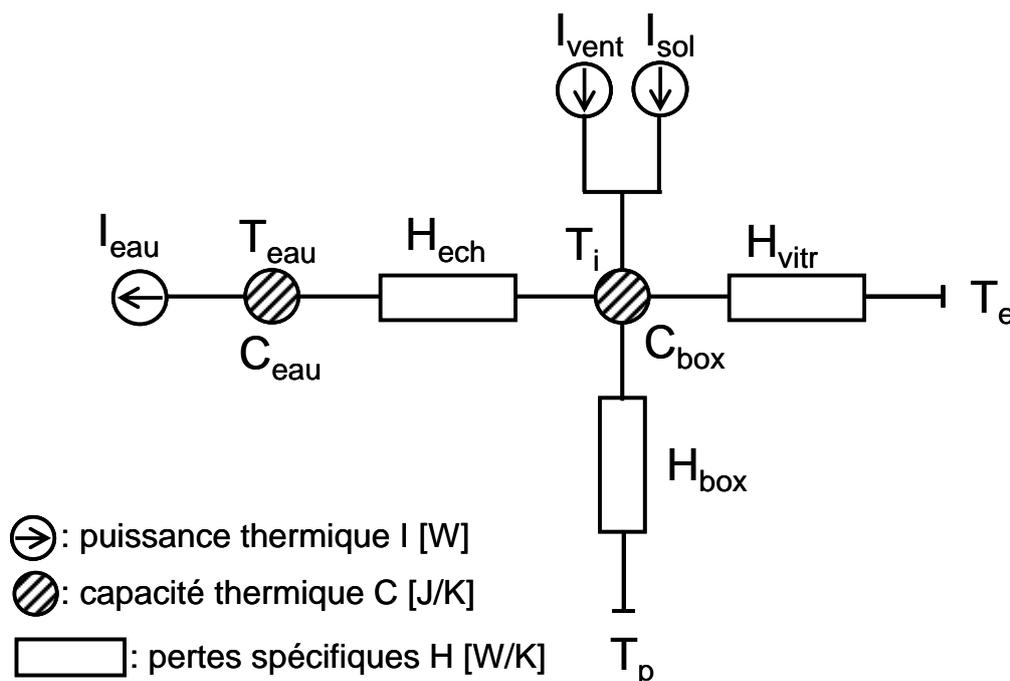


Figure 6.1 Modèle thermique simplifié d'un box avec deux nœuds de températures.

Températures [°C] :

$T_{\text{eau}} = (T_a + T_r)/2$ température moyenne de l'eau dans l'échangeur de chaleur interne au box, définie comme la moyenne arithmétique des températures mesurées « aller » T_a et « retour » T_r .

T_i température de l'air mesurée dans le box.

T_e température de l'air extérieur.

T_p température de l'air de la pièce dans laquelle se trouve le box.

Puissances thermiques [W] :

$I_{\text{eau}} = \dot{m} c_{\text{eau}} (T_r - T_a)$ puissance thermique échangée par l'eau dans l'échangeur de chaleur interne au box, avec : $c_{\text{eau}} = 4'175$ [J/litre/K], la capacité thermique volumétrique de l'eau évaluée à la températures de travail de 20°C, et \dot{m} [litre/s], le débit volumique de l'eau qui traverse l'échangeur de chaleur.

I_{vent} puissance thermique dégagée par le ventilateur interne du box, qui a pour fonction de brasser l'air dans le but d'uniformiser les températures de l'air. Elle est supposée être égale à la consommation électrique du ventilateur, mesurée à environ 3 [W].

$I_{\text{sol}} = g G S$ puissance thermique résultant des gains solaires dans le box. G [W/m²] est l'ensoleillement global incident dans le plan d'ouverture du box et S [m²] sa surface d'ouverture. Le facteur g est la fraction de l'ensoleillement incident qui se retrouve sous forme de chaleur dans le box. Elle comprend aussi bien la composante directe (ensoleillement piégé dans le box) que indirecte (suite à l'échauffement du vitrage) des gains solaires.

Capacités thermiques [J/K] :

C_{eau} capacité thermique associée à l'eau dans l'échangeur de chaleur. Elle comprend également la contribution du métal qui constitue l'échangeur de chaleur.

C_{box} capacité thermique associée à l'air dans le box. Elle comprend également une partie de la capacité thermique des matériaux directement en contact avec l'air du box, dont la contribution principale est créée par le vitrage. Elle ne comprend pas la capacité thermique associée à l'eau.

Pertes spécifiques [W/K] :

H_{ech} coefficient de transfert thermique de l'échangeur de chaleur. Il correspond au facteur usuellement dénoté UA pour les échangeurs de chaleur.

H_{box} pertes spécifique du box dans la pièce dans laquelle il se trouve.

$H_{\text{vitr}} = U_{\text{vitr}} S$ pertes spécifiques du box à l'extérieur à travers le vitrage. U_{vitr} [W/(m²K)] est le coefficient des pertes thermiques du vitrage et S [m²] la surface d'ouverture du box.

Le modèle thermique montré dans la figure 6.1 se réduit à celui de la figure 6.2 quand les manipes pour la caractérisation thermique des box sont réalisées. En effet l'ensoleillement solaire est nul et les deux box, collés face à face, sont placés à l'intérieur. Ils n'ont donc pas de pertes thermiques vers l'extérieur.

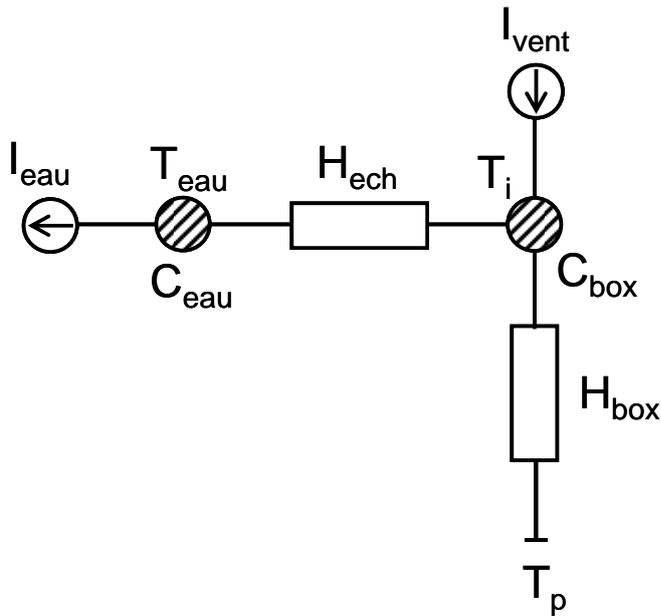


Figure 6.2 Modèle thermique simplifié d'un box avec deux nœuds de température dans la situation où les deux box sont plaqués face à face.

6.3 Pertes spécifiques des box sans l'effet d'un vitrage

Deux box sont plaqués l'un vers l'autre, sans vitrage entre eux. La figure 6.3 permet de montrer comment les deux box sont placés.



Figure 6.3 Placement des deux box pour les mesures de stagnation et de relaxation.

- Les pompes de circulation des échangeurs des box sont arrêtées.
- Les ventilateurs sont enclenchés pour le brassage de l'air à l'intérieur des deux box.
- La vanne de chaque box est complètement fermée, ce qui empêche l'eau du stockage tampon d'entrer dans l'échangeur du box.

Les seuls gains thermiques dans les box sont causés par les deux ventilateurs. La température de l'air dans les box doit donc se stabiliser au dessus de la température de la pièce, une fois que les pertes spécifiques des deux box compensent les gains thermiques des ventilateurs.

La température de la pièce se situe à environ 26°C, et la température intérieure des box se stabilise à environ 32°C. La figure 6.4 montre l'évolution de l'écart de température $T_i - T_p$. Les mesures entre 0h et 6h montre qu'il est stabilisé et permet d'estimer les pertes spécifiques des deux box. On peut remarquer qu'avant la stabilisation de l'écart de température ce dernier était plus grand, partant d'une situation initiale différente, qui correspond en fait à la situation finale de la manipe présentée ci-après.

Les pertes spécifiques sont évaluées en attribuant une puissance thermique de 3 [W] pour le ventilateur du box 1 et de 2.9 [W] pour le deuxième, sur la base de mesures électriques ponctuelles de la tension d'alimentation et du courant absorbé.

Les oscillations observées sont causées par la mesure de la température de la pièce, qui est influencée par les enclenchements et déclenchements successifs du groupe de froid.

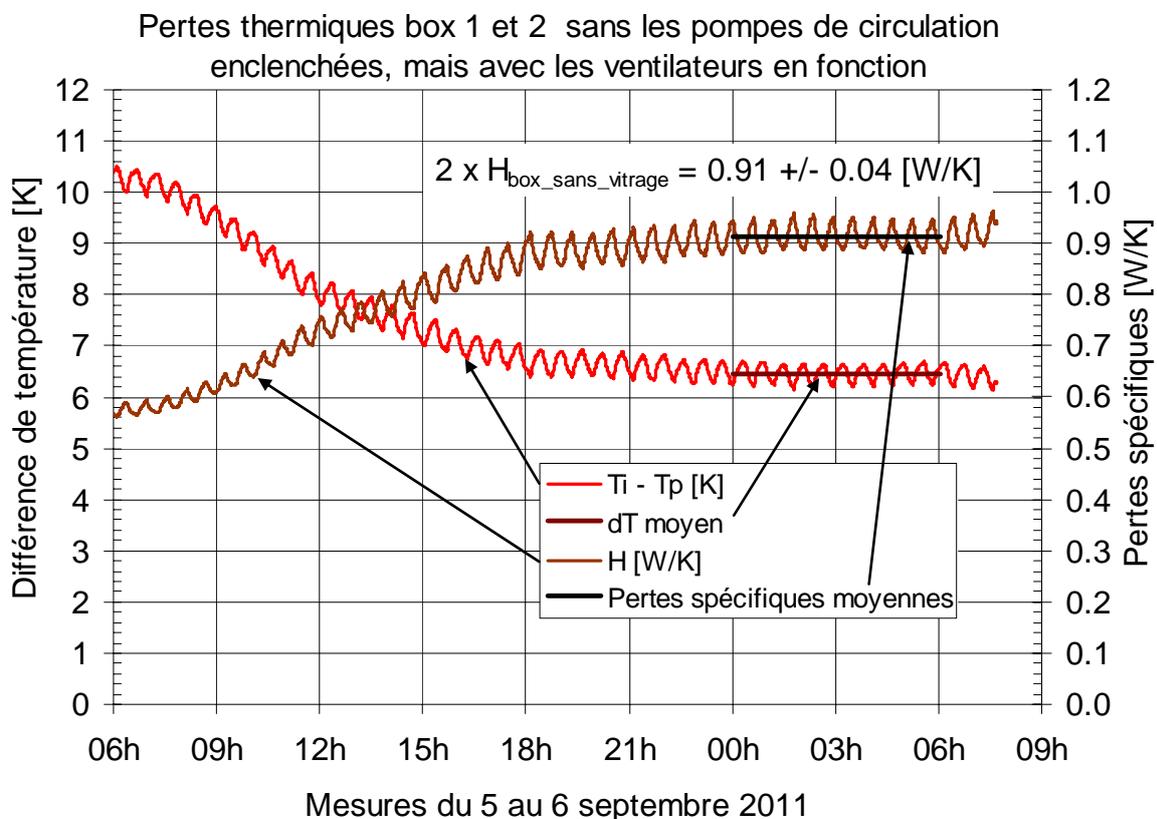


Figure 6.4 Détermination des pertes spécifiques des deux box sans vitrage entre les deux.

En supposant les deux box identiques, les pertes spécifiques d'un box, sans tenir compte d'un vitrage, sont évaluées à :

$$H_{\text{box_sans_vitrage}} = 0.46 \pm 0.03 \text{ [W/K]}$$

6.4 Capacité thermique de l'échangeur des box

Cette manipe, toujours exécutée avec la même configuration des deux box (cf. figure 6.3), s'est chronologiquement déroulée avant les mesures analysées dans la section précédente. La situation initiale est un état stationnaire en refroidissement.

- Les pompes de circulation des échangeurs des deux box sont enclenchées.
- Les vannes sont complètement ouvertes, de façon à ce que le groupe de froid refroidisse au maximum les deux box.
- Les ventilateurs à l'intérieur des box sont enclenchés.

La phase de relaxation débute quand les vannes sont complètement fermées. Comme la pompe de circulation est enclenchée, la température de l'eau suit la température de l'air du box.

Le graphique de la figure 6.5 permet de montrer les évolutions de la température et de la puissance transférée dans le box 1. Un graphique semblable est obtenu pour le box 2.

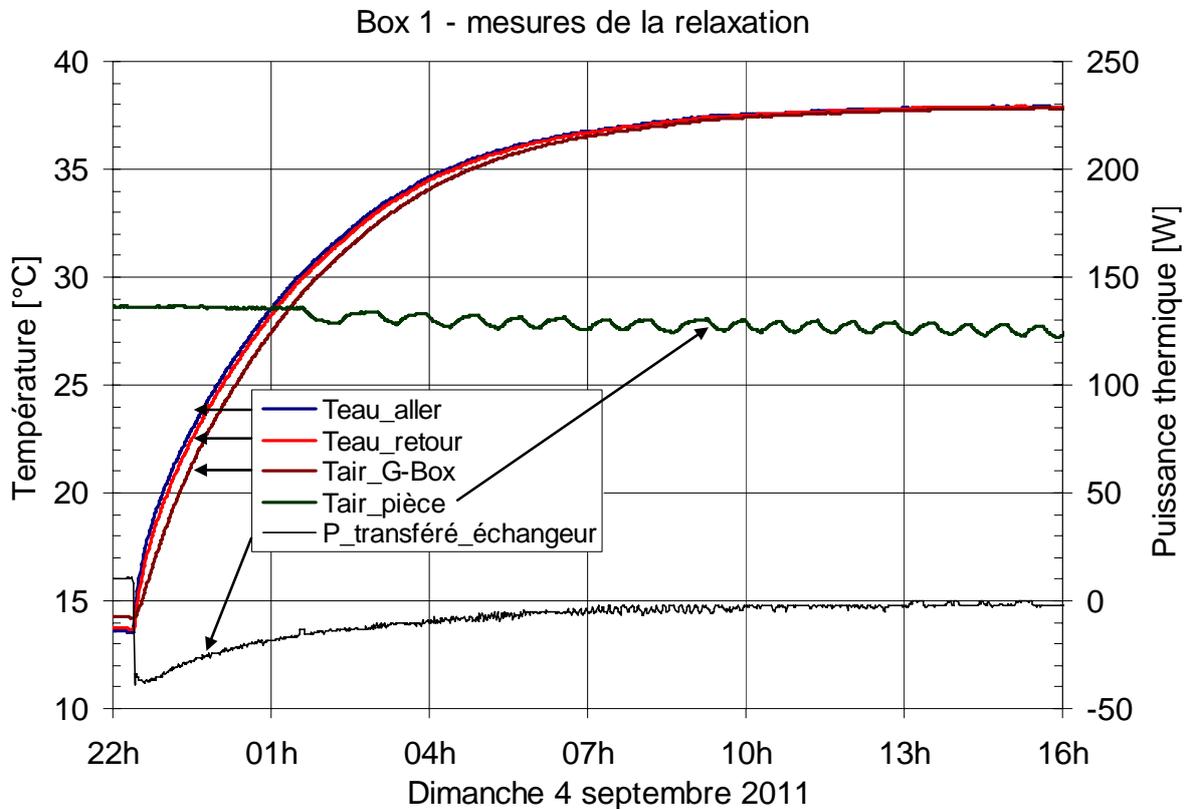


Figure 6.5 Evolution des températures de fluide, de l'air et de la puissance transférée dans le box 1 pendant la phase de relaxation sans vitrage.

On observe un phénomène de relaxation qui fait évoluer les températures de l'eau de 14°C (condition initiale) à 38°C, asymptote pour laquelle les gains dans le circuit hydraulique sont compensés par les pertes thermiques dans la pièce. Des courbes similaires sont mesurées dans le box 2. On peut observer que la température de cette dernière est suffisamment stable pendant la phase de relaxation.

Les gains dans le circuit hydraulique sont la puissance dissipée par les ventilateurs dans les deux box et la puissance dissipée par les pompes de circulation dans l'eau circulant dans les

deux boucles fermées. Ils peuvent être supposés constants durant la période de relaxation. L'estimation de la constante de temps se base principalement sur la partie finale de la relaxation. Dans la figure 6.6 la courbe de relaxation est obtenue avec une constante de temps de 3.0 ± 0.1 [h] pour les mesures faites dans le box 1. Les mesures du box 2 portent à la même estimation.

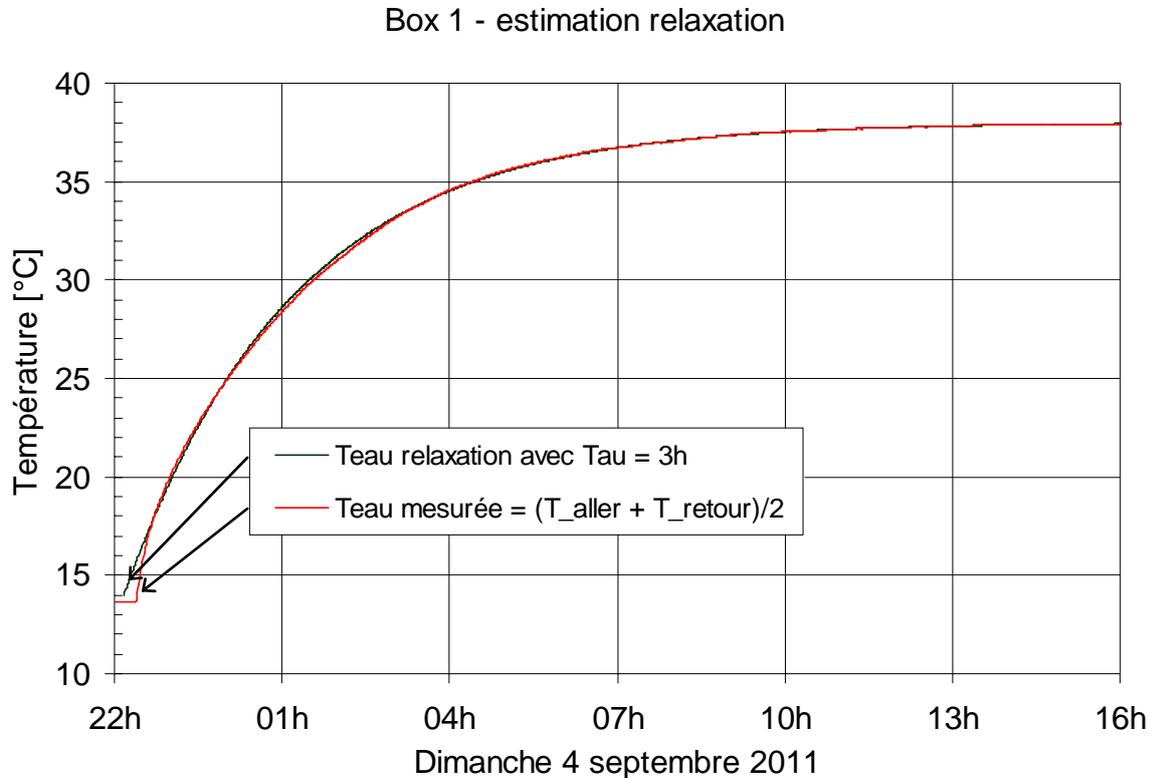


Figure 6.6 Evolution de la température de l'eau dans le box 1 pendant la phase de relaxation sans vitrage.

La constante de temps se rapporte à la relaxation de tout le circuit hydraulique, et comprend deux sections distinctes : la partie interne aux box et la partie externe. En supposant que la constante de temps associée à la section interne ne diffère pas significativement de celle qui est estimée pour le circuit hydraulique, la capacité thermique associée à l'eau dans un échangeur d'un box est obtenue avec les pertes spécifiques du box dans la pièce ($H_{\text{box_sans_vitrage}}$). La constante de temps, définie comme le quotient de la capacité thermique par les pertes spécifiques, permet de calculer la capacité thermique associée à l'eau dans l'échangeur d'un box :

$$C_{\text{eau}} = 5'000 \pm 400 \text{ [J/K]}$$

La capacité thermique associée à l'eau est équivalente à 1.2 litre d'eau.

Etant donné la forte isolation d'un box, on peut tout de même s'attendre à ce que la constante de temps associée à la partie interne du circuit hydraulique soit plus grande que celle de la partie externe. La constante de temps estimée pour tout le circuit est donc

également plus petite, et l'évaluation de la capacité thermique associée à l'eau d'un box devrait représenter une valeur minimum.

6.5 Calibration secondaire des mesures de puissance thermique

Les mesures de relaxation avec la circulation de l'eau aboutissent à une situation de stagnation des températures dans le box. L'écart de température entre l'air du box et l'air de la pièce devient stable et permet, grâce au coefficient des pertes spécifiques d'un box ($H_{\text{box_sans_vitrage}}$), d'établir un bilan énergétique et de calibrer la puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur, ce qui revient à apporter une correction sur la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'eau du box.

La stagnation des températures en « chaud » permet d'obtenir ainsi un point de calibration à une température plus élevée que celle de la pièce. Un deuxième point de calibration est obtenu à une température inférieure, en réalisant cette fois une situation de stagnation en « froid », qui correspond à la situation initiale de la phase de relaxation (cf. section précédente).

Le graphique de la figure 6.7 permet de montrer l'évolution de l'écart de température et la puissance transférée par les deux échangeurs de chaleur. Leur contribution est comparable à celle des ventilateurs et va dans le sens d'un chauffage du box. La température intérieure des box est en fait la moyenne des mesures T_i de chaque box. La baisse de température observée entre 15 et 18h est causée par le reset quotidien des vannes, qui les ouvre ponctuellement à 100%, forçant l'ordre de commande d'ouverture de la régulation.

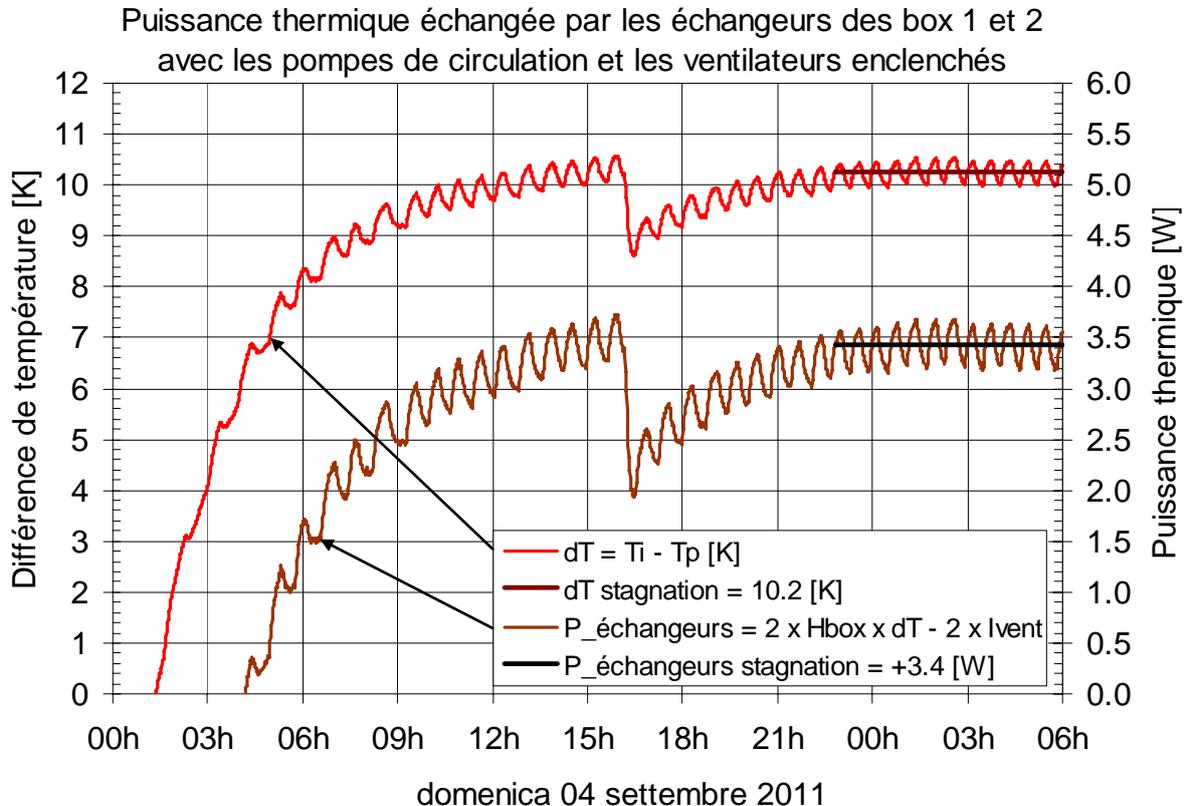


Figure 6.7 Détermination de la puissance thermique transférée par les deux échangeurs de chaleur en situation de stagnation en « chauffage ».

Les résultats suivants sont obtenus en régime de stagnation :

$$dT = T_i - T_p = +10.24 \pm 0.17 \text{ [K]}$$

$$2 \times I_{\text{eau}} = 10.24 \text{ [K]} \times 0.91 \text{ [W/K]} - 5.90 \text{ [W]} = 3.42 \pm 0.48 \text{ [W]}$$

Puissance de chauffage transférée par échangeur de chaleur: $1.7 \pm 0.3 \text{ [W]}$

La définition de la puissance de transfert d'un échangeur de chaleur ($I_{\text{eau}} = \dot{m} c_{\text{eau}} (T_r - T_a)$) implique que le chauffage d'un box s'exprime avec un signe négatif et le refroidissement avec un signe positif.

Pour que les puissances transférées mesurées correspondent à -1.7 [W] , il faut corriger l'écart de température ($T_r - T_a$) comme suit :

Box 1 : ($T_r - T_a$) doit être corrigé de -0.024K à la température de l'eau de 37°C

Box 2 : ($T_r - T_a$) doit être corrigé de -0.077K à la température de l'eau de 37°C

Une analyse plus approfondie indique que la correction de température peut s'appliquer préférentiellement sur les mesures de température aller T_a :

Box 1 : T_a peut être corrigée de $+0.024\text{K}$ à la température de l'eau de 37°C

Box 2 : T_a peut être corrigée de $+0.077\text{K}$ à la température de l'eau de 37°C

Dans la table 6.1 les valeurs moyennes des valeurs mesurées durant la phase de stagnation en « chauffage » sont indiquées avec et sans calibration secondaire.

Calibration secondaire à 37°C	Box 1		Box 2	
	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire
Tretour T_r [$^\circ\text{C}$]	37.28	37.28	37.29	37.29
Taller T_a [$^\circ\text{C}$]	37.28	37.30	37.23	37.31
$T_r - T_a$ [K]	-0.005	-0.029	+0.053	-0.024
Débit m [l/min]	0.84	0.84	1.02	1.02
Puissance échangée I_{eau} [W]	-0.30	-1.70	+3.75	-1.69

Table 6.1 Calibration secondaire des températures de l'eau en situation de stagnation en « chauffage ».

Une analyse similaire est faite pour la phase de stagnation en refroidissement (cf figure 6.8). La puissance extraite par les deux échangeurs de chaleur est plus importante car elle inclut les gains thermiques des deux ventilateurs.

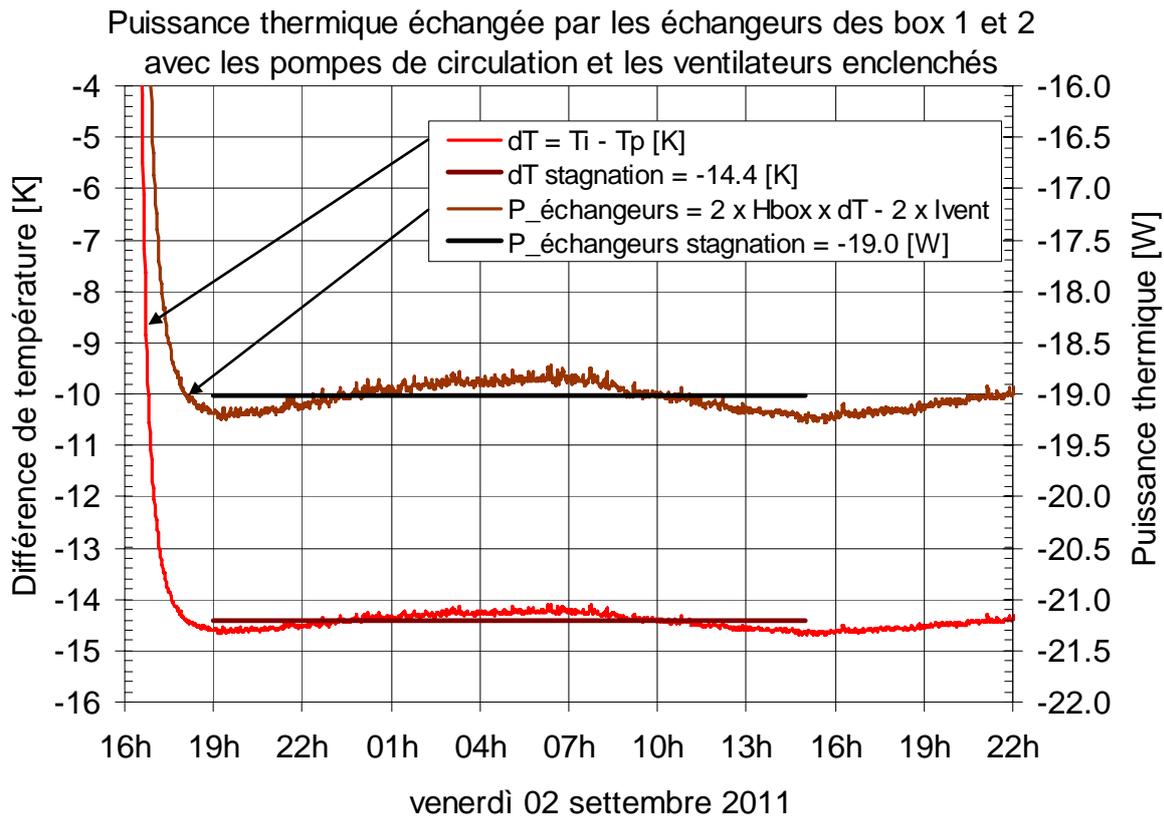


Figure 6.8 Détermination de la puissance thermique transférée par les deux échangeurs de chaleur en situation de stagnation en « chauffage ».

Les résultats suivants sont obtenus en régime de stagnation :

$$dT = T_i - T_p = -14.41 \pm 0.14 \text{ [K]}$$

$$2 \times I_{\text{eau}} = -14.41 \text{ [K]} \times 0.91 \text{ [W/K]} - 5.90 \text{ [W]} = -19.01 \pm 0.62 \text{ [W]}$$

Puissance de chauffage transférée par échangeur de chaleur: -9.5 ± 0.4 [W]

Rappel : la définition de la puissance de transfert par $I_{\text{eau}} = \dot{m} c_{\text{eau}} (T_r - T_a)$ implique que le chauffage d'un box s'exprime avec un signe négatif et le refroidissement avec un signe positif.

Pour que les puissances transférées mesurées correspondent à $+9.5$ [W], il faut corriger l'écart de température ($T_r - T_a$) comme suit :

Box 1 : ($T_r - T_a$) doit être corrigé de -0.022K à la température de l'eau de 14°C

Box 2 : ($T_r - T_a$) doit être corrigé de $+0.140\text{K}$ à la température de l'eau de 14°C

Une analyse plus approfondie indique que la correction de température peut s'appliquer préférentiellement sur les mesures de température aller T_a :

Box 1 : T_a peut être corrigée de $+0.022\text{K}$ à la température de l'eau de 14°C

Box 2 : T_a peut être corrigée de -0.140K à la température de l'eau de 14°C

Dans la table 6.2 les valeurs moyennes des valeurs mesurées durant la phase de stagnation en « chauffage » sont indiquées avec et sans calibration secondaire.

Calibration secondaire à 14°C	Box 1		Box 2	
Mesures	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire
Tretour Tr [°C]	13.62	13.62	13.68	13.68
Taller Ta [°C]	13.48	13.50	13.69	13.55
Tr – Ta [K]	+0.139	+0.117	-0.004	+0.136
Débit m [l/min]	1.17	1.17	1.00	1.00
Puissance échangée I _{eau} [W]	+11.32	+9.53	-0.25	+9.49

Table 6.2 Calibration secondaire des températures de l'eau en situation de stagnation en « refroidissement ».

6.6 Coefficient de transfert de chaleur des échangeurs de chaleur

Le coefficient de transfert de chaleur de l'échangeur de chaleur est simplement défini par le quotient de la puissance thermique transférée par la différence de température entre l'eau et l'air à l'intérieur du box. La température de l'eau est définie comme la valeur moyenne entre la température d'entrée (Ta) et de sortie (Tr) de l'échangeur de chaleur.

Le coefficient de transfert de chaleur de l'échangeur de chaleur est évalué pour les deux situations de stagnation et pour chacun des box. Les tables 6.3 et 6.4 permettent de montrer les résultats obtenus avec et sans calibration secondaire des températures. On peut remarquer la bonne concordance des températures de l'air intérieur aux box. Pas de correction n'est effectuée.

Stagnation à 37°C	Box 1		Box 2	
Mesures	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire
Teau = (Ta + Tr)/2 [°C]	37.28	37.29	37.26	37.30
Tair box Ti [°C]	37.23	37.23	37.19	37.19
Ti – Teau [K]	-0.051	-0.063	-0.067	-0.106
Puissance échangée I _{eau} [W]	-0.30	-1.70	+3.75	-1.69
Coefficient H _{ech} [W/K]	6	27 ± 22	-56 !	16 ± 8

Table 6.3 Estimation du coefficient de transfert thermique des échangeurs en situation de stagnation en « chauffage ».

Stagnation à 14°C	Box 1		Box 2	
Mesures	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire	sans calibration secondaire	avec calibration secondaire
Teau = (Ta + Tr)/2 [°C]	13.55	13.56	13.69	13.62
Tair box Ti [°C]	14.15	14.15	14.17	14.17
Ti – Teau [K]	+0.598	+0.587	+0.485	+0.555
Puissance échangée I _{eau} [W]	+11.32	+9.53	-0.25	+9.49
Coefficient H _{ech} [W/K]	19	16 ± 2	-1 !	17 ± 2

Table 6.4 Estimation du coefficient de transfert thermique des échangeurs en situation de stagnation en « refroidissement ».

Sans calibration secondaire les valeurs estimées des coefficients H_{ech} ne sont pas cohérentes. Une valeur négative est obtenue pour le box 2, ce qui signifie une incompatibilité entre le sens des puissances thermiques mesurées.

L'erreur calculée sur le coefficient H_{ech} est basée sur une erreur de 0.05K sur la différence de température Ti – Teau. L'estimation des coefficient H_{ech}, après calibration secondaire, donne des résultats satisfaisants. En raison des erreurs trop importantes en période de stagnation en « chauffage », les estimations en période de stagnation en « refroidissement » sont adoptées pour la détermination du coefficient H_{ech} :

$$H_{ech} = 16.5 \pm 2.0 \text{ [W/K]}$$

6.7 Effet du vitrage triple sur les caractéristiques thermiques

Les mêmes manipes que dans les sections précédentes sont réalisées mais avec un vitrage entre les deux box (cf. figure 6.9). Une période de stagnation en « refroidissement » est réalisée, suivie d'une relaxation pour se terminer avec une période de stagnation en « chauffage ».



Figure 6.9 Placement des deux box pour les mesures de stagnation et de relaxation avec vitrage entre les deux.

Les pertes spécifiques des deux box avec l'effet du vitrage sont déterminées sur la base des mesures des puissances thermiques calibrées, des gains des ventilateurs et de la différence de température entre l'air intérieur des box et l'air de la pièce.

$$2 \times H_{\text{box}} = (I_{\text{vent}} - I_{\text{eau}}) / (T_i - T_p)$$

Dans la figure 6.10 sont montrés les deux situations de stagnation (refroidissement et chauffage) utilisées pour la détermination de H_{box} .

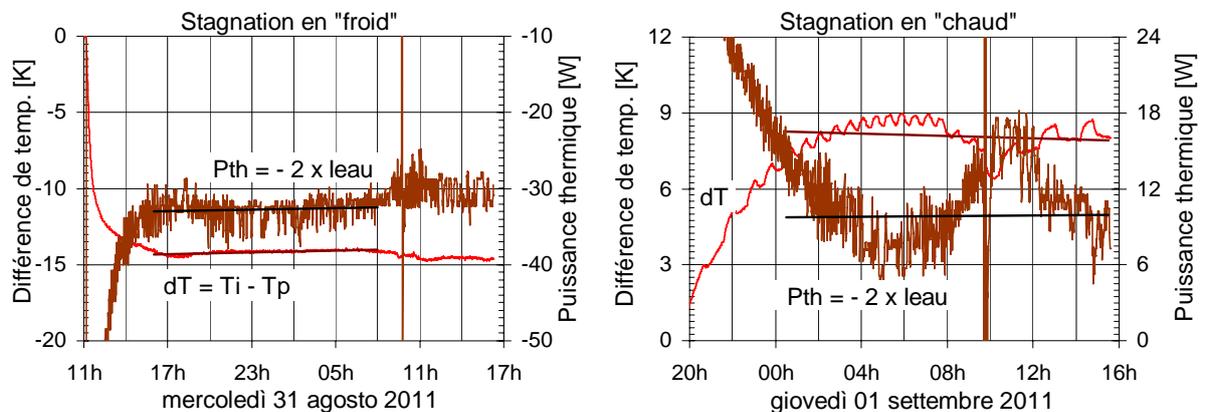


Figure 6.10 Mesures de stagnation en « chauffage » et en « refroidissement » pour la détermination du coefficient des pertes spécifiques H_{box} des box avec un vitrage entre les deux.

Les estimations sont :

- stagnation en refroidissement : $H_{\text{box}} = (5.9 - 32.7) / (-14.2) = 1.89 \pm 0.20$ [W/K]
- stagnation en chauffage : $H_{\text{box}} = (5.9 - (-9.9)) / 8.1 = 1.95 \pm 0.21$ [W/K]

Le triple vitrage de l'aula A204 du bloque A de Trevano, pris en sandwich entre les deux box, a pour effet de doubler les pertes spécifiques dans la pièce. La valeur suivante est admise comme représentative pour un box appliqué contre un vitrage :

$$H_{\text{box}} = 1.0 \pm 0.2 \text{ [W/K]}$$

La phase de relaxation, effectuée avec le triple vitrage entre les box, permet d'estimer la constante de temps à 2.8 [h]. La capacité thermique comprise à l'intérieur des box est estimée à 19'000 ± 400 [J/K]. La moitié (9'500 [J/K]) est assignée à chacun des box. Elle comprend la capacité thermique associée à l'eau des échangeurs de chaleur (5'000 [J/K]). La capacité thermique d'un box (C_{box}) est donc estimée en retranchant la capacité thermique liée à l'eau C_{eau} :

$$C_{\text{box}} = 4'500 \pm 400 \text{ [J/K]}$$

6.8 Résultats de la caractérisation thermique des box

Les analyses thermiques effectuées sur les box ont permis de quantifier les paramètres du modèle thermique simplifié d'un box. Elles offrent également la possibilité de vérifier la cohérence des mesures effectuées et de faire une calibration secondaire des températures de l'eau afin d'améliorer la précision de mesure des puissances thermiques.

Les caractéristiques des box sont récapitulées dans la table 6.5.

Paramètre thermique	Box 1		Box 2	
Puissance dissipée par le ventilateur I_{vent}	3.0	± 0.1 [W]	2.9	± 0.1 [W]
Coefficient de pertes spécifique du box H_{box}	1.0	± 0.2 [W/K]	1.0	± 0.2 [W/K]
Coefficient de transfert thermique de l'échangeur H_{ech}	16.5	± 2.0 [W/K]	16.5	± 2.0 [W/K]
Capacité thermique du box, vitrage inclus C_{box}	4'500	± 400 [J/K]	4'500	± 400 [J/K]
Capacité thermique de l'eau dans l'échangeur C_{eau}	5'000	± 400 [J/K]	5'000	± 400 [J/K]

Table 6.5 Paramètres thermiques estimés pour les 2 box de l'ISAAC.

La calibration secondaire a conduit à ne corriger qu'une seule température, la température de l'eau à l'entrée du box (T_a). Les valeurs de correction sont énumérées dans la table 6.6.

Calibration secondaire	Box 1	Box 2
Température d'entrée de l'eau dans l'échangeur de chaleur T_a	+0.022 K à 14°C	-0.140 K à 14°C
	+0.024 K à 37°C	+0.077 K à 37°C

Table 6.6 Corrections sur la température T_a obtenues avec calibration secondaire pour les 2 box de l'ISAAC.

7. Analyse des mesures et calcul d'erreur

7.1 Introduction

L'analyse des mesures s'appuie sur le modèle thermique d'un box présenté dans le chapitre précédent. Un bilan énergétique est effectué pendant un intervalle de temps représentatif de façon à obtenir une expression pour le coefficient g . Les intervalles de mesure analysés sont sélectionnés en fonction de critères d'ensoleillement et d'angle d'incidence dans le plan du vitrage.

L'amplitude des erreurs aléatoires est quantifiée et des corrections sont proposées pour corriger des erreurs systématiques.

7.2 Calcul du coefficient g

Un bilan énergétique d'un box revient à intégrer les puissances thermiques pendant un intervalle de temps constitué par N mesures enregistrées. Les énergies obtenues sont exprimées sous la forme de puissances moyennes pendant l'intervalle de temps $N \times \Delta t$, Δt étant le temps entre chaque mesure enregistrée. Il est fixé à 1 minute dans le système d'acquisition des mesures ; (les mesures enregistrées sont elles-mêmes des valeurs moyennes de mesures effectuées avec une fréquence de 2 secondes).

Conformément au modèle thermique de la figure 6.1 du chapitre précédent, un bilan énergétique nécessite le calcul des puissances thermiques moyennes suivantes :

Puissance thermique extraite d'un box (P_{eau}) :

$$P_{\text{eau}} = \frac{C_{\text{eau}}}{N} \sum \dot{m} (T_r - T_a) + \frac{C_{\text{eau}} (T_{\text{eau_fin}} - T_{\text{eau_in}})}{N \Delta t} \quad (7.1)$$

P_{eau} [W] puissance thermique moyenne nette transférée à l'intérieur du box, compte tenu de la capacité thermique de l'eau contenue dans l'échangeur de chaleur (positive : refroidissement du box, négative : chauffage du box).

$C_{\text{eau}} = 4'175$ [J/litre/K], capacité thermique volumétrique de l'eau ;

\dot{m} [litre/s] débit volumique de l'eau qui traverse l'échangeur de chaleur ;

T_a [°C] température aller de l'eau dans l'échangeur de chaleur ;

T_r [°C] température retour de l'eau de l'échangeur de chaleur ;

C_{eau} [J/K] capacité thermique associée à l'eau dans l'échangeur de chaleur ;

$T_{\text{eau_fin}} = [(T_a + T_r)/2]_{\text{fin}}$ température moyenne de l'eau dans l'échangeur de chaleur à la fin de l'intervalle de temps $N \Delta t$. Elle est évaluée comme la moyenne des mesures à cheval sur la fin de l'intervalle de temps et le début du suivant ;

$T_{\text{eau_in}} = [(T_a + T_r)/2]_{\text{in}}$ température moyenne de l'eau dans l'échangeur de chaleur au début de l'intervalle de temps $N \Delta t$. Elle est évaluée comme la moyenne des mesures à cheval sur la fin de l'intervalle de temps précédent et le début de l'intervalle actuel ;

$\Delta T = 60$ [s] temps entre deux mesures enregistrées.

Pertes thermiques dans la pièce (P_{pertes_p}) :

$$P_{\text{pertes}_p} = \frac{H_{\text{box}}}{N} \sum (T_i - T_p) \quad (7.2)$$

P_{pertes_p} [W] puissance thermique moyenne perdue (positive) ou gagnée (négative) de la pièce ;

T_i [°C] température de l'air mesurée dans le box ;

T_p [°C] température de l'air de la pièce dans laquelle se trouve le box ;

H_{box} [W/K] pertes spécifique du box dans la pièce dans laquelle il se trouve.

Pertes thermiques à l'extérieur (P_{pertes_e}) :

$$P_{\text{pertes}_e} = \frac{H_{\text{vitr}}}{N} \sum (T_i - T_e) \quad (7.3)$$

P_{pertes_e} [W] puissance thermique moyenne perdue (positive) ou gagnée (négative) à l'extérieur ;

T_e [°C] température de l'air extérieur ;

$H_{\text{vitr}} = U_{\text{vitr}} S$ [W/K] pertes spécifiques du box à l'extérieur à travers le vitrage. U_{vitr} [W/m²K] est le coefficient U des pertes thermiques du vitrage et S [m²] la surface d'ouverture du box.

Effet capacitif d'un box ($P_{\text{capa}_\text{box}}$) :

$$P_{\text{capa}_\text{box}} = \frac{C_{\text{box}} (T_{i_fin} - T_{i_in})}{N \Delta t} \quad (7.4)$$

$P_{\text{capa}_\text{box}}$ [W] puissance thermique moyenne absorbée (positive) ou libérée (négative) par la capacité thermique du box ;

C_{box} [J/K] capacité thermique associée au box ;

T_{i_fin} [°C] température de l'air dans le box à la fin de l'intervalle de temps $N \Delta t$. Elle est évaluée comme la moyenne des mesures à cheval sur la fin de l'intervalle de temps et le début du suivant ;

T_{i_in} [°C] température de l'air dans le box au début de l'intervalle de temps $N \Delta t$. Elle est évaluée comme la moyenne des mesures à cheval sur la fin de l'intervalle de temps précédent et le début de l'intervalle actuel ;

Puissance de chauffage du ventilateur (P_{vent}) :

$P_{\text{vent}} = I_{\text{vent}}$ [W] puissance thermique moyenne dégagée par le ventilateur (gain thermique dans le box défini comme étant positif). Elle est égale à la valeur instantanée, qui est supposée constante.

Puissance de chauffage des gains solaires (P_{sol}) :

$$P_{\text{sol}} = g \frac{S}{N} \sum G \quad (7.5)$$

P_{sol} [W] puissance thermique moyenne dégagée par les gains solaires dans le box (gain thermique défini comme étant positif) ;

G [W/m²] ensoleillement global incident dans le plan d'ouverture du box ;

g [-] coefficient g du vitrage.

Un bilan thermique du box implique que les gains thermiques soient compensés par les pertes thermiques, les flux d'énergie extrait et absorbé dans le box :

$$P_{sol} + P_{vent} = P_{eau} + P_{pertes_p} + P_{pertes_e} + P_{capa_box} \quad (7.6)$$

Pour les mesures sélectionnées dans un intervalle de temps fixé, le coefficient g est obtenu avec la relation 7.7 :

$$g = \frac{P_{eau} + P_{pertes_p} + P_{pertes_e} + P_{capa_box} - P_{vent}}{\frac{S}{N} \sum G} \quad (7.7)$$

7.3 Erreurs aléatoires

Dans cette section les erreurs aléatoires des mesures enregistrées sont passées en revue et quantifiées.

Température

Les mesures de température sont réalisées avec des thermocouples de type K (chromel / alumel) en mode SE (single ended). Le voltage à fond d'échelle est fixé à 7.5 mV, ce qui permet de mesurer une différence de température avec le datalogger de ± 187 K (40 μ V/K).

La précision de lecture du datalogger pour une mesure est donnée par (Campbell, 2011) :

- précision = 0.06% tension + offset
- offset pour SE = 3 x Basic Resolution (2 μ V pour 7.5mV à fond d'échelle) + 3 μ V = 9 μ V
- incertitude de ± 0.225 K
- incertitude de 0.06% sur la mesure de tension est négligeable.

On suppose une distribution rectangulaire de l'incertitude. L'écart-type est obtenu en divisant l'incertitude par racine de 3:

$$\sigma_{mesure} = 0.130 \text{ K}$$

Les mesures de température sont effectuées toutes les 2 sec. Les valeurs enregistrées sont des valeurs moyennes sur 1 minute, donc des moyennes de 30 mesures. L'écart-type de la moyenne est obtenue avec la relation suivante, sachant que $N = 30$:

$$\sigma_{moyenne} = \sigma_{mesure} / \sqrt{N}$$

$$\sigma_{moyenne} = 0.024 \text{ K}$$

Pour avoir un intervalle de confiance de 95%, l'écart-type est multiplié par 1.65 avec une distribution rectangulaire.

L'incertitude des mesures de température, enregistrées en moyennes minute par minute, est donc de ± 0.04 K pour un intervalle de confiance de 95%.

L'évaluation de l'incertitude de mesure ci-dessus ne prend pas en compte l'incertitude liée au capteur lui-même. Une analyse des courbes de calibration des thermocouples permet de mettre en évidence un écart-type de 0.03 K. L'incertitude des mesures de température est fixée à 2 écarts-types pour obtenir un intervalle de confiance de 95% :

Incertaince des mesures de température (2σ) : 0.06 K

Incertaince d'une différence de température ($\sqrt{4\sigma^2 + 4\sigma^2}$) : 0.08 K

Ensoleillement

La mesure de l'ensoleillement se fait par une mesure de tension en différentiel (DF). Le voltage à fond d'échelle est fixé à 25 mV, ce qui permet de mesurer un ensoleillement qui pourrait théoriquement atteindre 5'000 W/m² (5 μ V/(W/m²)).

La précision de lecture du datalogger pour une mesure est donnée par (Campbell, 2011) :

- précision = 0.06% tension + offset
- offset pour DF = 1.5 x Basic Res (6.7 μ V pour 25mV à fond d'échelle) + 1 μ V = 11 μ V
- incertaince de ± 2.2 W/m²
- incertaince de 0.06% sur la mesure de tension est négligeable.

On suppose une distribution rectangulaire de l'incertaince. L'écart-type est obtenu en divisant l'incertaince par racine de 3:

$$\sigma_{\text{mesure}} = 1.3 \text{ W/m}^2$$

Les mesures de température sont effectuées toutes les 2 sec. Les valeurs enregistrées sont des valeurs moyennes sur 1 minute, donc des moyennes de 30 mesures. L'écart-type de la moyenne est obtenue avec la relation suivante, sachant que N = 30 :

$$\sigma_{\text{moyenne}} = \sigma_{\text{mesure}} / \sqrt{N}$$

$$\sigma_{\text{moyenne}} = 0.23 \text{ W/m}^2$$

Pour avoir un intervalle de confiance de 95%, l'écart-type est multiplié par 1.65 avec une distribution rectangulaire.

L'incertaince des mesures d'ensoleillement, enregistrées en moyennes minute par minute, est donc de ± 0.38 W/m² pour un intervalle de confiance de 95%.

L'évaluation de l'incertaince de mesure ci-dessus ne prend pas en compte l'incertaince liée au capteur lui-même. Une incertaince de 1% de la mesure est ajoutée pour tenir compte de la précision déclarée du solarimètre.

Incertaince des mesures d'ensoleillement (2σ) : 0.4 W/m² + 1% mesure

Débit

Les débitmètres utilisés, selon les spécifications du fabricant, ont une précision de 1.25% de la valeur de fond d'échelle. La gamme de mesure des débitmètres Kobold, pour le modèle Pelton-Turbine PEL L045 GN1F, s'étend de 0.04 à 6.3 litre/min. On en déduit :

- incertitude de 0.08 litre/min

On suppose une distribution rectangulaire de l'incertitude. L'écart-type est obtenu en divisant l'incertitude par racine de 3:

$$\sigma_{\text{mesure}} = 0.046 \text{ litre/min}$$

Les mesures de débit sont effectuées toutes les 2 sec. Les valeurs enregistrées sont des valeurs moyennes sur 1 minute, donc des moyennes de 30 mesures. L'écart-type de la moyenne est obtenue avec la relation suivante, sachant que $N = 30$:

$$\sigma_{\text{moyenne}} = \sigma_{\text{mesure}} / \sqrt{N}$$

$$\sigma_{\text{moyenne}} = 0.008 \text{ litres/min}$$

Pour avoir un intervalle de confiance de 95%, l'écart-type est multiplié par 1.65 avec une distribution rectangulaire.

L'incertitude des mesures de débit, enregistrées en moyennes minute par minute, est donc de ± 0.014 litre/min pour un intervalle de confiance de 95%.

Une analyse des courbes de calibration des débitmètres permet de mettre en évidence un écart-type de 0.01 litre/min. L'incertitude des mesures de débit est fixée à 2 écart-types pour obtenir un intervalle de confiance de 95% :

Incertitude des mesures de débit (2σ) : 0.02 litre/min

7.4 Calcul des erreurs aléatoires

Le calcul d'erreur se base sur l'équation 7.7 et les incertitudes liées aux mesures et aux paramètres physiques du box. Dans la table 7.1 toutes les incertitudes nécessaires aux calculs sont énumérées.

Mesure / paramètre	Incertitude
Température	0.06 [K]
Différence de température	0.08 [K]
Ensoleillement	0.4 [W/m ²] + 1% valeur mesurée
Débit	0.02 [litre/min]
Largeur/hauteur de l'ouverture d'un box	50.0 ± 0.5 [cm]
Puissance dissipée par ventilateur I_{vent}	3.0 ± 0.1 [W]
Coefficient de pertes spécifique d'un box H_{box}	1.0 ± 0.2 [W/K]
Capacité thermique de l'eau dans l'échangeur C_{eau}	5'000 ± 400 [J/K]
Capacité thermique d'un box, vitrage inclus C_{box}	4'500 ± 400 [J/K]

Table 7.1 Incertitudes des mesures et des paramètres physiques des box

Une fois les pertes spécifiques du box au travers du vitrage connues (H_{vitr}), les valeurs g peuvent être calculées. L'erreur aléatoire, quant à elle, dépendra de la durée, fixée à N minutes, qui est choisie pour faire le bilan énergétique du box (cf. équation 7.7). On peut remarquer que toutes les puissances moyennes sont obtenues par une relation du type

$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$. Il en résulte une incertitude qui diminue avec un facteur $\frac{1}{\sqrt{N}}$:

$$\sigma_x = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{x_i}^2} = \frac{1}{N} \sqrt{N \sigma_{x_{\text{moy}}}^2} = \frac{\sigma_{x_{\text{moy}}}}{\sqrt{N}} \quad \text{en posant} \quad \sigma_{x_{\text{moy}}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{x_i}^2$$

Dans la figure 7.1 les valeurs g sont montrées pour des intervalles de temps de 2 minutes et de 40 minutes. L'intervalle de temps est centré sur le temps pour lequel g est évalué. Les valeurs moyennes sont calculées par moyennes glissantes, et seulement si chaque mesure de l'intervalle satisfait aux deux conditions suivantes :

- ensoleillement dans le plan de la fenêtre supérieur à 200 W/m^2 ;
- angle d'incidence inférieur à 50° .

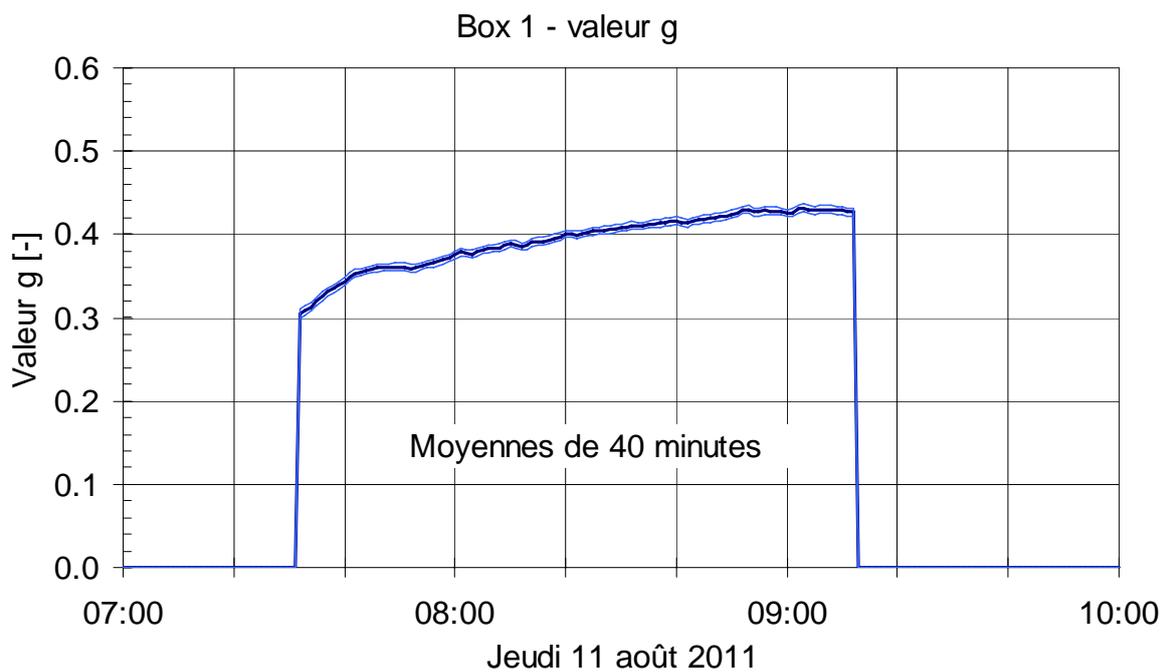
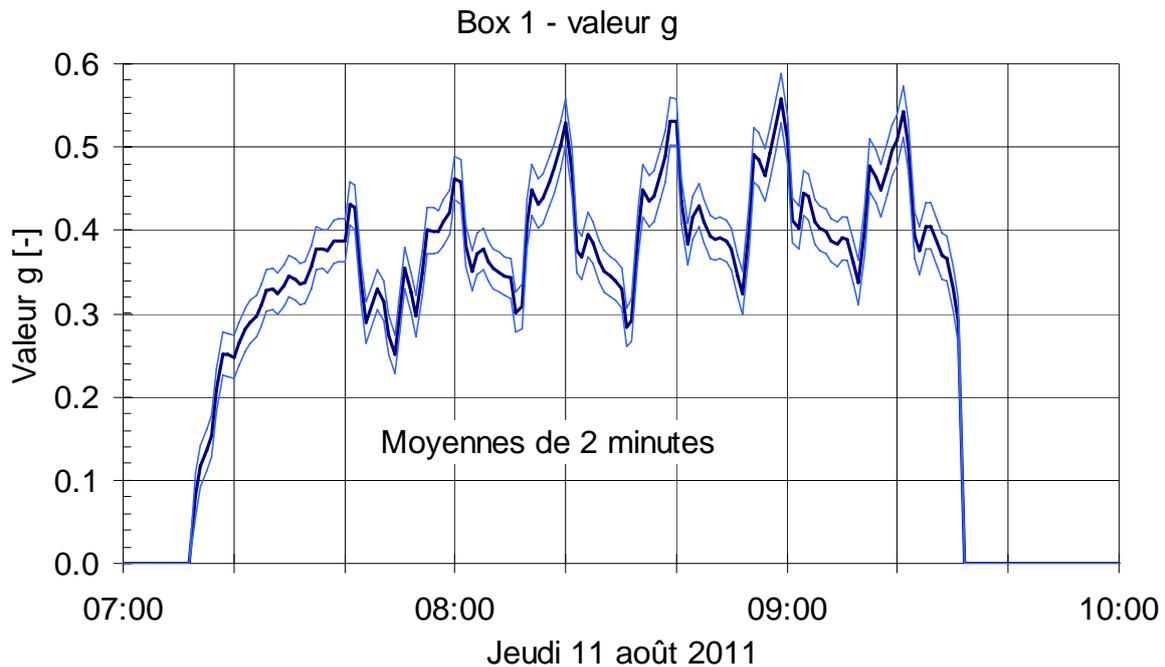


Figure 7.1 L'erreur aléatoire des valeurs g diminue quand ce dernier est évalué sur une période plus longue.

Les graphiques de la figure 7.1 montrent clairement que l'erreur aléatoire ne permet pas d'expliquer la volatilité des valeurs g. Il est bien évident que le modèle physique utilisé est plus précis si les valeurs moyennes sont évaluées sur de plus longues périodes. En l'occurrence, la régulation de la puissance thermique extraite présente des oscillations dont la période est d'environ 20 minutes. L'analyse des mesures a montré que des moyennes sur 40 minutes permet de lisser les oscillations de la régulation de façon satisfaisante.

Les erreurs aléatoires, calculées avec des valeurs moyennes sur 40 minutes, ne sont pas représentatives de l'erreur effectivement commise sur le coefficient g. En d'autres termes, les erreurs aléatoires sont négligeables relativement à des effets qui ne sont pas pris en compte par le modèle physique.

Par ailleurs il faut savoir que l'analyse des erreurs aléatoires ne prend pas en compte les erreurs systématiques, qui sont supposées être nulles. Dans la section suivante, l'influence d'une erreur systématique est quantifiée sur l'évaluation du coefficient g.

7.5 Erreurs systématiques

Les mesures d'une belle journée ensoleillée (jeudi 11 août 2011), effectuées dans le bâtiment A de la SUPSI à Trevano, sont utilisées pour quantifier l'influence des erreurs systématiques sur l'évaluation du coefficient g (cf. table 7.2). Le dispositif g-box est installé dans la classe A204, les deux box sont appliqués contre un vitrage orienté vers l'est sans protection solaire et dont les caractéristiques données par le fabricant sont les suivantes :

- valeur U du vitrage : 0.5 [W/(m²K)]
- coefficient g : 0.38 [-]

Erreur systématique sur mesure / paramètre		Influence sur g	
Différence de température $T_r - T_a$	+0.1 [K]	$\Delta g = +0.019$ [-]	$\Delta g/g = +4.7\%$
Débit	+0.02 [l/min]	$\Delta g = +0.015$ [-]	$\Delta g/g = +3.8\%$
Ensoleillement	+1%	$\Delta g = -0.004$ [-]	$\Delta g/g = -1.0\%$
Température air box T_i	+1 [°C]	$\Delta g = +0.007$ [-]	$\Delta g/g = +1.8\%$
Température air extérieur T_e	+1 [°C]	$\Delta g = -0.002$ [-]	$\Delta g/g = -0.5\%$
Température air pièce T_p	+1 [°C]	$\Delta g = -0.005$ [-]	$\Delta g/g = -1.3\%$
Largeur/hauteur ouverture box	+0.5 [cm]	$\Delta g = -0.008$ [-]	$\Delta g/g = -1.9\%$
Puissance dissipée par ventilateur	+0.1 [W]	$\Delta g = -0.001$ [-]	$\Delta g/g = -0.1\%$
Pertes spécifique d'un box H_{box}	+0.2 [W/K]	$\Delta g = 0.000$ [-]	$\Delta g/g = 0.0\%$
Capacité thermique eau C_{eau}	+400 [J/K]	$\Delta g = 0.000$ [-]	$\Delta g/g = 0.0\%$
Capacité thermique box C_{box}	+400 [J/K]	$\Delta g = +0.001$ [-]	$\Delta g/g = +0.2\%$

Table 7.2 Influence des erreurs systématiques sur l'évaluation du coefficient g

L'incertitude totale sur g, obtenue avec la racine de la somme des carrés de chaque incertitude individuelle, est calculée à ± 0.03 [-]. Elle donne une indication de la précision avec laquelle les mesures sont capables de déterminer le coefficient g. L'incertitude totale est équivalente à une incertitude de +0.15 K sur la différence de température $T_r - T_a$.

Des dérives ou des déviations plus importantes du coefficient g sont à attribuer à des effets « parasites » non pris en compte dans le modèle physique simplifié qui est utilisé pour analyser les mesures.

7.6 Corrections possibles des erreurs systématiques

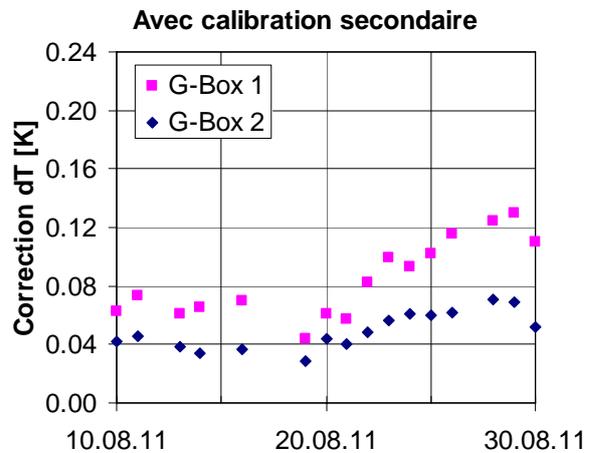
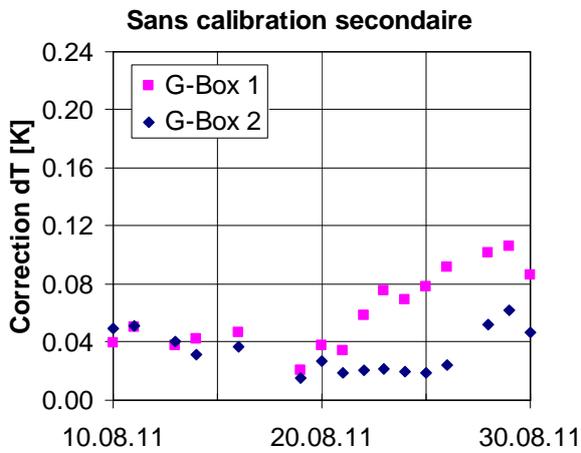
Dans le chapitre précédent, la caractérisation thermique des box a permis d'établir une méthode pour réaliser une calibration secondaire de la mesure de température de l'eau circulant dans les échangeurs des box, permettant ainsi d'affiner la mesure de la puissance thermique transférée.

Une autre possibilité est de calculer le bilan énergétique du box pendant la nuit, typiquement de 0h à 6h, et d'appliquer une correction de façon à ce que la somme des gains thermiques soit égale aux pertes. De nuit, le bilan énergétique, calculé par la relation (7.6), se réduit à la relation (7.8) :

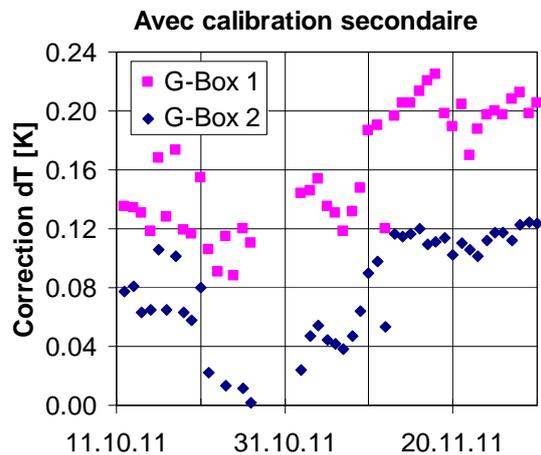
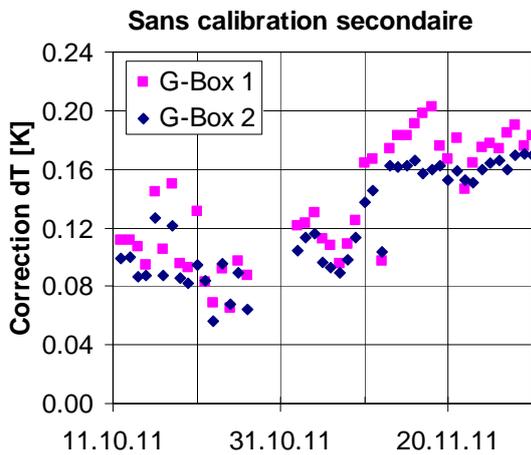
$$P_{\text{vent}} = P_{\text{eau}} + P_{\text{pertes}_p} + P_{\text{pertes}_e} + P_{\text{capa_box}} \quad (7.8)$$

Il est possible d'appliquer une correction à l'écart de température « entrée – sortie » de l'eau de l'échangeur, ou encore au coefficient U des pertes thermiques du vitrage, de façon à satisfaire le bilan énergétique. On obtient de la sorte deux possibilités de corriger les mesures avec des facteurs de correction journaliers, avec ou sans calibration secondaire. Les figures 7.2 et 7.3 permettent d'apprécier l'évolution des corrections journalières dans les différents cas de figure et pour les 3 séries de mesures effectuées à la SUPSI (cf. chapitre suivant).

SUPSI – bâtiment A – Aula 204



SUPSI – toit BIPV – modules de droite



SUPSI – toit BIPV – modules du centre

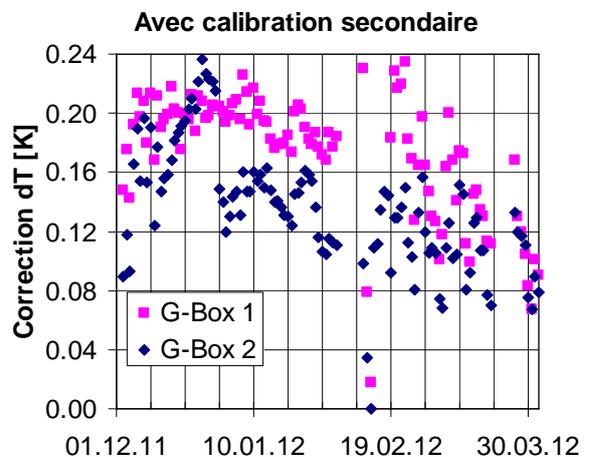
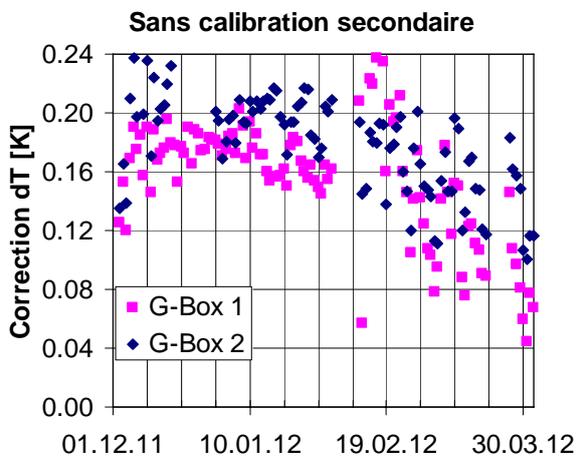
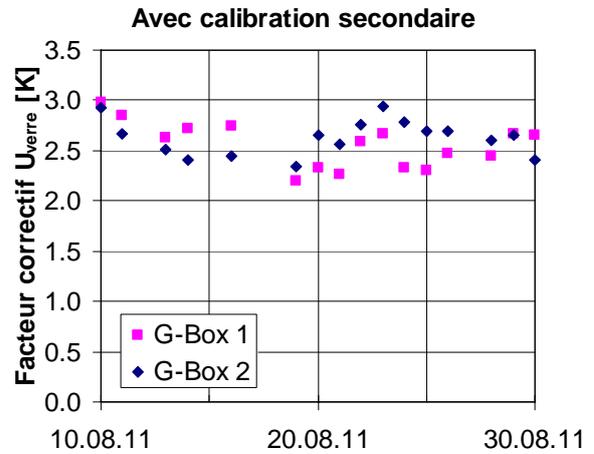
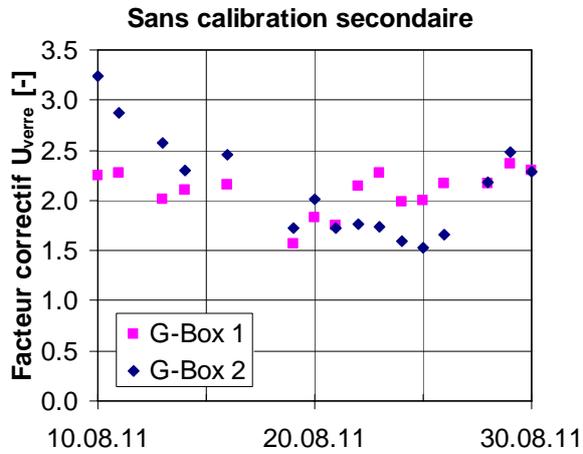
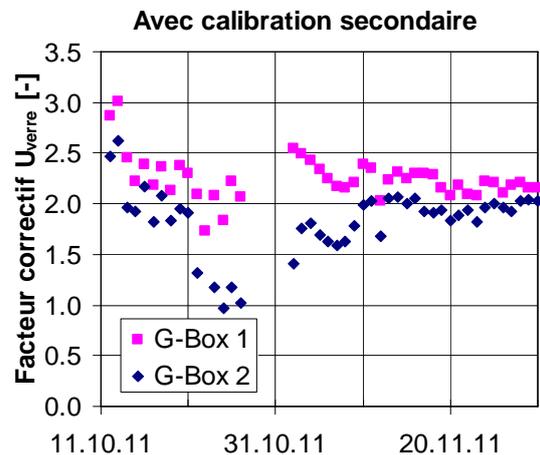
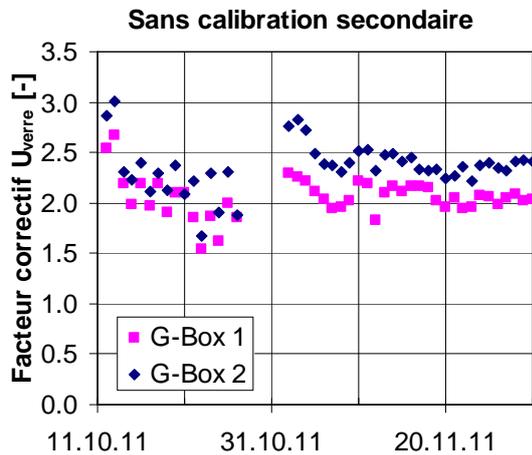


Figure 7.2 Evolution des corrections journalières de l'écart de température entrée – sortie de l'eau traversant les échangeurs des box.

SUPSI – bâtiment A – Aula 204



SUPSI – toit BIPV – modules de droite



SUPSI – toit BIPV – modules du centre

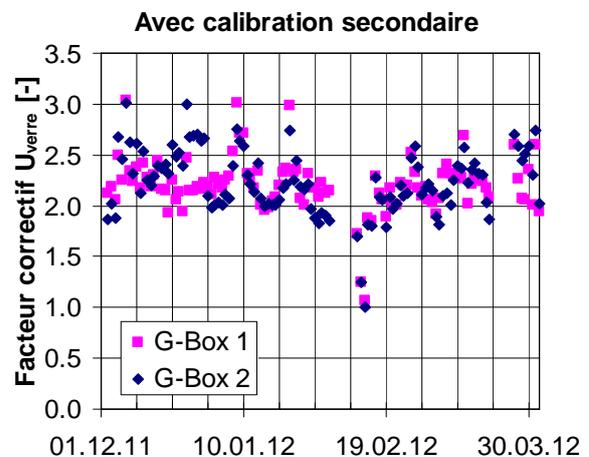
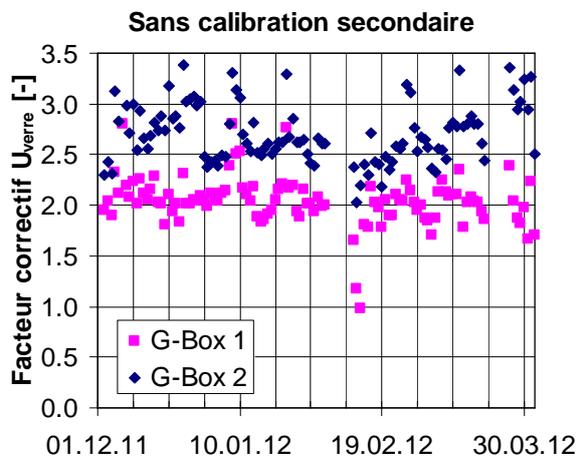


Figure 7.3 Evolution des facteurs correctifs journaliers appliqués au coefficient U des pertes thermiques du vitrage mesuré par les box.

La correction de l'écart de température de l'eau varie sensiblement et de façon irrégulière. Elle montre que la correction du bilan énergétique de nuit, en agissant sur la puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur, revêt un caractère arbitraire. Elle ne correspond pas à un facteur de correction ou de calibration.

En revanche le facteur correctif appliqué au coefficient U des vitrages est plus stable et constant dans le temps. Il montre une valeur moyenne qui est typiquement comprise entre 2 et 2.5. Il correspond à une amplification des pertes thermiques à travers le vitrage de 200 à 250%. Cet effet amplificateur est principalement attribué au pont thermique du vitrage sur le pourtour de l'ouverture du box, et au transfert de chaleur plus important entre l'air intérieur du box et la surface du verre, en raison du brassage de l'air par le ventilateur.

7.7 Discussions des corrections

Les analyses thermiques exposées dans les chapitre 6 et 7 ont permis d'élaborer et de tester deux méthodologies pour la correction des erreurs systématiques :

- calibration secondaire de la différence de température « entrée – sortie » de l'eau dans l'échangeur de chaleur (section 6.5) ;
- calibration du coefficient U des vitrages sur le bilan énergétique de nuit du box (section 7.6).

Toutefois les corrections de ces méthodes ne seront pas systématiquement apportées sur les mesures. En effet elles n'ont pas permis d'observer une amélioration significative des résultats. Seule la calibration secondaire des températures, faite dans la salle de classe A204, a été reportée sur les mesures réalisées dans le même endroit, en raison de conditions de mesure similaires. Dans tous les cas une analyse plus approfondie des phénomènes en jeux est nécessaire.

En particulier la température de référence du datalogger a également une influence sur la précision des mesures de température. Une isolation soignée des bornes sur lesquelles sont connectés les thermocouples pourrait déjà limiter les flux thermiques et uniformiser les températures du datalogger, limitant ainsi les erreurs possibles.

La calibration du coefficient U des vitrages permet de corriger les pertes thermiques du box vers l'extérieur. Toutefois, en période d'ensoleillement, les gains solaires absorbés sur la tranche du box ont pour effet de limiter les pertes thermiques vers l'extérieur et d'augmenter les gains secondaires. Le bilan énergétique de nuit ne permet pas de tenir compte de cet effet. On obtient de la sorte une calibration partielle. Pour cette raison, et compte tenu de l'effet relativement modeste sur le coefficient g, la correction du bilan thermique de nuit n'est pas appliquée.

8. Résultats des mesures

8.1 Introduction

Les appareillages g-box ont été utilisés aussi bien à la SUPSI à Lugano qu'au HEPIA à Genève, par les équipes respectives de l'ISAAC et du LEEA.

Différents types de vitrage ont été mesurés pour différentes positions des protections solaires et différentes orientations. La figure 8.1 permet d'indiquer les orientations des fenêtres mesurées pour chacun des 2 sites.

SUPSI – Trevano – Lugano



HEPIA – rue de la Prairie – Genève

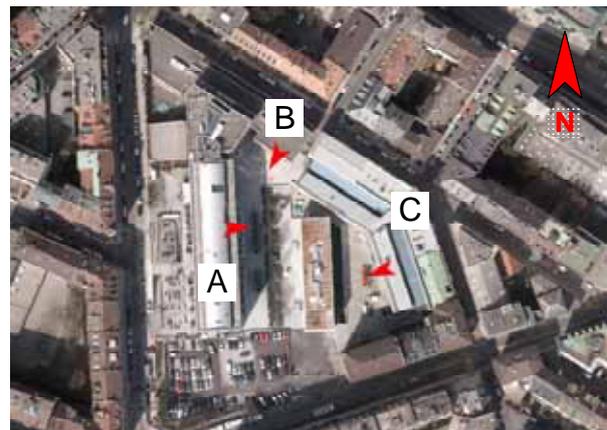


Figure 8.1 Vues aériennes des sites de la SUPSI et du HEPIA avec orientation des fenêtres mesurées.

Les caractéristiques thermiques des vitrages sont énumérées dans la table 8.1.

Lieu	Type	Orientation (Sud: 0°)	Coefficient g	Coefficient U
SUPSI				
Aula A204	Vitrage triple	95.5° Est	0.38 [-]	0.5 [W/m ² K]
Tetto BIPV	Module BIPV 2	5.5° Est	0.15 [-]	1.2 [W/m ² K]
Tetto BIPV	Module BIPV 3	5.5° Est	0.12 [-]	1.1 [W/m ² K]
Tetto BIPV	Module BIPV 4	5.5° Est	0.18 [-]	1.2 [W/m ² K]
HEPIA				
Bâtiment A	Vitrage double	93° Est	0.60 – 0.75 [-]	ca. 1.6 [W/m ² K]
Bâtiment B	Vitrage double	32° Ouest	0.60 – 0.75 [-]	ca. 1.6 [W/m ² K]
Bâtiment C	Vitrage double	70° Ouest	0.60 – 0.75 [-]	ca. 1.6 [W/m ² K]

Table 8.1 Orientation des façades et caractéristiques thermiques des vitrages analysés à la SUPSI et au HEPIA.

Pour rappel, un appareillage g-box permet de mesurer simultanément deux box, de façon à permettre des mesures comparatives.

8.2 SUPSI – Aula A204

Les mesures ont été réalisées du 10 au 30 août 2011. Le box 1 était plaqué contre le triple vitrage de gauche et le box 2 contre celui de droite (cf. figure 8.2). Un pilier sépare les deux fenêtres et l'ombre du pilier se projette dans le box 1 lorsque l'angle d'incidence des rayons du soleil dans le plan du vitrage est grand.



Figure 8.2 Placement du dispositif g-box dans la salle de cours A204 de la SUPSI à Trevano. Pour le box 1 à gauche, la situation montrée correspond aux stores baissés avec inclinaison des lamelles à 45°.

Trois situations sont mesurées, simultanément ou non par les deux box :

- stores levés ;
- stores baissés avec inclinaison des lamelles à l'horizontale ;
- stores baissés avec inclinaison des lamelles à 45°.

Dans un premier temps les mesures sont analysées pour les 3 situations, sans limitation sur l'ensoleillement et l'angle d'incidence. Dans un deuxième temps des critères sont fixés pour sélectionner des intervalles de mesure et déterminer un coefficient g moyen journalier. Les valeurs journalières peuvent être comparées entre elles.

La calibration secondaire des températures, effectuée dans la salle de classe A204, est uniquement appliquée aux mesures faites dans cette salle. Pas de correction du bilan énergétique de nuit n'est effectué. Une belle journée est nécessaire pour que les mesures soient exploitables.

Coefficient g avec stores levés

Les mesures du 13 août 2011 sont choisies. Les stores sont levés devant les deux box. Une moyenne glissante sur 40 minutes permet de lisser de façon satisfaisante la puissance thermique extraite d'un box. Les mesures relatives aux deux box sont montrées dans la figure 8.3.

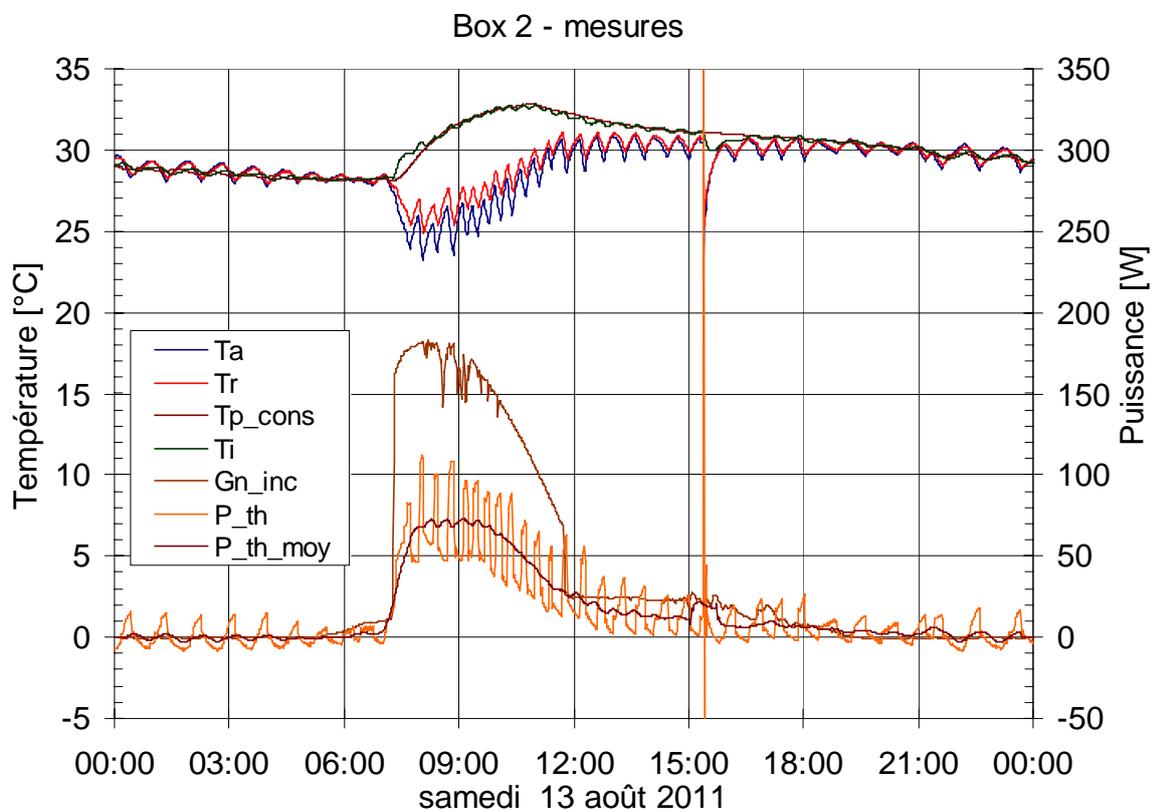
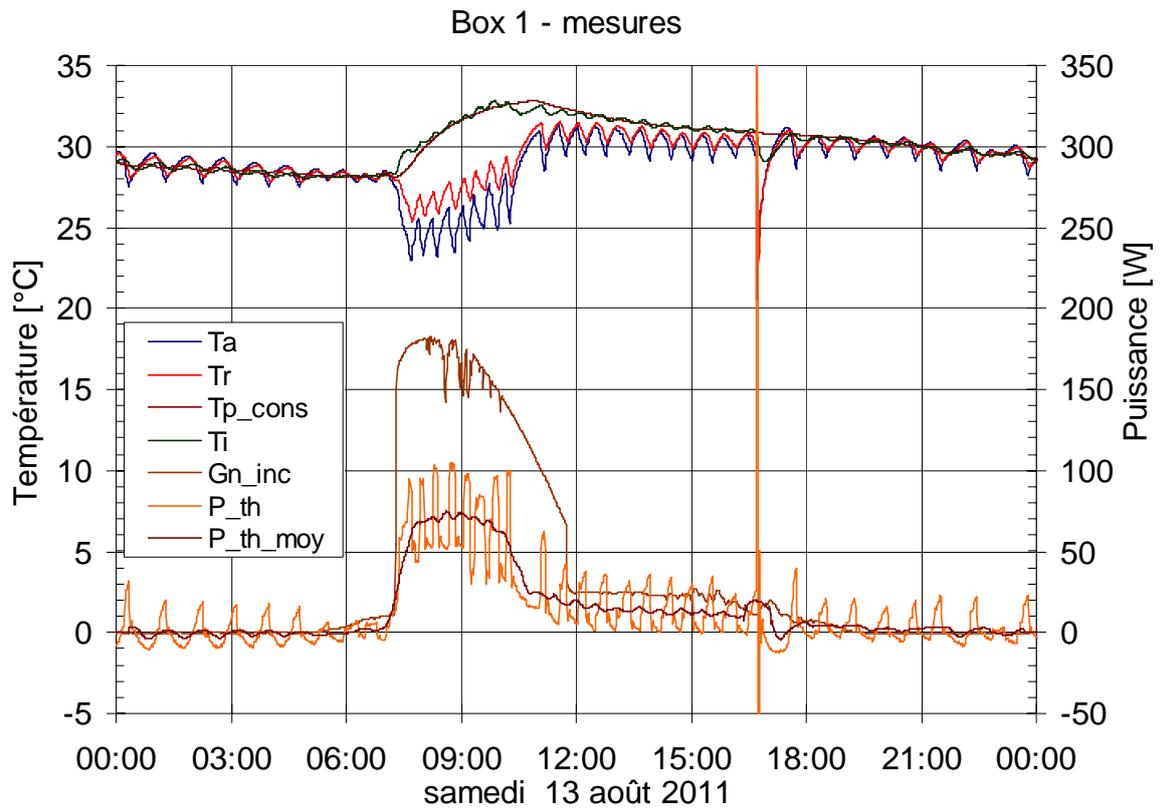


Figure 8.3 Mesures effectuées pour les deux box, avec stores levés.

Les courbes montrées dans la figure 8.3 ont les significations suivantes :

- T_a température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un GBOX [°C]
- T_r température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un GBOX [°C]
- T_{p_cons} température de consigne pour l'air dans un GBOX [°C]
- T_i température de l'air à l'intérieur d'un GBOX [°C]
- G_{n_inc} puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un GBOX [W]
- P_{th} puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un GBOX [W]
- P_{th_moy} moyenne glissante sur 40 minutes de la puissance thermique transférée [W]

Les observations suivantes peuvent être relevées :

- Les deux graphiques permettent d'apprécier l'effet du lissage sur 40 minutes de la puissance thermique transférée (P_{th_moy}) ;
- Contrairement à celle du box 2, la puissance thermique extraite du box 1 diminue brusquement en fin de matinée (vers 10 – 11h). La cause de cet effet est attribuée au pilier entre les deux box, dont l'ombre se projette dans l'ouverture du box 1 pour des angles d'incidences importants. Ce phénomène se manifeste avant que la façade se retrouve à l'ombre du soleil, vers midi environ.
- On observe une perturbation de la puissance thermique extraite, qui a lieu à 16h43 pour le box 1 et 15h24 pour le box 2. Elle correspond au « reset » automatique de la vanne mélangeuse, qui s'ouvre 1 fois par jour à 100% un bref instant. La puissance extraite devient momentanément très grande, puis la régulation reprend en main la situation avec du chauffage comme réaction. Il est utile de savoir que l'heure du reset est fixée par l'heure à laquelle la vanne a été mise sous tension. Il est donc possible de déplacer le reset en fin de journée, en débranchant et rebranchant l'alimentation des vannes mélangeuses. Attention à une coupure de courant, elle change par conséquent l'heure de reset des vannes.

Dans la figure 8.4, le coefficient g est calculé avec un bilan énergétique du box sur 40 minutes, et son évolution est montrée par moyenne glissante.

Aula A204 - Box 1 et 2 - valeur g

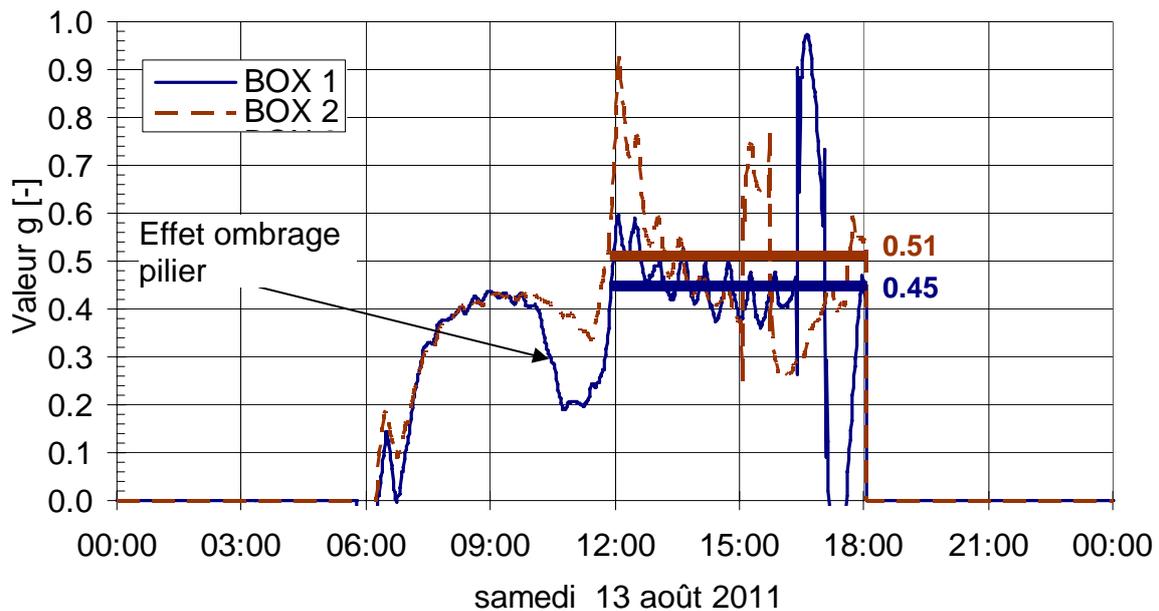


Figure 8.4 Evolution des coefficients g calculés en moyennes glissantes sur 40 minutes. Les stores sont levés devant les deux box.

Les observations suivantes sont formulées :

- Les fluctuations importantes du coefficient g ont lieu lorsque l'ensoleillement incident est faible, typiquement quand la façade est à l'ombre du soleil (et donc sans ensoleillement direct). Quand ce n'est pas le cas et sans l'ombre du pilier, on peut observer la bonne concordance des mesures du coefficient g entre les deux box. Ce résultat est obtenu grâce à la calibration secondaire des températures (cf. section suivante).
- A partir de 12h les puissances thermiques en jeux sont faibles puisque la façade se trouve à l'ombre. Les fluctuations de la puissance thermique extraite deviennent très importantes relativement à la puissance radiative incidente. Ces fluctuations se répercutent sur le calcul du coefficient g. Le reset des vannes mélangeuses contribuent également à faire fluctuer ce dernier.
- Le coefficient g moyen, calculé de 12h à 18h, est de 0.45 pour le box 1 et 0.51 pour le box 2. Il apparaît très élevé, car il devrait correspondre au coefficient g relatif au rayonnement diffus. Il devrait être inférieur à celui qui est obtenu avec du rayonnement direct. Bien que les erreurs de mesure soient très importantes, il semble que le dispositif ait tendance à surévaluer le coefficient g. D'ailleurs les valeurs maximum avec rayonnement direct indique une valeur de 0.43 – 0.44, sensiblement au-dessus de 0.38, valeur donnée par le fabricant.
- Si l'on fait abstraction des perturbations liées au reset des vannes mélangeuses, le coefficient g semble décroître de 12h à 18h. Il pourrait être l'indice d'un effet capacitif du box, suite à son refroidissement après le passage du soleil derrière la façade. Dans tous les cas la valeur du coefficient g reste très élevée.

Une évolution typique du coefficient g a été simulée avec le programme TRNSYS (Klein et al., 2007) pour un vitrage triple dont les caractéristiques sont similaires, avec la même orientation et pour un beau jour en août (cf. figure 8.5) extrait de données météorologiques (METEONORM, 2010).

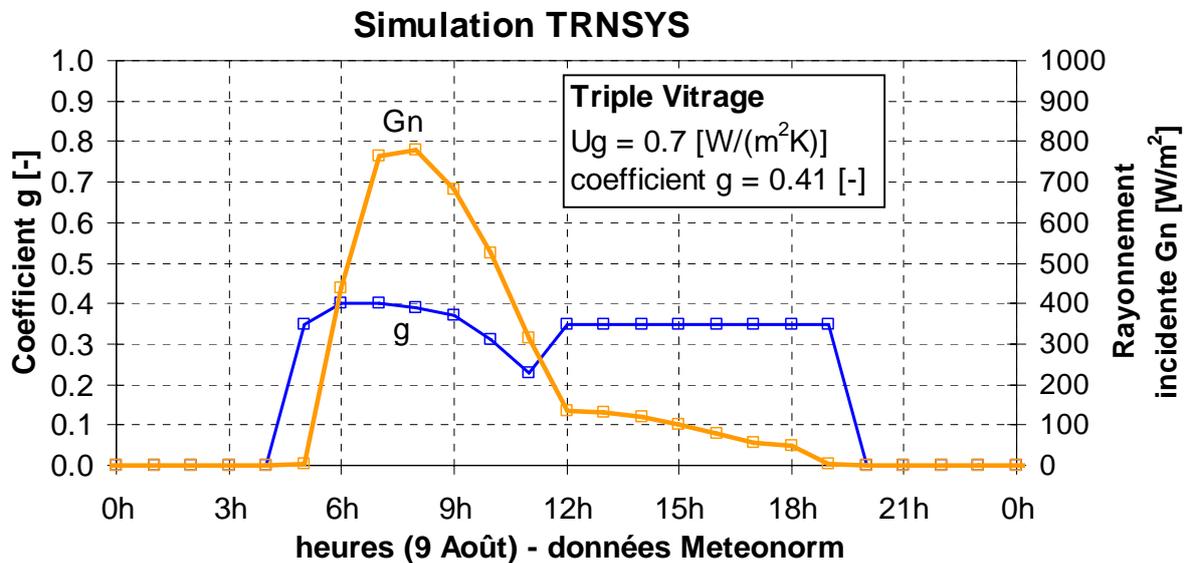


Figure 8.5 Simulation des coefficients g pour un triple vitrage orienté à Est. Le programme TRNSYS a été utilisé avec un pas de temps horaire.

Le coefficient g simulé prend en compte l'effet de l'angle d'incidence du rayonnement direct. Cet effet devient marqué à partir de 9h jusqu'à ce que le soleil passe derrière la façade. On observe le même phénomène avec les mesures (cf. figure 8.4, courbe du Box 2), même si l'effet est moins marqué et déphasé, probablement en raison d'un effet capacitif.

Calibration secondaire des températures

La calibration secondaire des températures a été faite dans l'aula A204 (cf. section 6.5). L'application de ces corrections permet d'améliorer la concordance des mesures entre les deux box, même si elle est déjà bonne sans les corrections. La figure 8.6 permet de l'attester.

Avec calibration secondaire

Sans calibration secondaire

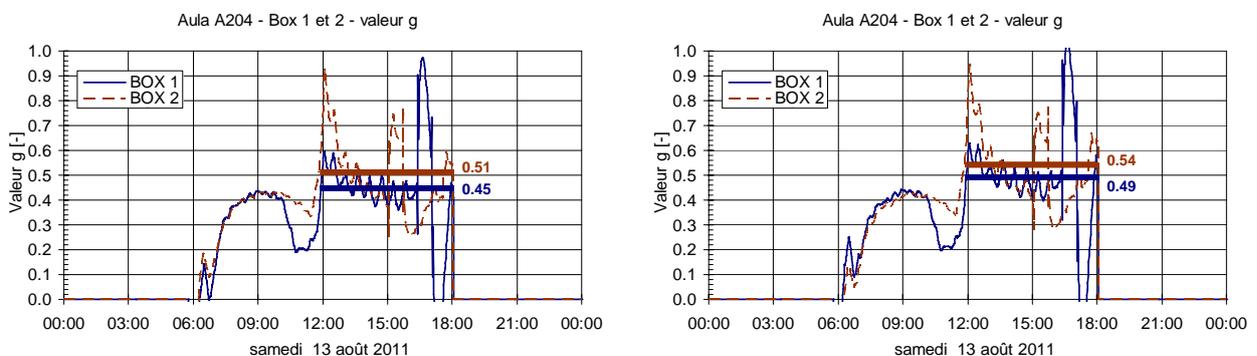


Figure 8.6 La calibration secondaire des températures permet d'obtenir une meilleure concordance des coefficients g entre les deux box.

En revanche la calibration secondaire des températures n'a pas été appliquées aux mesures faites successivement dans le cabanon « Tetto BIPV ». Elles ne permettent pas d'améliorer la comparaison des mesures entre les deux Box, en raison de conditions de mesures différentes présentant des variations rapides et importante de la température de l'air du local (voir section 8.3).

Coefficient g avec stores baissés et inclinaison des lamelles à l'horizontale

Le 22 août 2011 le store devant le Box 1 est baissé avec la position des lamelles à l'horizontales. Celui qui est devant le Box 2 est levé. Comme l'atteste la figure 8.7, le 22 août est un très beau jour.

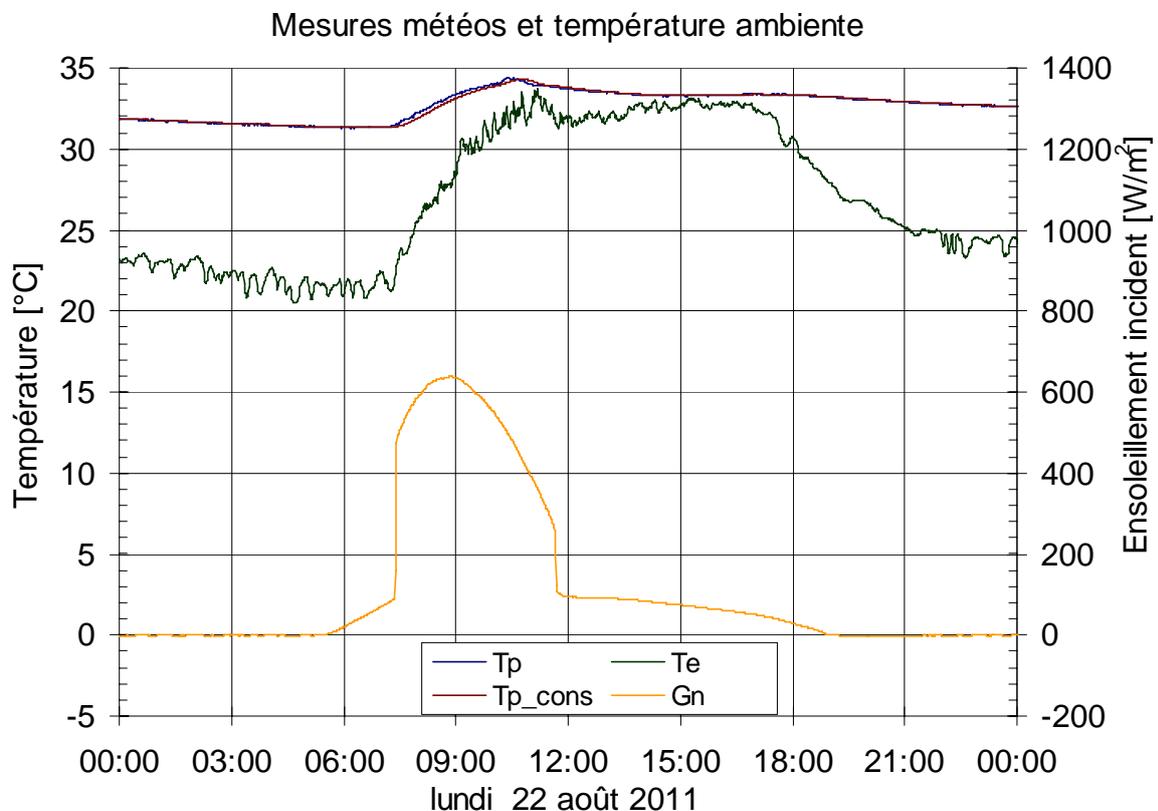


Figure 8.7 Mesures d'ensevelissement et des températures de l'air extérieur et intérieur pour lundi 22 août 2011.

Les courbes montrées dans la figure 8.7 ont les significations suivantes :

- T_p température de l'air de la pièce [°C]
- T_{p_cons} température de consigne pour l'air dans un box [°C]
- T_e température de l'air extérieur [°C]
- G_n rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box [W/m²]

Le coefficient g est évalué dans les mêmes conditions que précédemment, c'est-à-dire avec une moyenne glissante sur 40 minutes. Il est montré dans la figure 8.8. La calibration secondaire des températures du fluide a été effectuée.

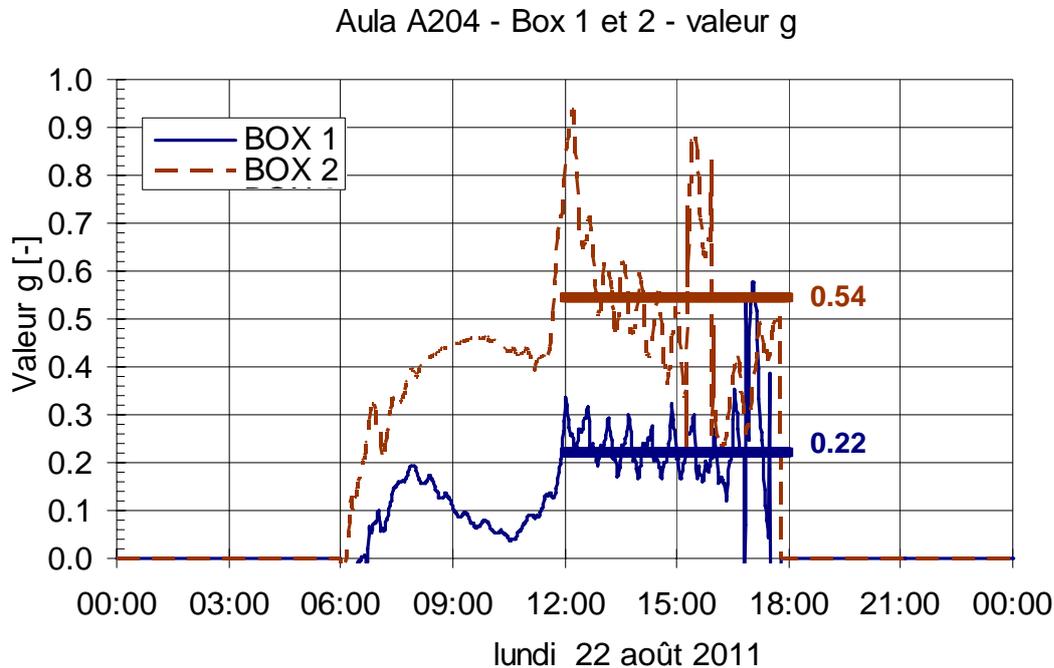


Figure 8.8 Evolution des coefficients g calculés en moyennes glissantes sur 40 minutes. Le store devant le box 1 est baissé avec les lamelles inclinées à l'horizontale. Devant le box 2 le store est levé.

Remarques :

- L'évolution du coefficient g pour le box 1 montre l'effet dynamique de la position des lamelles. En début de matinée le soleil est bas et pénètre dans la salle de classe. A mesure que le rayonnement gagne en intensité l'angle d'incidence augmente, et la part de rayonnement direct qui traverse le vitrage diminue et reste bloquée à l'extérieur. Il en résulte un coefficient g qui diminue sensiblement.
- Le coefficient g pour le rayonnement diffus, évalué de 12h à 18h, reste élevé.

L'analyse du coefficient g en fonction de la hauteur du soleil conduit à une régression linéaire qui permet de quantifier le coefficient g en fonction de l'angle formé entre les rayons du soleil et le plan horizontal, généralement dénommé hauteur du soleil (HS). Les points sont sélectionnés de façon à ce que des effets indésirables ne soient pas pris en compte, comme l'effet transitoire observé au début du jour ou un angle d'incidence trop élevé. La valeur maximum de ce dernier est fixée à 50°. En conséquence, l'intervalle de temps des mesures sélectionnées s'étend de 8h à 10h, pour lequel l'ensoleillement incident est toujours supérieur à 500 W/m². La hauteur du soleil, quant à elle, varie de 23 à 42°. Le graphique de la régression est présenté dans la figure 8.9.

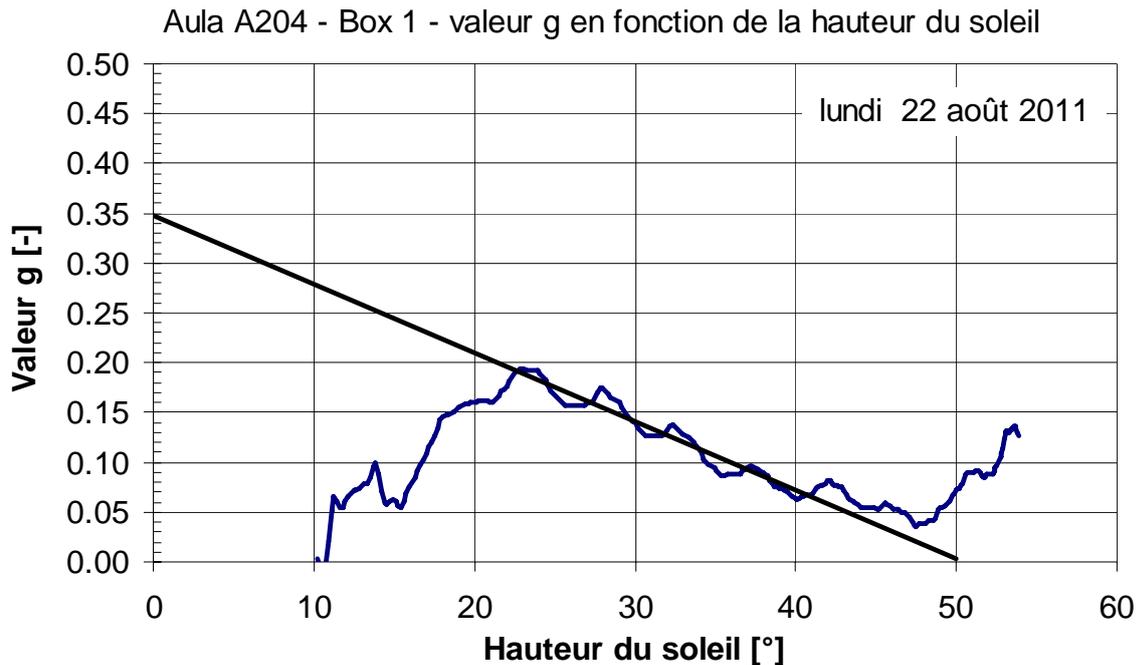


Figure 8.9 Dépendance du coefficient g en fonction de la hauteur du soleil, avec stores baissés et lamelles inclinées à l'horizontale. La régression linéaire est calculée avec des mesures représentatives, pour lesquelles la hauteur du soleil varie de 23 à 42°.

Remarques :

- Il est intéressant de noter que l'extrapolation de la régression linéaire à une hauteur du soleil nulle conduit à une valeur g de 0.35. Cette valeur est 10 à 20% plus basse que celle qui est obtenue sans protection solaire et sans effet d'angle d'incidence significatif. Même si les mesures ne permettent pas de déterminer de façon absolue la valeur du coefficient g, ce résultat permet de contrôler la cohérence et la fiabilité des mesures.
- L'effet d'ombrage sera dépendant de l'orientation de la façade. En effet, pour une façade orientée au sud, la hauteur du soleil, un 22 août, est supérieure à 37° quand l'angle d'incidence est inférieur à 70°. Cela signifie que du 20 avril au 22 août, l'angle d'incidence du rayonnement solaire sur la façade sera toujours supérieur à 70° quand la hauteur du soleil sera inférieure à 37°. L'effet d'ombrage sera donc plus important pour une façade orientée au Sud plutôt qu'à l'Est ou à l'Ouest.

Coefficient g avec stores baissés et inclinaison des lamelles à 45°

Le 24 août 2011 le store devant le Box 1 est baissé avec la position des lamelles à 45° (cf. figure 8.2). Celui qui est devant le Box 2 est toujours levé. Comme pour le 22 août, le 24 août est une journée très ensoleillée.

Le coefficient g est évalué dans les mêmes conditions que précédemment, c'est-à-dire avec une moyenne glissante sur 40 minutes. Il est montré dans la figure 8.10. La calibration secondaire des températures du fluide a été effectuée.

Aula A204 - Box 1 et 2 - valeur g

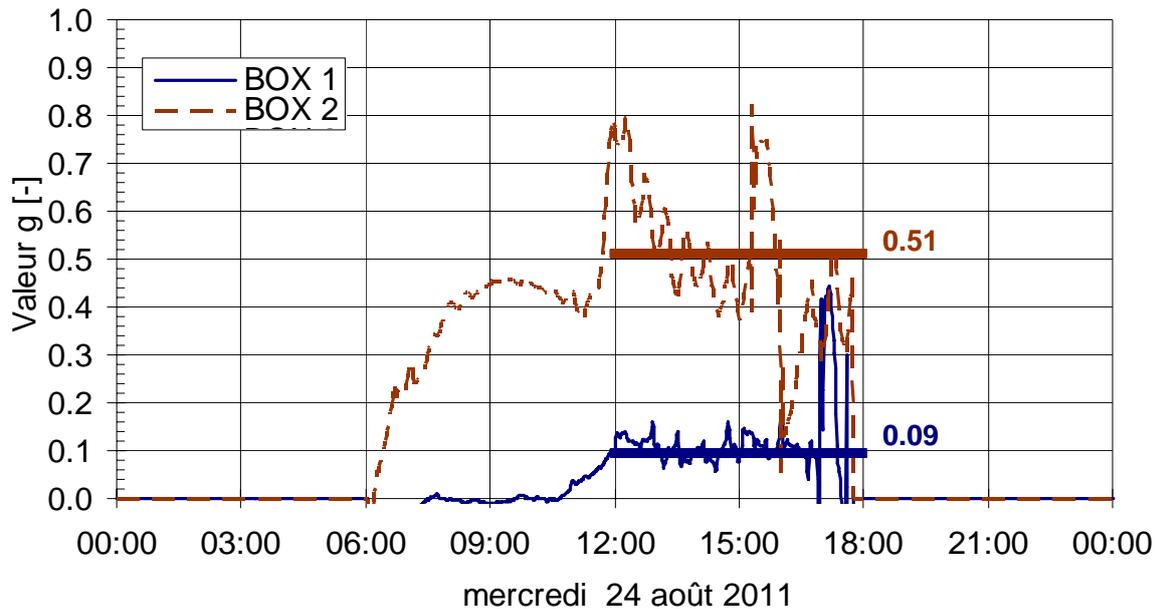


Figure 8.10 Evolution des coefficients g calculés en moyennes glissantes sur 40 minutes. Le store devant le Box 1 est baissé avec les lamelles inclinées à 45°. Devant le Box 2 le store est levé.

Avec les lamelles inclinées à 45°, l'ensoleillement direct ne pénètre jamais à l'intérieur. Seule une fraction du diffus le traverse et, en principe, un flux thermique secondaire causé par l'échauffement des stores. Il est toutefois surprenant de constater un coefficient g mesuré nul lorsque le soleil frappe la façade. Contrairement aux estimations précédentes, cette valeur apparaît sous-estimée. Si l'on considère un ensoleillement global de 600 W/m², composé de 100 W/m² de diffus et 500 W/m² de direct, au moins 9 W/m² entrent dans la pièce si l'on applique un coefficient g de 0.09 pour le diffus, estimé avec les mesures de 12h à 18h. Il en résulte un coefficient g minimum de $9/(100+500) = 0.015$. Cependant, si l'on intègre les mesures sur toute la journée, de 6h à 18h, on obtient un coefficient g moyen de 0.016. A noter toutefois que les valeurs obtenues sont bien inférieures aux marges d'erreurs commises.

Coefficients g journaliers

Toutes les mesures sont évaluées jour par jour, en sélectionnant seulement les périodes à fort ensoleillement, supérieur à 200 W/m² dans le plan de la façade, et à angle d'incidence inférieur à 50°. L'ombre du pilier n'atteint pas le box 1 dans ces conditions. De cette façon les mesures obtenues d'un jour à l'autre peuvent être comparées, de même que celle obtenue par les deux box, lorsque la situation mesurée est la même. Les moyennes glissantes sur 40 minutes sont toujours effectuées pour la détermination du coefficient g, ce qui signifie que les critères de sélection sont satisfaits pour chacune des mesures d'un intervalle de temps. La calibration secondaire des températures du fluide est appliquée aux mesures.

La qualité des jours et des mesures est évaluée en se basant sur les critères qualitatifs suivants :

- **+1** : très beau jour, l'ensoleillement présente l'évolution typique d'un jour sans nuage ;
- **0** : jour moyen, l'ensoleillement présente une part de diffus plus importante, il peut être haché mais une partie du jour reste relativement bonne ;
- **-1** : mauvais jour, l'ensoleillement n'est pas important, il est typique d'un jour couvert ou partiellement couvert. Les périodes d'évaluation du coefficient g sont très courtes, ou encore des variations de la température intérieure du box sont importantes ou rapides ;
- **X** : jour éliminé par les critères de sélection des mesures.

Dans l'annexe D, les mesures et l'évaluation du coefficient g sont présentées jour par jour pour la période complète des mesures effectuées dans la salle de cours A204, soit du 10 au 30 août 2011. Le graphe 8.11 permet de montrer les coefficients g sélectionnés pour les très bons jours et les jours moyens (critère de qualité +1 et 0). Contrairement à un mauvais jour, ces deux types de jours ne conduisent pas à une évaluation du coefficient g différente, compte tenu de la dispersion des valeurs. Les marges d'erreurs sont obtenues en appliquant une incertitude équivalente de 0.15 K sur la différence de température $T_r - T_a$, incluant ainsi toutes les sources d'erreurs discutées dans la section 7.5, « Erreurs systématiques ».

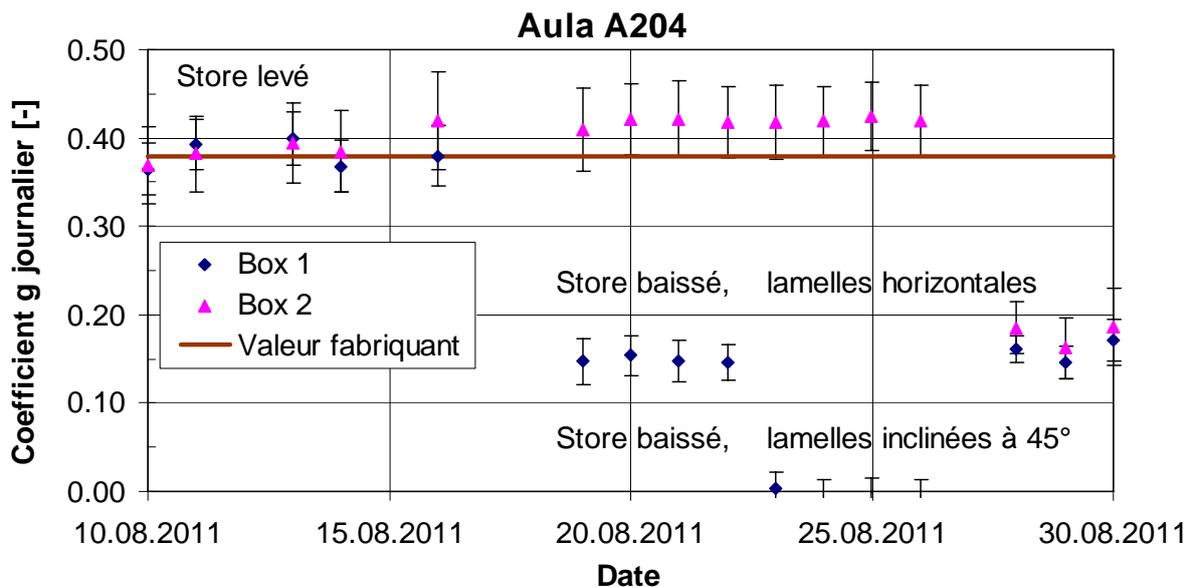


Figure 8.11 Coefficients g évalués dans la salle de cours A204 de la SUPSI à Trevano avec les box 1 et 2, pour les 3 situations analysées.

Les valeurs moyennes des coefficients g journaliers sont contenues dans la table 8.2. Les incertitudes données pour les moyennes sont calculées avec les incertitudes journalières. Elles sont définies pour correspondre à un intervalle de confiance de 95% (deux écarts-types).

Coefficient g moyen [-]	Box 1	Box 2
Stores levés	0.38 ± 0.03	0.41 ± 0.04
Stores baissés, lamelles horizontales	0.15 ± 0.02	0.18 ± 0.04
Stores baissés, lamelles à 45°	0.00 ± 0.02	-

Table 8.2 Coefficient g moyen du triple vitrage pour trois positions du store extérieur à lamelles. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%.

Remarques :

- Les coefficients g moyens sont compatibles avec la valeur donnée par le fabricant (0.38). La concordance est particulièrement bonne avec le box 1.
- Avec la position des stores levés, le coefficient g apparaît plus élevé quand il est mesuré avec le box 2 plutôt que le box 1. Cette différence ne peut pas être attribuée à une erreur systématique entre les deux box, mais plutôt à une série de jours qui ne sont pas comparables. En effet, si on limite les valeurs journalières du Box 2 aux mêmes jours que ceux du box 1, la moyenne baisse de 0.41 à 0.39. Ceci donne une indication de la volatilité des résultats causées par des conditions de mesure qui varient d'un jour à l'autre.
- Avec stores baissés et la position des lamelles à 45°, le coefficient g apparaît sous-estimé. Ce résultat a déjà été mis en évidence dans la section « Coefficient g avec stores baissés et inclinaison des lamelles à 45° ». L'origine de cet effet est probablement dû à un effet capacitif.

8.3 SUPSI – Tetto BIPV

Les mesures ont été réalisées du 12 octobre 2011 au 02 avril 2012 dans le cabanon du Tetto BIPV. La figure 8.12 permet de montrer l'installation du g-box contre les modules BIPV 3 et 4.

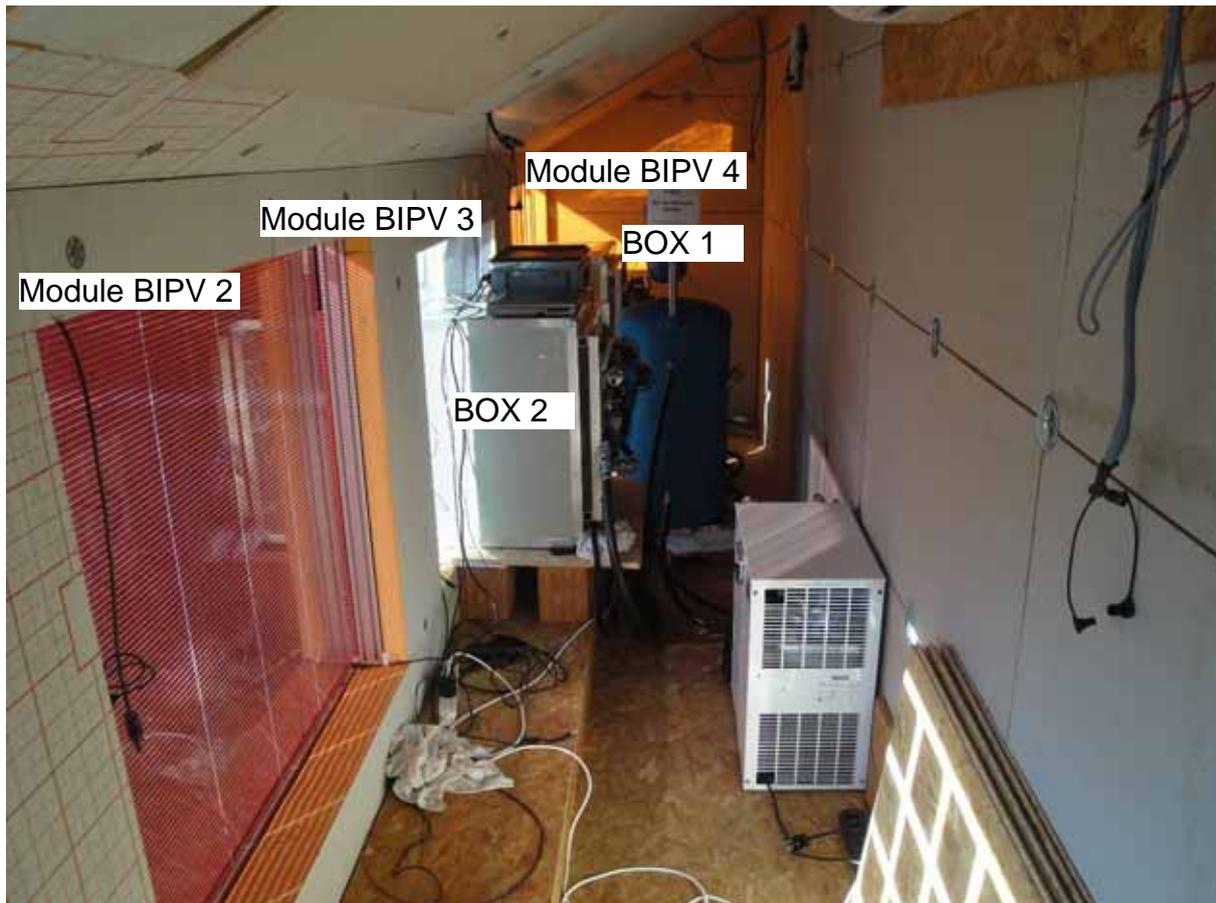


Figure 8.12 Placement du dispositif g-box dans le cabanon du Tetto BIPV de la SUPSI à Trevano. Le box 1, au fond, est placé contre le module BIPV 4. Le box 2, quant à lui, est placé devant le module BIPV 3.

On distingue 3 périodes de mesures. Elles sont définies comme suit :

- Du 12.10.2011 au 29.11.2011 : modules BIPV pas connectés électriquement

Module BIPV 2	Module BIPV 3	Module BIPV 4
Pas mesuré	Mesuré par BOX 2	Mesuré par BOX 1

- Du 03.12.2011 au 30.01.2012 : modules BIPV pas connectés électriquement

Module BIPV 2	Module BIPV 3	Module BIPV 4
Mesuré par BOX 2	Mesuré par BOX 1	Pas mesuré

- Du 31.01.2012 au 02.04.2012 : modules BIPV connectés avec production maximum

Module BIPV 2	Module BIPV 3	Module BIPV 4
Mesuré par BOX 2	Mesuré par BOX 1	Pas mesuré

Le module BIPV 3 a donc été mesuré par chacun des deux box. Les résultats des mesures sont présentés dans la figure 8.13 avec les coefficients g journaliers. Les mêmes critères de sélection des mesures que précédemment (Aula A204) sont appliqués. La calibration

secondaire des températures n'est pas effectuée, de même que le bilan énergétique de nuit. Seuls les jours répondants au critère de qualité +1 ou 0 (très bon jour ou jour moyen) sont sélectionnés. L'annexe E contient les mesures et l'évaluation du coefficient g jour par jour.

Test des modules BIPV dans cabanon "Tetto BIPV"

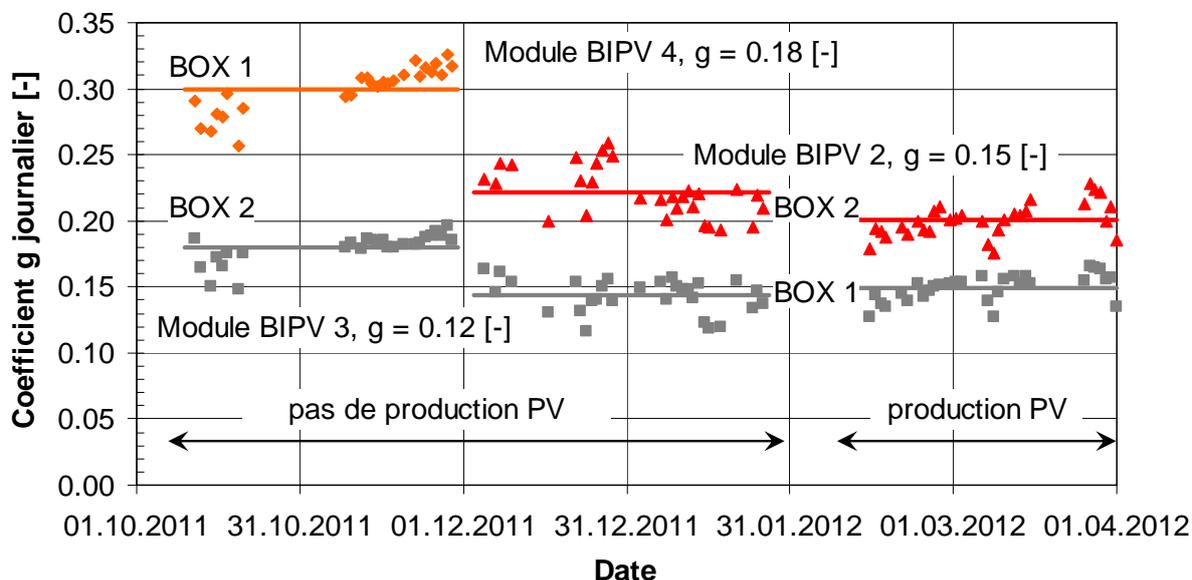


Figure 8.13 Coefficients g évalués pour les trois modules BIPV du Tetto BIPV de la SUPSI à Trevano.

Les coefficients g moyens sont énumérés dans la table 8.3. Les incertitudes correspondent à un intervalle de confiance de 95%.

Coefficient g moyen [-]	Module BIPV 2	Module BIPV 3	Module BIPV 4
Du 12.10 au 21.11, sans prod. él.	-	0.18 ± 0.04 box 2	0.30 ± 0.03 box 1
Du 03.12 au 30.01, sans prod. él.	0.22 ± 0.04 box 2	0.14 ± 0.03 box 1	-
Du 31.01 au 02.04, avec prod. él.	0.20 ± 0.04 box 2	0.15 ± 0.03 box 1	-

Table 8.3 Coefficients g moyens pour les modules BIPV du cabanon Tetto BIPV, avec ou sans production électrique. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%.

Remarques :

- L'incertitude sur les coefficients g moyens est calculée entre 0.03 et 0.04, sur la base des incertitudes obtenues sur les valeurs journalières. On obtient une incertitude similaire en la calculant sur la dispersion des valeurs. Ceci indique que l'incertitude liée à la reproductibilité des mesures journalières est du même ordre de grandeur que l'incertitude liée à la précision des mesures.
- Toutefois le coefficient g du module BIPV 3 diffère sensiblement entre les mesures faites par le box 1 (0.14) et le box 2 (0.18). L'application des corrections relatives à la calibration secondaire a pour effet d'amplifier la différence de 0.04 à 0.05. Il faut préciser

que les conditions de mesures dans le cabanon BIPV sont particulièrement difficiles, caractérisées par des variations importantes et rapides de la température de l'air du cabanon. Ceci souligne l'importance de stabiliser la température de référence du datalogger, avec par exemple une bonne isolation, comme déjà indiqué dans la section 7.7.

- La production électrique des modules devrait conduire à un coefficient g légèrement plus faible. Cette tendance a été observée avec le module BIPV 2 mais pas avec le module BIPV 3. Toutefois l'effet mesuré reste inférieur à l'incertitude, et donc difficilement quantifiable.
- Les coefficients g obtenus sont tous supérieurs aux valeurs mesurées à l'EMPA (2011). Les différences varient de +20 à +60%. Elles sont donc bien supérieures aux incertitudes établies. Elles sont le signe qu'un phénomène non négligeable, non pris en compte dans le modèle physique d'un box, vient entacher les mesures.

L'effet mentionné dans la section 7.7, à savoir les gains solaires absorbés sur la tranche du box, pourrait être à l'origine de la surévaluation du coefficient g. Il faut savoir que la surface de la tranche, donc la surface du box en contact avec le vitrage, est pratiquement égale à la surface d'ouverture du box. Des analyses ciblées devront être faites pour identifier les phénomènes en jeu, les quantifier et les intégrer dans le modèle physique d'un box.

8.4 HEPIA – Bâtiment A

Les mesures ont été réalisées du 5 au 16 septembre 2011 dans le bâtiment A du HEPIA. La figure 8.14 permet de montrer la façade, les fenêtres et l'installation du g-box contre les vitrages.



Figure 8.14 Placement du dispositif g-box dans le bâtiment A du HEPIA à Genève.

Les résultats des mesures sont présentés dans la figure 8.15 avec les coefficients g journaliers. Les mêmes critères de sélection des mesures sont appliqués, à savoir des moyennes de 40 minutes pour lesquelles l'ensoleillement est supérieur à 200 W/m^2 avec un

angle d'incidence inférieur à 50° pour chaque mesure. La calibration secondaire des températures n'est pas effectuée, de même que le bilan énergétique de nuit. Seuls les jours répondants au critère de qualité +1 ou 0 (très bon jour ou jour moyen) sont sélectionnés. L'annexe F contient les mesures et l'évaluation du coefficient g jour par jour.

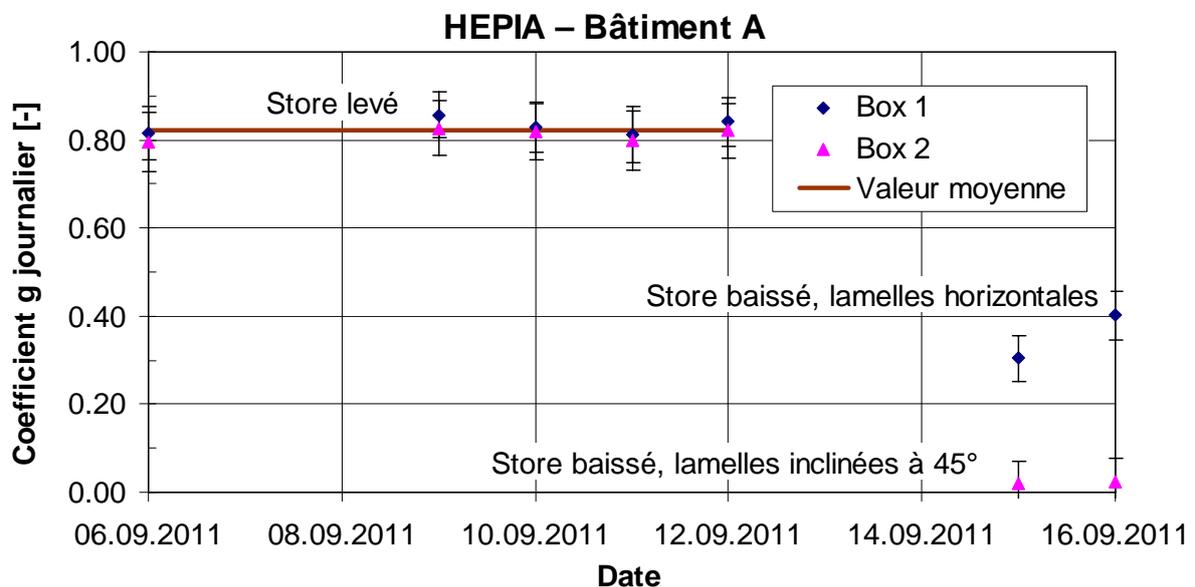


Figure 8.15 Coefficients g évalués pour les fenêtres du bâtiment A du HEPIA à Genève.

Les coefficients g moyens sont énumérés dans la table 8.4. Les incertitudes correspondent à un intervalle de confiance de 95%.

Coefficient g moyen [-]	Box 1	Box 2
Stores levés	0.83 ± 0.06	0.81 ± 0.06
Stores baissés, lamelles horizontales	0.35 ± 0.05	-
Stores baissés, lamelles à 45°	-	0.02 ± 0.05

Table 8.4 Coefficients g moyens pour les fenêtres « double vitrage » du bâtiment A du HEPIA à Genève. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%.

Remarques :

- Les coefficients g mesurés par chacun des box, pour la position des stores levés, sont compatibles entre eux. La différence des valeurs moyennes (cf. table 8.4) reste inférieure aux fluctuations observées d'un jour à l'autre et à l'incertitude des mesures.
- En revanche le coefficient g apparaît sensiblement surestimé, ce qui confirme les résultats obtenus à la SUPSI. En effet la valeur obtenue correspondrait à un simple vitrage et pas à un double vitrage. Le coefficient g de ce dernier, non connu, devrait typiquement se trouver dans un intervalle compris entre 0.6 et 0.7.

8.5 HEPIA – Bâtiment B

Les mesures ont été réalisées du 3 août au 4 septembre 2011 dans le bâtiment B du HEPIA. La figure 8.16 permet de montrer la façade et les fenêtres mesurées.



Figure 8.16 Placement du dispositif g-box dans le bâtiment B du HEPIA à Genève.

Les résultats des mesures sont présentés dans la figure 8.17 avec les coefficients g journaliers. Les mêmes critères de sélection des mesures sont appliqués, à savoir des moyennes de 40 minutes pour lesquelles l'ensoleillement est supérieur à 200 W/m^2 avec un angle d'incidence inférieur à 50° pour chaque mesure. La calibration secondaire des

températures n'est pas effectuée, de même que le bilan énergétique de nuit. Seuls les jours répondants au critère de qualité +1 ou 0 (très bon jour ou jour moyen) sont sélectionnés. L'annexe G contient les mesures et l'évaluation du coefficient g jour par jour.

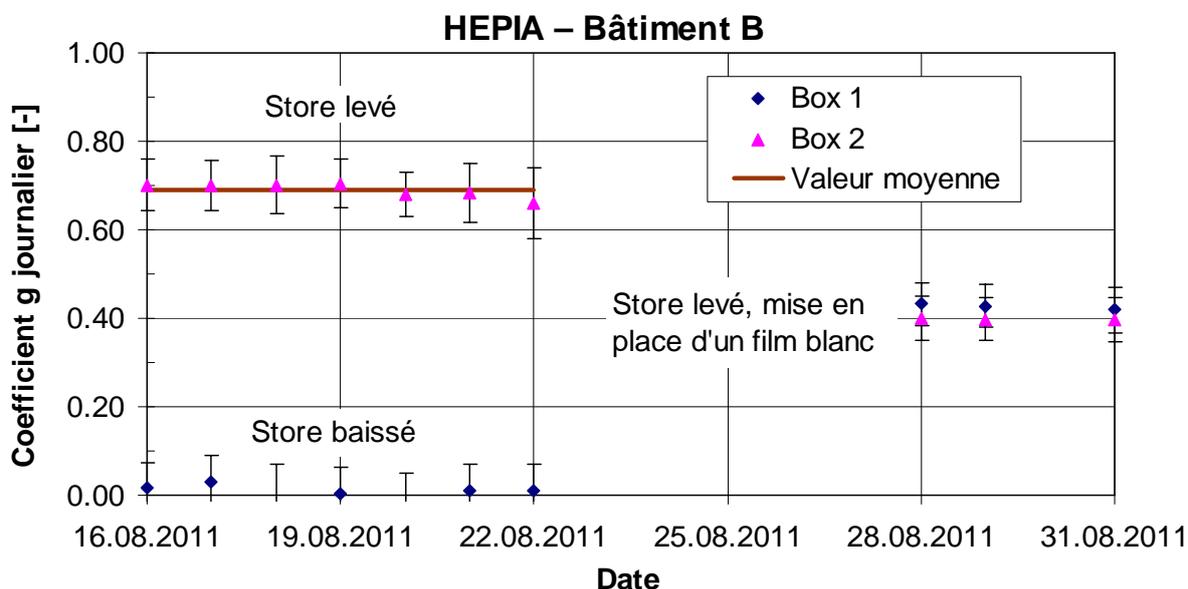


Figure 8.17 Coefficients g évalués pour les fenêtres du bâtiment B du HEPIA à Genève.

Les coefficients g moyens sont énumérés dans la table 8.5. Les incertitudes correspondent à un intervalle de confiance de 95%.

Coefficient g moyen [-]	Box 1	Box 2
Stores levés	-	0.69 ± 0.06
Stores levés, mise en place d'un film blanc	0.43 ± 0.05	0.40 ± 0.05
Stores baissés	0.01 ± 0.06	-

Table 8.5 Coefficients g moyens pour les fenêtres « double vitrage » du bâtiment B du HEPIA à Genève. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%.

Remarques :

- Les coefficients g mesurés par chacun des box, avec la mise en place d'un film blanc, sont compatibles entre eux. La différence des valeurs moyennes (cf. table 8.5) reste inférieure à l'incertitude des mesures.
- Le coefficient g apparaît également surestimé, même si la valeur est sensiblement plus basse que celle obtenue avec les vitrages du bâtiment A. Le coefficient g du vitrage lui-même n'est pas connu.

8.6 HEPIA – Bâtiment C

Les mesures ont été réalisées du 5 au 16 septembre 2011 dans le bâtiment C du HEPIA. La figure 8.18 permet de montrer la façade et les fenêtres mesurées.



Figure 8.18 Placement du dispositif g-box dans le bâtiment C du HEPIA à Genève.

Les résultats des mesures sont présentés dans la figure 8.19 avec les coefficients g journaliers. Les mêmes critères de sélection des mesures sont appliqués, à savoir des moyennes de 40 minutes pour lesquelles l'ensoleillement est supérieur à 200 W/m^2 avec un angle d'incidence inférieur à 50° pour chaque mesure. La calibration secondaire des températures n'est pas effectuée, de même que le bilan énergétique de nuit. Seuls les jours

répondants au critère de qualité +1 ou 0 (très bon jour ou jour moyen) sont sélectionnés. L'annexe H contient les mesures et l'évaluation du coefficient g jour par jour.

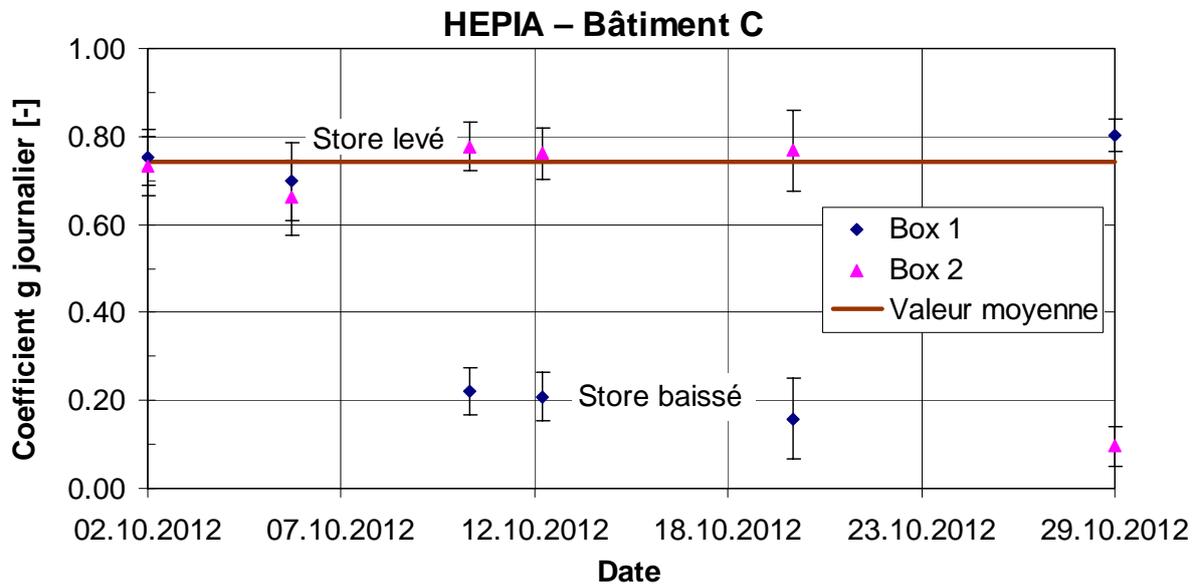


Figure 8.19 Coefficients g évalués pour les fenêtres du bâtiment C du HEPIA à Genève.

Les coefficients g moyens sont énumérés dans la table 8.6. Les incertitudes correspondent à un intervalle de confiance de 95%.

Coefficient g moyen [-]	Box 1	Box 2
Stores levés	0.75 ± 0.07	0.74 ± 0.07
Stores baissés	0.20 ± 0.07	0.10 ± 0.05

Table 8.6 Coefficients g moyens pour les fenêtres « double vitrage » du bâtiment C du HEPIA à Genève. L'incertitude est calculée pour un intervalle de confiance de 95%.

Remarques :

- Les coefficients g mesurés par chacun des box, avec les stores levés, sont compatibles entre eux. La différence avec les stores baissés n'est pas expliquée. Il faut relever toutefois que seul 1 jour a été mesuré avec le box 2, et donc il manque l'information relative aux fluctuations observées d'un jour à l'autre.
- Le coefficient g, avec les stores levés, apparaît également surestimé dans ce cas. Le coefficient g du double-vitrage n'est pas connu.

9. Conclusions

Deux dispositifs g-box ont été développés pour la mesure in-situ du coefficient g de vitrages transparents ou translucides, avec ou sans protection solaire extérieure. Deux box par dispositif permettent la mesure simultanée de deux vitrages et d'évaluer l'effet d'une protection solaire ou d'une autre intervention par comparaison.

Des mesures sur différents types de vitrages, avec ou sans protection solaire et dans différents types de conditions ont été réalisées pour tester le dispositif. Une procédure de calibration des senseurs de température a été élaborée pour affiner la mesure de la puissance thermique avant une campagne de mesure. Dénommée « calibration secondaire », elle a montré qu'elle permet d'affiner la précision des mesures et d'améliorer la comparaison des mesures simultanées. D'autre part les mesures enregistrées la nuit permettent de calibrer le coefficient des pertes thermiques du vitrage en établissant le bilan énergétique nocturne d'un box.

Toutefois deux difficultés majeures ont été mises en évidence par l'analyse des mesures et des incertitudes. La première concerne la précision des mesures de température. Une piste sérieuse concerne la température de référence du datalogger, qui doit être la plus uniforme possible dans les contacts des thermocouples. Elle peut sans aucun doute être améliorée avec une intervention relativement simple. L'autre difficulté concerne les effets de bord engendrés par le box en contact avec le vitrage. Un bilan énergétique de nuit permet de calibrer les pertes du box vers l'extérieur. Toutefois il manque encore la prise en compte de gains solaires secondaires en provenance de la tranche du box en contact avec le vitrage. Des expériences spécifiques restent à faire pour identifier, quantifier et corriger ces effets indésirables.

L'analyse des mesures a donc conduit à évaluer un coefficient g plus élevé que ce qu'il devrait être. Toutefois la surévaluation est très variable et dépend des conditions et du type de vitrage. Les plus grandes différences ont été observées avec les modules BIPV. Mais il faut relever des conditions de mesure particulièrement difficiles, qui ont présenté des variations de température d'ambiance fortes et rapides, engendrant des phénomènes transitoires pour le g-box. Ils ont rendu la mesure des phénomènes thermiques d'autant moins précise. En revanche les meilleures mesures ont été obtenues dans la salle de cours A204 à Trevano, qui a présenté des températures d'ambiance relativement stables.

Les mesures journalières du coefficient g des vitrages de la salle A204, sans protection solaire, livrent une valeur moyenne de 0.38 +/- 0.03 avec le box 1. Cette valeur est compatible avec celle du fabricant qui donne une valeur ponctuelle de 0.38. Les mesures permettent de mesurer l'évolution du coefficient g au cours d'une journée, de même que le coefficient g global d'un vitrage avec une protection solaire extérieure. Les effets dynamiques d'ombrage, comme un pilier latéral à la fenêtre, ou la position des lamelles d'un store, sont mis en évidence par le g-box.

Les mesures du coefficient g nécessitent une belle journée. Une dispersion des résultats est observée d'un beau jour à un autre, et donc il est nécessaire de pouvoir prolonger les mesures sur une série de beaux jours de façon à limiter les incertitudes aléatoires, généralement causées par les diverses conditions climatiques et d'ambiance. Les dispersions observées et les incertitudes calculées ont produit une marge d'erreur qui, évaluée à deux écarts types pour avoir un intervalle de confiance de 95%, est typiquement de 0.03 - 0.06 en valeur absolue sur le coefficient g.

La surévaluation du coefficient g , causé par un phénomène non pris en compte dans le modèle thermique d'un box, peut créer une erreur systématique supérieure à l'incertitude indiquée ci-dessus. C'est la raison pour laquelle des études spécifiques sont encore nécessaires pour améliorer la méthode et l'analyse des mesures. Le dispositif g -box développé à ce jour fait preuve de très bonnes caractéristiques et présente un bon potentiel d'amélioration. Les mesures continues permettent en outre d'établir le bilan des gains solaires journaliers d'un vitrage et de sa protection solaire, ce qui ouvre des perspectives nouvelles pour prendre en compte l'influence de l'utilisateur ou de la régulation des stores.

10. Remerciements

L'Office Fédéral de l'Energie est remercié pour son support financier, sans lequel cette étude n'aurait pas été possible. Les écoles respectives des deux équipes, le HEPIA et la SUPSI, sont également remerciées pour leur support logistique et financier. Les auteurs remercient chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé au projet.

11. Références

- CR1000 specifications (2011) Campbell Scientific, Inc., www.campbellsci.com
- EMPA (2011) BIPV TEMP, g-Wertmessung. Prüfbericht Nr. 208'756, EMPA, Dübendorf.
- LOGGERNET (2009) LoggerNet 4.0. CampBell Scientific, Inc., www.campbellsci.com
- METEONORM (2010) Meteonorm Version 6.1. Global meteorological database for applied climatology, www.meteonorm.com
- Klein S. A. et al. (2007) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 16.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.

Annexe A

Contrôle PID

Programme de contrôle et d'acquisition des mesures du datalogger Campbell CR1000

Programme d'acquisition et de contrôle de la vanne mélangeuse.

```
' CR1000 Series Datalogger
' Project: g-box
' Program author: peter.gallinelli@leea.ch
' Created on : 04/12/2009 pg
' Last update : 15/03/2010 pg
'                xx/08/2011 dp
' Controle vanne PID per GBox Duo
' Parametres de controle au 12.08.2011 (box duo ISAAC) :
' P = K_proportional = 0.0025
' I = K_integral = 1E-08
' D = K_derivative = 5
' vanne est regulee chaque 30 sec, interval de temps defini par constante NRegul
' la vanne controle la temperature du GBox, mesuree et enregistree dans variable Ti_box
' la temperature du GBox est reglee sur Ti_consigne
' Ti_consigne est la temperature ambiante de la piece, calculee comme moyenne glissante de la
'                variable Tp
' la moyenne glissante est prise sur 30 min. Le nombre de mesures est defini par la constante
'                NMes30min

' Public Variables
' =====
' COMMON
Public Tref          ' temperature de reference
Public batt_volt    ' tension alimentation
Public i            ' compteur
Public STOP_As Boolean ' variable logique
'T consigne
Public Ti_consigne  ' temperature de consigne dans les GBox (pour Ti_box1 et Ti_box2)
Public Tp_mean      ' running mean pour la temperature de la piece
Public Tcons_run(2) ' array de running means pour determiner Tcons mean(2)
Public Tcons_mean(2) ' array contenant les 2 dernieres moyennes de Ti_consigne (Tconsigne
'                GBox 1 et 2)

'regul box1
Public Ta_run_box1(2) ' array de running means pour determiner Ta_mean_box1(2)
Public Ta_mean_box1(2) ' array contenant les 2 dernieres moyennes de Ta_box1 (Teau_aller
'                GBox1)
Public Ti_run_box1(2) ' array de running means pour determiner Ti_mean_box1(2)
Public Ti_mean_box1(2) ' array contenant les 2 dernieres moyennes de Ti_box1 (Tair GBox1)
Public SigneError_box1, SigneErrorOld_box1 ' signe + (=> 1) ou - (=> -1) de l'erreur
Public FLAG_box1 ' FLAG to count how many times error change signe
Public Error_box1 ' error variable defined as Ti_consigne - Ti_box1
Public IntegralError_box1 ' integrated error variable calculated with Error_box1
Public DerivativeError_box1 ' derivative error variable calculated with running mean of T
Public Proportional_OUT_box1 ' proportional gain of the PID controller
Public Integral_OUT_box1 ' integral gain of the PID controller
Public Derivative_OUT_box1 ' derivative gain of the PID controller
Public Total_gain_box1 ' total gain of the PID controller
Public K_proportional_box1 ' proportional factor to calculate the proportional gain of the
'                PID controller
Public K_integral_box1 ' integral factor to calculate the integral gain of the PID
'                controller
Public K_derivative_box1 ' derivative factor to calculate the derivative gain of the PID
'                controller
Public dTa_box1 ' derivative of Ta_box1
Public dTamin_box1 ' tolerance for dTa_box1

'regul box2
Public Ta_run_box2(2) ' array de running means pour determiner Ta_mean_box2(2)
Public Ta_mean_box2(2) ' array contenant les 2 dernieres moyennes de Ta_box2 (Teau_aller
'                GBox2)
Public Ti_run_box2(2) ' array de running means pour determiner Ti_mean_box2(2)
Public Ti_mean_box2(2) ' array contenant les 2 dernieres moyennes de Ti_box2 (Tair GBox2)
Public SigneError_box2, SigneErrorOld_box2 ' signe + (=> 1) ou - (=> -1) de l'erreur
Public FLAG_box2 ' FLAG to count how many times error change signe
Public Error_box2 ' error variable defined as Ti_consigne - Ti_box2
Public IntegralError_box2 ' integrated error variable calculated with Error_box2
Public DerivativeError_box2 ' derivative error variable calculated with running mean of T
Public Proportional_OUT_box2 ' proportional gain of the PID controller
Public Integral_OUT_box2 ' integral gain of the PID controller
Public Derivative_OUT_box2 ' derivative gain of the PID controller
Public Total_gain_box2 ' total gain of the PID controller
Public K_proportional_box2 ' proportional factor to calculate the proportional gain of the
'                PID controller
Public K_integral_box2 ' integral factor to calculate the integral gain of the PID
'                controller
Public K_derivative_box2 ' derivative factor to calculate the derivative gain of the PID
'                controller
Public dTa_box2 ' derivative of Ta_box2
Public dTamin_box2 ' tolerance for dTa_box2

' g-box
Public Te          ' temperature de l'air ext (TE)
Public Tp          ' temperature de l'air de la piece (TI)
Public Ta_box1     ' temperature eau aller box1 (A2 pour ISAAC et A1 pour LEEA)
Public Ta_box2     ' temperature eau aller box2 (A3 pour ISAAC et A4 pour LEEA)
Public Tr_box1     ' temperature eau retour box1 (R2 pour ISAAC et R1 pour LEEA)
```

```

Public Tr_box2      ' temperature eau retour box2 (R3 pour ISAAC et R4 pour LEEA)
Public Ti_box1     ' temperature de l'air dans box1 (I2 pour ISAAC et I1 pour LEEA)
Public Ti_box2     ' temperature de l'air dans box2 (I3 pour ISAAC et I4 pour LEEA)
'Public Tf(2)      ' temperature eau groupe froid 1 + 2
Public Gn          ' rayonnement solaire global normal (S)
Public Flow_box1  ' debit dans box 1 (F2 pour ISAAC et F1 pour LEEA)
Public Flow_box2  ' debit dans box 2 (F3 pour ISAAC et F4 pour LEEA)
'Public Uc         ' tension controle vanne 3V
'Public He        ' humidite relative de l'air ext
'Public Switch(8) ' sorties de controle on/off C4 ... C8
Public Ctrl(4)    ' sortie controle >> servo-vanne de regulation
                  ' Ctrl(1) = Ctrl_box1 : controle vanne melangeuse box 1
                  ' Ctrl(2) = Ctrl_box2 : controle vanne melangeuse box 2
Public Ctrl_box1  ' variable de controle vanne melangeuse box 1. Valeur inversee et assignee a
                  ' Ctrl(1)
Public Ctrl_box2  ' variable de controle vanne melangeuse box 2. Valeur inversee et assignee a
                  ' Ctrl(2)

' switch 1 > C1 : SDM-CVO4 C1
' switch 2 > C2 : SDM-CVO4 C2
' switch 3 > C3 : SDM-CVO4 C3

' switch 4 > C4 : lampe 100W
' switch 5 > C5 : lampe 100W
' switch 6 > C6 : ventilateurs de brassage
' switch 7 > C7 : collier chauffant
' switch 8 > C8 : groupe froid

Units Tref = "C"
Units batt_volt = "V"
Units Ti_consigne = "C"
Units Te = "C"
Units Tp = "C"
Units Ta_box1 = "C"
Units Ta_box2 = "C"
Units Tr_box1 = "C"
Units Tr_box2 = "C"
Units Ti_box1 = "C"
Units Ti_box2 = "C"
'Units Tf = "C"
Units Gn = "W/m2"
Units Flow_box1 = "l/min"
Units Flow_box2 = "l/min"
'Units Uc = "mV"
'Units He = "%"
'Units Switch = "mV"

' Constantes de calibration
' =====
'GBox LEEA
'Ta_box1 = A1
'Const a_Ta_box1 = 0.9977 'coefficient a de A1 temp. aller 1 pour box 1 (Tcal_A1 = a x A1 + b)
'Const b_Ta_box1 = -0.0052 'coefficient b de A1 temp. aller 1 pour box 1 (Tcal_A1 = a x A1 +
                        b)
'Tr_box1 = R1
'Const a_Tr_box1 = 0.9901 'coefficient a de R1 temp. retour 1 pour box 1 (Tcal_R1 = a x R1 +
                        b)
'Const b_Tr_box1 = 0.1973 'coefficient b de R1 temp. retour 1 pour box 1 (Tcal_R1 = a x R1 +
                        b)
'Ti_box1 = I1
'Const a_Ti_box1 = 0.9981 'coefficient a de I1 temp. interieure 1 pour box 1 (Tcal_I1 = a x I1
                        + b)
'Const b_Ti_box1 = -0.0077 'coefficient b de I1 temp. interieure 1 pour box 1 (Tcal_I1 = a x I1
                        + b)
'Ta_box2 = A4
'Const a_Ta_box2 = 0.9934 'coefficient a de A4 temp. aller 4 pour box 2 (Tcal_A4 = a x A4 + b)
'Const b_Ta_box2 = 0.1697 'coefficient b de A4 temp. aller 4 pour box 2 (Tcal_A4 = a x A4 + b)
'Tr_box2 = R4
'Const a_Tr_box2 = 0.999 'coefficient a de R4 temp. retour 4 pour box 2 (Tcal_R4 = a x R4 +
                        b)
'Const b_Tr_box2 = 0.0105 'coefficient b de R4 temp. retour 4 pour box 2 (Tcal_R4 = a x R4 +
                        b)
'Ti_box2 = I4
'Const a_Ti_box2 = 0.9917 'coefficient a de I4 temp. interieure 4 pour box 2 (Tcal_I4 = a x
                        I4 + b)
'Const b_Ti_box2 = 0.2028 'coefficient b de I4 temp. interieure 4 pour box 2 (Tcal_I4 = a x I4
                        + b)
'Gn = S
'Const a_Gn = 106.27 'coefficient a = 1000/9.41 [Wm-2/mV] pour solarimetre (solarimetre K&Z
                        CM6B : 9.41 microV/(Wm-2))
'Const b_Gn = 0.0 'coefficient b pour solarimetre
'Flow_box1 = F1 - BOX1 LEEA
'Const a_Flow_box1 = 0.0145 'coefficient a pour debitmetre box 1 (debitmetre KOBOLD
                        45/211862' 0.0145,-0.0146)
'Const b_Flow_box1 = -0.0146 'coefficient b pour debitmetre box 1
'Flow_box2 = F4 - BOX4 LEEA

```

```

'Const a_Flow_box2 = 0.0145 'coefficient a pour debitmetre box 2 (debitmetre KOBOLD
45/210573' 0.0145,-0.0137)
'Const b_Flow_box2 =-0.0137 'coefficient b pour debitmetre box 2
'Fin GBox LEEA -----

'GBox ISAAC -----
'Ta_box1 = A2
Const a_Ta_box1 = 0.9925 'coefficient a de A2 temp. aller 2 pour box 1 (Tcal_A2 = a x A2 + b)
Const b_Ta_box1 = 0.126 'coefficient b de A2 temp. aller 2 pour box 1 (Tcal_A2 = a x A2 + b)
'Tr_box1 = R2
Const a_Tr_box1 = 0.9937 'coefficient a de R2 temp. retour 2 pour box 1 (Tcal_R2 = a x R2 + b)
Const b_Tr_box1 = 0.1185 'coefficient b de R2 temp. retour 2 pour box 1 (Tcal_R2 = a x R2 + b)
'Ti_box1 = I2
Const a_Ti_box1 = 0.9982 'coefficient a de I2 temp. interieure 2 pour box 1 (Tcal_I2 = a x I2
+ b)
Const b_Ti_box1 =-0.0111 'coefficient b de I2 temp. interieure 2 pour box 1 (Tcal_I2 = a x I2
+ b)

'Ta_box2 = A3
Const a_Ta_box2 = 0.9914 'coefficient a de A3 temp. aller 3 pour box 2 (Tcal_A3 = a x A3 + b)
Const b_Ta_box2 = 0.1901 'coefficient b de A3 temp. aller 3 pour box 2 (Tcal_A3 = a x A3 + b)
'Tr_box2 = R3
Const a_Tr_box2 = 0.9992 'coefficient a de R3 temp. retour 3 pour box 2 (Tcal_R3 = a x R3 + b)
Const b_Tr_box2 =-0.005 'coefficient b de R3 temp. retour 3 pour box 2 (Tcal_R3 = a x R3 + b)
'Ti_box2 = I3
Const a_Ti_box2 = 0.995 'coefficient a de I3 temp. interieure 3 pour box 2 (Tcal_I3 = a x I3
+ b)
Const b_Ti_box2 = 0.1172 'coefficient b de I3 temp. interieure 3 pour box 2 (Tcal_I3 = a x I3
+ b)

'Gn = S
Const a_Gn = 199.64 'coefficient a = 1000/5.009 [Wm-2/mV] pour solarimetre (solarimetre K&Z
CM11 ISAAC : 5.009 microV/(Wm-2) - PYR20 - no serie 038171)
Const b_Gn = 0.0 'coefficient b pour solarimetre
'Flow_box1 = F2 - BOX2 ISAAC
Const a_Flow_box1 = 0.0147 'coefficient a pour debitmetre box 1 (debitmetre KOBOLD
45/211860' 0.0147,-0.0132)
Const b_Flow_box1 =-0.0132 'coefficient b pour debitmetre box 1
'Flow_box2 = F3 - BOX3 ISAAC
Const a_Flow_box2 = 0.0146 'coefficient a pour debitmetre box 2 (debitmetre KOBOLD
45/211861' 0.0146,-0.0207)
Const b_Flow_box2 =-0.0207 'coefficient b pour debitmetre box 2
'Fin GBox ISAAC -----

' Constants
' =====
Const PI = 3.141592654
Const NScan = 2 ' sec - intervalle des scans en secondes
Const NInt = 60 ' sec - intervalle des enregistrements en secondes
Const NRegul = 30 ' sec - intervalle de temps pour moyennes de Temperature pour le controle
de la vanne 3-voies
Const NMesures = NRegul / NScan ' nombre de mesures pour faire moyenne durant NRegul
Const NMes30min = 30 * 60 / NScan ' nombre de mesures pour faire moyenne durant 30 minutes

' Subroutines
' =====

' Data Tables
' =====
DataTable (Table1,1,-1)
DataInterval (0,NInt,Sec,10) ' intervalle des enregistrements : 1'

Average (1,batt_volt,FP2,0)
Average (1,Tref,FP2,0)
Average (1,Te,FP2,False)
Average (1,Tp,FP2,False)
Average (1,Ta_box1,FP2,False)
Average (1,Ta_box2,FP2,False)
Average (1,Tr_box1,FP2,False)
Average (1,Tr_box2,FP2,False)
Average (1,Ti_box1,FP2,False)
Average (1,Ti_box2,FP2,False)
' Average (2,Tf,FP2,False)
Average (1,Gn,FP2,False)
Average (1,Flow_box1,FP2,False)
Average (1,Flow_box2,FP2,False)
' Average (1,Uc,FP2,False)
' Average (1,He,FP2,False)
' Sample (8,Switch,FP2)
Average (1,Ctrl(1),IEEE4,False) ' Ctrl(1): valve control signal for box 1
Average (1,Ctrl(2),IEEE4,False) ' Ctrl(2): valve control signal for box 2
' Sample (4,Ctrl,IEEE4)
Average (1,Ti_consigne,FP2,False)
EndTable

' Main Program
' =====
BeginProg

```

```
'initialisation
K_proportional_box1 = 0.0025 ' proportional factor to calculate the proportional gain of the
PID controller for box 1
K_proportional_box2 = 0.0025 ' proportional factor to calculate the proportional gain of the
PID controller for box 2
K_integral_box1 = 0.00000001 ' integral factor to calculate the integral gain of the PID
controller for box 1
K_integral_box2 = 0.00000001 ' integral factor to calculate the integral gain of the PID
controller for box 2
K_derivative_box1 = 5 ' derivative factor to calculate the derivative gain of the PID
controller for box 1
K_derivative_box2 = 5 ' derivative factor to calculate the derivative gain of the PID
controller for box 2

SigneError_box1 = 0
SigneError_box2 = 0
IntegralError_box1 = 0
IntegralError_box2 = 0
FLAG_box1 = 0
FLAG_box2 = 0
dTamin_box1 = 1
dTamin_box2 = 1
Ctrl_box1 = 5000
Ctrl_box2 = 5000

Scan (NScan,Sec,0,0) ' intervalle de prise de mesures : 2"

PanelTemp (Tref,250) ' temperature de reference CR1000
Battery (batt_volt) ' tension d'alimentation CR1000

' Mesures
TCSe (Ta_box1,1,mV7_5,1,TypeK,Tref,True,0,_50Hz,a_Ta_box1,b_Ta_box1) ' thermocouple type K
single end >> T aller box 1 (cf. section "Constantes de calibration")
TCSe (Tr_box1,1,mV7_5,2,TypeK,Tref,True,0,_50Hz,a_Tr_box1,b_Tr_box1) ' thermocouple type K
single end >> T retour box 1 (cf. section "Constantes de calibration")
TCSe (Ti_box1,1,mV7_5,3,TypeK,Tref,True,0,_50Hz,a_Ti_box1,b_Ti_box1) ' thermocouple type K
single end >> T interieur box 1 (cf. section "Constantes de calibration")
TCSe (Ta_box2,1,mV7_5,4,TypeK,Tref,True,0,_50Hz,a_Ta_box2,b_Ta_box2) ' thermocouple type K
single end >> T aller box 2 (cf. section "Constantes de calibration")
TCSe (Tr_box2,1,mV7_5,5,TypeK,Tref,True,0,_50Hz,a_Tr_box2,b_Tr_box2) ' thermocouple type K
single end >> T retour box 2 (cf. section "Constantes de calibration")
TCSe (Ti_box2,1,mV7_5,6,TypeK,Tref,True,0,_50Hz,a_Ti_box2,b_Ti_box2) ' thermocouple type K
single end >> T interieur box 2 (cf. section "Constantes de calibration")
TCSe (Te,1,mV7_5,7,TypeK,Tref,1,0,_50Hz,1.0,0.1) ' thermocouple type K single end >>
T exterieur
TCSe (Tp,1,mV7_5,8,TypeK,Tref,1,0,_50Hz,1.0,0.1) ' thermocouple type K single end >>
T piece
VoltDiff (Gn,1,mV25C,5,True,0,_50Hz,a_Gn,b_Gn) ' cf. section "Constantes de
calibration"
PulseCount (Flow_box1,1,1,0,0,a_Flow_box1/NScan,b_Flow_box1) ' cf. section "Constantes
de calibration"
PulseCount (Flow_box2,1,2,0,0,a_Flow_box2/NScan,b_Flow_box2) ' cf. section "Constantes
de calibration"
' TCSe (Tf,2,mV7_5,9,TypeK,Tref,True,0,_50Hz,1.0,0) ' thermocouple type K single end >>
T source froid 1 + 2
' VoltSe (Uc,1,mV5000,13,True,0,_50Hz,1.0,0) ' U controle vanne 3-voies
' VoltSe (He,1,mV2500,14,True,0,_50Hz,0.1268,-7.3474) ' HR (etalonnage TODO)

' programmation des variables de controle
' -----
' algorithme de regulation PID : a developper
' la variable Ctrl(1) = Ctrl_box1 contient l'information d'ouverture de vanne du box 1 (0
mV = ferme ... 10000 mV ouvert)
' la variable Ctrl(2) = Ctrl_box2 contient l'information d'ouverture de vanne du box 2 (0
mV = ferme ... 10000 mV ouvert)
' ref vanne : SAUTER BUL 010 F430
' ref servo : SAUTER AXM 117S F202
' 1 canal est encore libre pour une autre taches : Ctrl(3)
' le canal Ctrl(4) sera utilise pour afficher la valeur g instantane sur un galvanometre

' TEMPERATURE DE CONSIGNE -----
' REM: temperature de consigne fixee arbitrairement sur celle de la piece evaluee en
moyenne glissante sur NMesures
AvgRun (Tp_mean,1,Tp,NMes30min)
Ti_consigne = Tp_mean ' degree C
' calcul des moyennes glissantes pour Ti_consigne
AvgRun (Tcons_run(1),1,Ti_consigne,NMesures)
AvgRun (Tcons_run(2),1,Ti_consigne,2*NMesures)
Tcons_mean(1) = Tcons_run(1) ' moyenne glissante de Ti_consigne pour
l'intervalle de temps (t-NRegul ; t), t est le temps de la derniere mesure
Tcons_mean(2) = 2*Tcons_run(2) - Tcons_run(1) ' moyenne glissante de Ti_consigne pour
l'intervalle de temps (t-2NRegul ; t-NRegul)

' CONTROLE GBOX1 -----
' calcul des moyennes glissantes pour Ta_box1 et Ti_box1
AvgRun (Ta_run_box1(1),1,Ta_box1,NMesures)
AvgRun (Ta_run_box1(2),1,Ta_box1,2*NMesures)
```

```

Ta_mean_box1(1) = Ta_run_box1(1) ' moyenne glissante de Ta_box1 pour
    l'intervalle de temps (t-NRegul ; t), t est le temps de la dernière mesure
Ta_mean_box1(2) = 2*Ta_run_box1(2) - Ta_run_box1(1)' moyenne glissante de Ta_box1 pour
    l'intervalle de temps (t-2NRegul ; t-NRegul)
AvgRun (Ti_run_box1(1),1,Ti_box1,NMesures)
AvgRun (Ti_run_box1(2),1,Ti_box1,2*NMesures)
Ti_mean_box1(1) = Ti_run_box1(1) ' moyenne glissante de Ti_box1 pour
    l'intervalle de temps (t-NRegul ; t), t est le temps de la dernière mesure
Ti_mean_box1(2) = 2*Ti_run_box1(2) - Ti_run_box1(1)' moyenne glissante de Ti_box1 pour
    l'intervalle de temps (t-2NRegul ; t-NRegul)

'controle PID (proportional - intregral - derivative)
'Error variable
Error_box1 = Ti_consigne - Ti_box1

'Calculate the proportional gain of the PID controller
Proportional_OUT_box1 = - K_proportional_box1 * Error_box1 ' the control action is
    inversely proportional to the error (valve is opened when error is negative
    i.e. Ti_box1 too warm)

'Calculate the integral gain of the PID controller
'How many time the sign of the Error_box1 changed
SigneErrorOld_box1 = SigneError_box1
If Error_box1 > 0 Then
    SigneError_box1 = 1
Else
    SigneError_box1 = -1
EndIf
If ((SigneErrorOld_box1 * SigneError_box1) <= -1) Then FLAG_box1 = FLAG_box1 + 1
'Integration of the error if FLAG_box1 >=2 (if the sign of error changed at least twice
    for not taking into account initial transient effect)
If FLAG_box1 >=2 Then IntegralError_box1 = IntegralError_box1 + Error_box1*NScan
Integral_OUT_box1 = - K_integral_box1 * IntegralError_box1 ' the control action is
    inversely proportional to the integrated error

'Calculate the derivative gain of the PID controller
DerivativeError_box1 = ((Tcons_mean(1)-Ti_mean_box1(1))-(Tcons_mean(2)-
    Ti_mean_box1(2)))/NRegul
Derivative_OUT_box1 = - K_derivative_box1 * DerivativeError_box1 ' the control action is
    inversely proportional to the derivative error

'Calculate the total gain of the PID controller
Total_gain_box1 = Proportional_OUT_box1 + Integral_OUT_box1 + Derivative_OUT_box1

If IfTime(0,NRegul,sec) Then 'la regulation est controlee chaque NRegul secondes
    'the derivative of forward fluid temperature Ta is used to prevent an excess increase or
    decrease of the valve
    'dTa_box1: derivative of Ta in K/0.01day
    dTa_box1 = (Ta_mean_box1(1) - Ta_mean_box1(2))/NRegul * (24*36)
    'IF sinking of Ta too important THEN no more cooling allowed (Ctrl not increased)
    If dTa_box1 < -dTamin_box1 Then
        If Total_gain_box1 > 0 Then Total_gain_box1 = 0
    EndIf
    'IF rising of Ta too important THEN no less cooling allowed (Ctrl not decreased)
    If dTa_box1 > dTamin_box1 Then
        If Total_gain_box1 < 0 Then Total_gain_box1 = 0
    EndIf

    Ctrl_box1 = Ctrl_box1 + 10000 * Total_gain_box1
    If Ctrl_box1 > 10000 Then Ctrl_box1 = 10000 ' the valve is completely opened when
        Ctrl_box1 is set to 10000
    If Ctrl_box1 < 0 Then Ctrl_box1 = 0 ' the valve is completely closed when
        Ctrl_box1 is set to 0

'
' possible heating if no cooling and too cold in GBox
' If (Ctrl_box1 <= 0) AND (Error > 0) Then
' Switch(7) = -1 ' C7 : collier chauffant ON
' Switch(7) = 0 ' C7 : le collier chauffant n'est pas utilise pour le moment
' Else
' Switch(7) = 0 ' C7 : collier chauffant OFF
' EndIf
EndIf ' IfTime
' FIN CONTROLE GBOX1 -----

' CONTROLE GBOX2 -----
' calcul des moyennes glissantes pour Ta_box2 et Ti_box2
AvgRun (Ta_run_box2(1),1,Ta_box2,NMesures)
AvgRun (Ta_run_box2(2),1,Ta_box2,2*NMesures)
Ta_mean_box2(1) = Ta_run_box2(1) ' moyenne glissante de Ta_box2 pour
    l'intervalle de temps (t-NRegul ; t), t est le temps de la dernière mesure
Ta_mean_box2(2) = 2*Ta_run_box2(2) - Ta_run_box2(1)' moyenne glissante de Ta_box2 pour
    l'intervalle de temps (t-2NRegul ; t-NRegul)
AvgRun (Ti_run_box2(1),1,Ti_box2,NMesures)
AvgRun (Ti_run_box2(2),1,Ti_box2,2*NMesures)
Ti_mean_box2(1) = Ti_run_box2(1) ' moyenne glissante de Ti_box2 pour
    l'intervalle de temps (t-NRegul ; t), t est le temps de la dernière mesure

```

```

Ti_mean_box2(2) = 2*Ti_run_box2(2) - Ti_run_box2(1) ' moyenne glissante de Ti_box2 pour
l'intervalle de temps (t-2NRegul ; t-NRegul)

'controle PID (proportional - integral - derivative)
'Error variable
Error_box2 = Ti_consigne - Ti_box2

'Calculate the proportional gain of the PID controller
Proportional_OUT_box2 = - K_proportional_box2 * Error_box2 ' the control action is
inversely proportional to the error (valve is opened when error is negative
i.e. Ti_box2 too warm)

'Calculate the integral gain of the PID controller
'How many time the sign of the Error_box2 changed
SigneErrorOld_box2 = SigneError_box2
If Error_box2 > 0 Then
    SigneError_box2 = 1
Else
    SigneError_box2 = -1
EndIf
If ((SigneErrorOld_box2 * SigneError_box2) <= -1) Then FLAG_box2 = FLAG_box2 + 1
'Integration of the error if FLAG_box2 >=2 (if the sign of error changed at least twice
for not taking into account initial transient effect)
If FLAG_box2 >=2 Then IntegralError_box2 = IntegralError_box2 + Error_box2*NScan
Integral_OUT_box2 = - K_integral_box2 * IntegralError_box2 ' the control action is
inversely proportional to the integrated error

'Calculate the derivative gain of the PID controller
DerivativeError_box2 = ((Tcons_mean(1)-Ti_mean_box2(1))-(Tcons_mean(2)-
Ti_mean_box2(2)))/NRegul
Derivative_OUT_box2 = - K_derivative_box2 * DerivativeError_box2 ' the control action is
inversely proportional to the derivative error

'Calculate the total gain of the PID controller
Total_gain_box2 = Proportional_OUT_box2 + Integral_OUT_box2 + Derivative_OUT_box2

If IfTime(0,NRegul,sec) Then 'la regulation est controlee chaque NRegul secondes
'the derivative of forward fluid temperature Ta is used to prevent an excess increase or
decrease of the valve
'dTa_box2: derivative of Ta in K/0.01day
dTa_box2 = (Ta_mean_box2(1) - Ta_mean_box2(2))/NRegul * (24*36)
'IF sinking of Ta too important THEN no more cooling allowed (Ctrl not increased)
If dTa_box2 < -dTamin_box2 Then
    If Total_gain_box2 > 0 Then Total_gain_box2 = 0
EndIf
'IF rising of Ta too important THEN no less cooling allowed (Ctrl not decreased)
If dTa_box2 > dTamin_box2 Then
    If Total_gain_box2 < 0 Then Total_gain_box2 = 0
EndIf

Ctrl_box2 = Ctrl_box2 + 10000 * Total_gain_box2
If Ctrl_box2 > 10000 Then Ctrl_box2 = 10000 ' the valve is completely opened when
Ctrl_box2 is set to 10000
If Ctrl_box2 < 0 Then Ctrl_box2 = 0 ' the valve is completely closed when
Ctrl_box2 is set to 0

' possible heating if no cooling and too cold in GBox
' If (Ctrl_box2 <= 0) AND (Error > 0) Then
' Switch(7) = -1 ' C7 : collier chauffant ON
' Switch(7) = 0 ' C7 : le collier chauffant n'est pas utilise pour le moment
' Else
' Switch(7) = 0 ' C7 : collier chauffant OFF
' EndIf
EndIf ' IfTime
' FIN CONTROLE GBOX2 -----

' valve control was done with Ctrl_box1 and Ctrl_box2 assuming:
' valve completely open when Ctrl = 10000
' valve completely closed when Ctrl = 0
' valve is opened when GBox is too warm (fully open: no bypass)
' valve is closed when GBox is too cold (fully closed: bypass)
Ctrl(1) = Ctrl_box1
Ctrl(2) = Ctrl_box2
' attention, si le cablage du controle des vannes est inverse (Ctrl(1) => controle vanne
Box2 et Ctrl(2) => controle vanne Box 1)
alors commenter les deux lignes de programme suivantes:
Ctrl(1) = Ctrl_box2
Ctrl(2) = Ctrl_box1
Ctrl(3) = 0
Ctrl(4) = 0
SDMCV04 (Ctrl(),4,0,10) ' commande de l'interface D/A

' -----

' protections de l'appareil
' -----

```

```
'
' declenche collier chauffant et les resistances si la temperature est trop haute ou si
' le debit est trop faible
STOP = False
If Ta_box1 > 50 Then STOP = True
'
'
' If Ti_box1 > 50 Then STOP = True
' If Flow_box1 < 0.01 Then STOP = True
' If STOP Then
' Switch(7) = 0 ' C7 : collier chauffant OFF
' Switch(4) = 0 ' C4 : 1ere resistance OFF
' Switch(5) = 0 ' C5 : 2eme resistance OFF
' EndIf
' declenche machine frigo si la temperature est trop basse
STOP = False
If Tf(1) < 5 Then STOP = True
If Tf(2) < 5 Then STOP = True
If STOP Then
Switch(8) = 0 ' C8 : machine frigo OFF
EndIf
'
' soft switch : sorties controle C4 ... C8 [on = 5V / off = 0V]
For i = 4 To 8
If Switch(i) < 0
Select Case i
Case 4
PortSet (4,1)
Case 5
PortSet (5,1)
Case 6
PortSet (6,1)
Case 7
PortSet (7,1)
Case 8
PortSet (8,1)
EndSelect
Else
Select Case i
Case 4
PortSet (4,0)
Case 5
PortSet (5,0)
Case 6
PortSet (6,0)
Case 7
PortSet (7,0)
Case 8
PortSet (8,0)
EndSelect
EndIf
Next

' Call Output Tables
' -----
CallTable (Table1)
NextScan
EndProg

' Cablages
' =====
' SE1 : TC . T aller box 1 (temperature A2 pour GBox ISAAC et A1 pour GBox LEEA)
' SE2 : TC . T retour box 1 (temperature R2 pour GBox ISAAC et R1 pour GBox LEEA)
' SE3 : TC . T air box 1 (temperature I2 pour GBox ISAAC et I1 pour GBox LEEA)
' SE4 : TC . T aller box 2 (temperature A3 pour GBox ISAAC et A4 pour GBox LEEA)
' SE5 : TC . T retour box 2 (temperature R3 pour GBox ISAAC et R4 pour GBox LEEA)
' SE6 : TC . T air box 2 (temperature I3 pour GBox ISAAC et I4 pour GBox LEEA)
' SE7 : TC . T air ext
' SE8 : TC . T piece
' DIF5 : pyranometre Gn - rayonnement global plan fenetre
' SE11 :
' SE12 :
' SE13 :
' SE14 :
' SE15 :
' SE16 :
' ???' SE11 : U controle vanne 3 de regulation [0...10V] >> diviseur 1/2

' P1 : Flow box 1 . debitmetre KOBOLD (debit F2 pour GBox ISAAC et F1 pour GBox LEEA)
' P2 : Flow box 2 . debitmetre KOBOLD (debit F3 pour GBox ISAAC et F4 pour GBox LEEA)

' C1 -> SDM-CVO4 C1 . Control vanne GBox 1
' C2 -> SDM-CVO4 C2 . Control vanne GBox 2
' C3 -> SDM-CVO4 C3

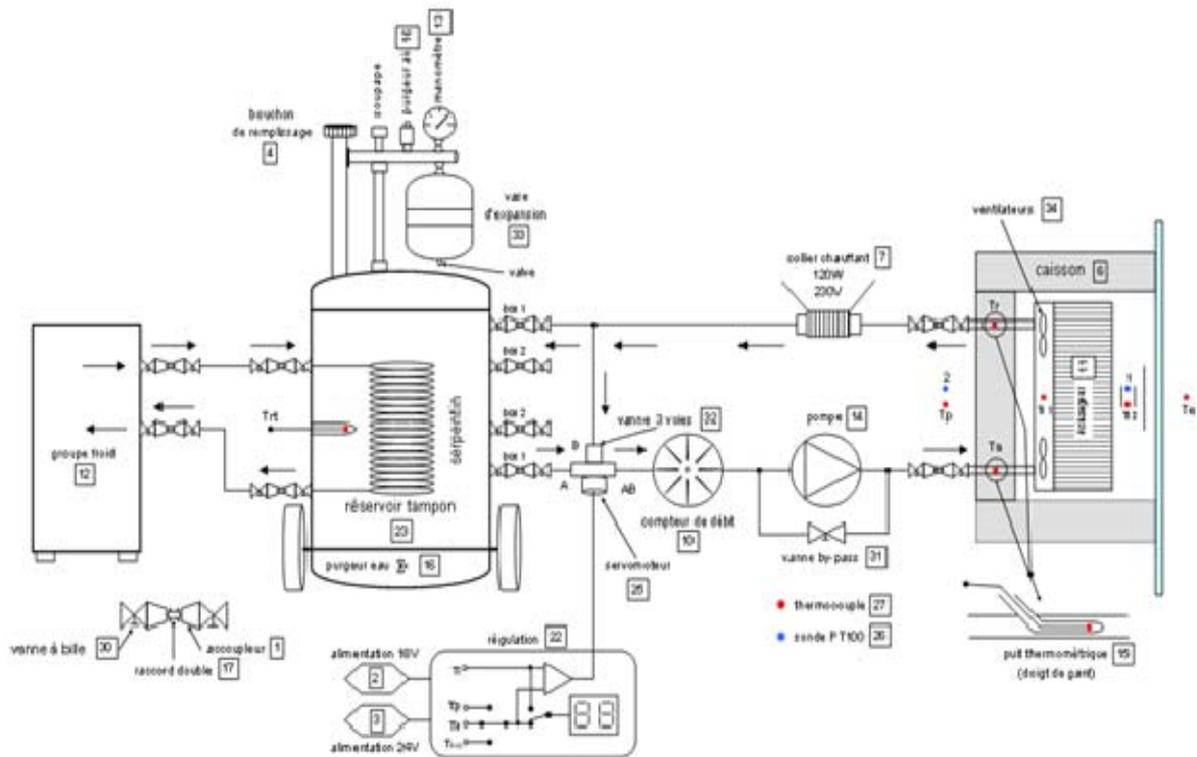
' EOF
```


Annexe B

Construction du g-box Référence pour le matériel et les plans

Schéma synoptique	2
Groupe froid	3
Réservoir tampon	4
Circuit hydraulique	6
Boite à relais	9
Caisson calorimétrique	12
Acquisition, datalogger, interfaces PID et IP	16
Capteurs de climat extérieur	19
Inventaire des composants	20

Schéma synoptique



De gauche à droite :

- groupe froid (circulateur intégré)
- circuit d'eau froide
- réservoir tampon (eau froide)
- circuit d'eau secondaire (mesure, régulation, circulation)
- enceinte thermique (calorimètre)

L'installation comprend trois ensembles, démontables pour les besoins de transport:

- groupe froid (1x)
- réservoir tampon (1x)
- calorimètre avec circuit hydraulique (2x)
- régulation (1x)

Chaque ensemble peut être manœuvré par une personne sur terrain plat, à deux s'il faut monter des escaliers. Le remplissage du réservoir tampon est effectué une fois sur place moyennant un tuyau d'arrosage (pression > 1bar).

Groupe froid

Le groupe froid est une machine d'usu froide du marché d'une puissance de froid de 500W. Elle fournit de l'eau à 10°C à l'échangeur à serpentin du réservoir tampon.

Modèle retenu: Riedel VKW 7101 K

Kaltwassersatz	VKW 7101 K
Kälteleistung	siehe Diagramm Seite 2
Stufenlose Temperaturregelung	ja
Reglerstellung 5 (kalt)	+ 3,5 °C
Reglerstellung 1 (warm)	+ 21 °C
Temperaturschalt-differenz	2,5 K
Einsatzbereich	
Umgebungstemperatur	+ 18 °C bis + 38 °C
Wasser-Rücklauf-temperatur	+ 4 °C bis + 40 °C
Spannung/Frequenz	230 V/ 50 Hz
Stromaufnahme	2,6 A
Energieaufnahme	550 W
Kältemittel	R 134 A
Schlauchanschlüsse	1/2 "
Gewicht	40 kg
Behälter mit Umwälzpumpe	integriert
Maße: Höhe x Breite x Tiefe (mm)	600 x 505 x 310

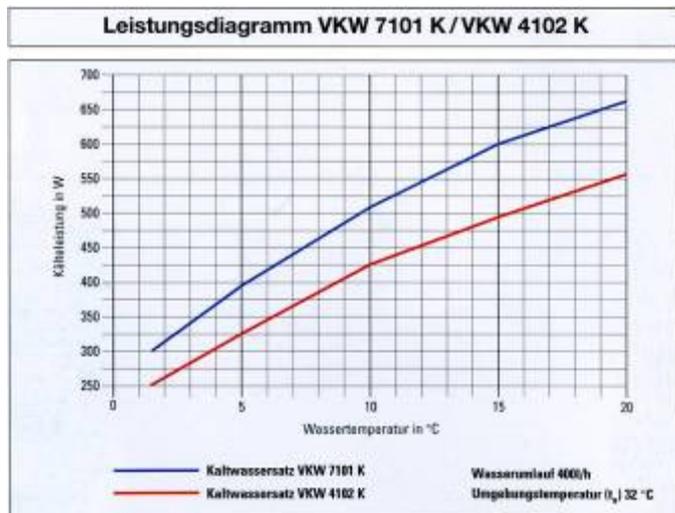
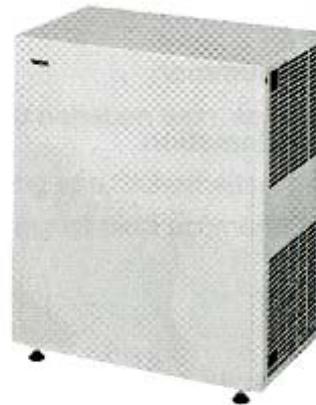
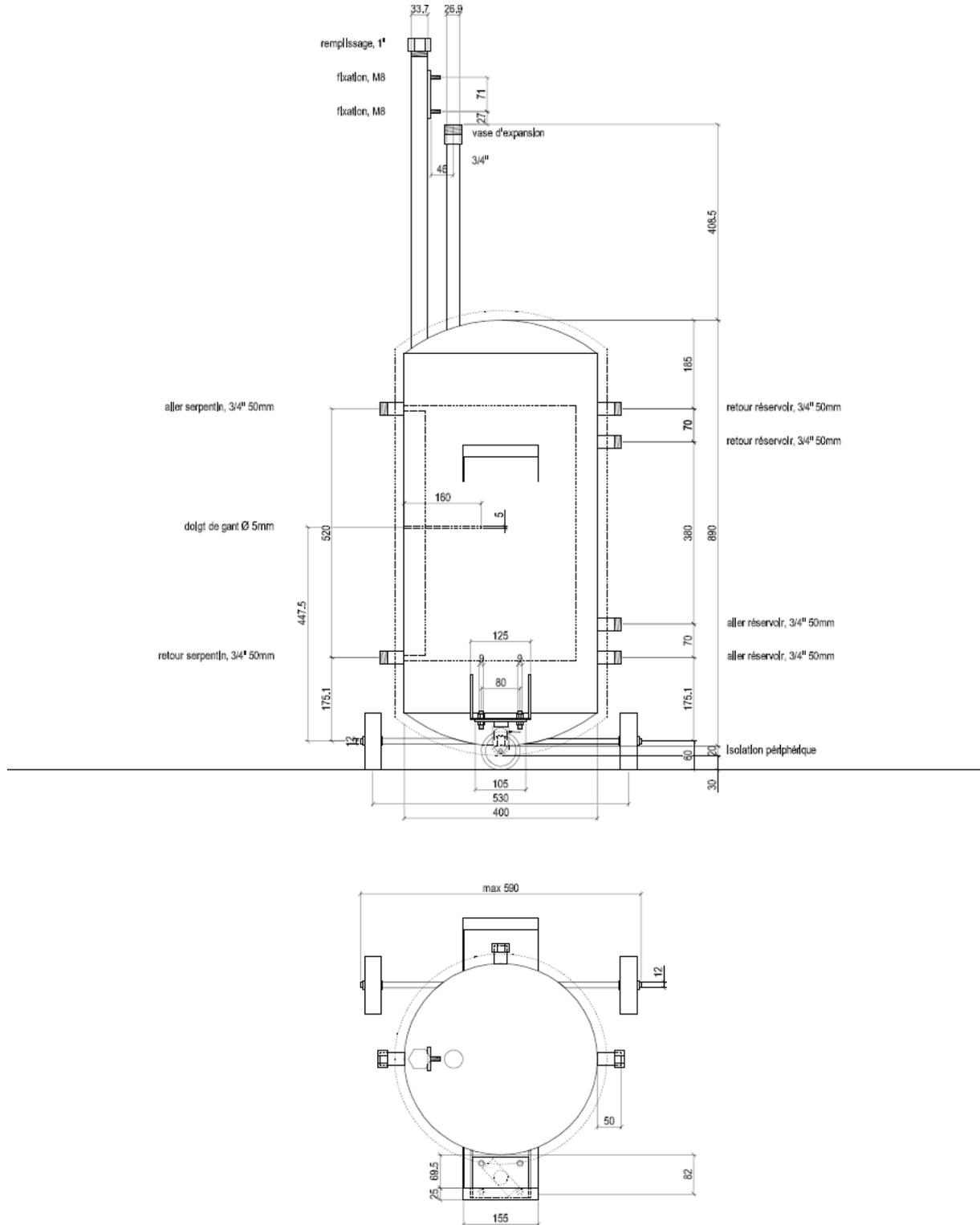


Diagramme de la 'Seite 2' et présentation



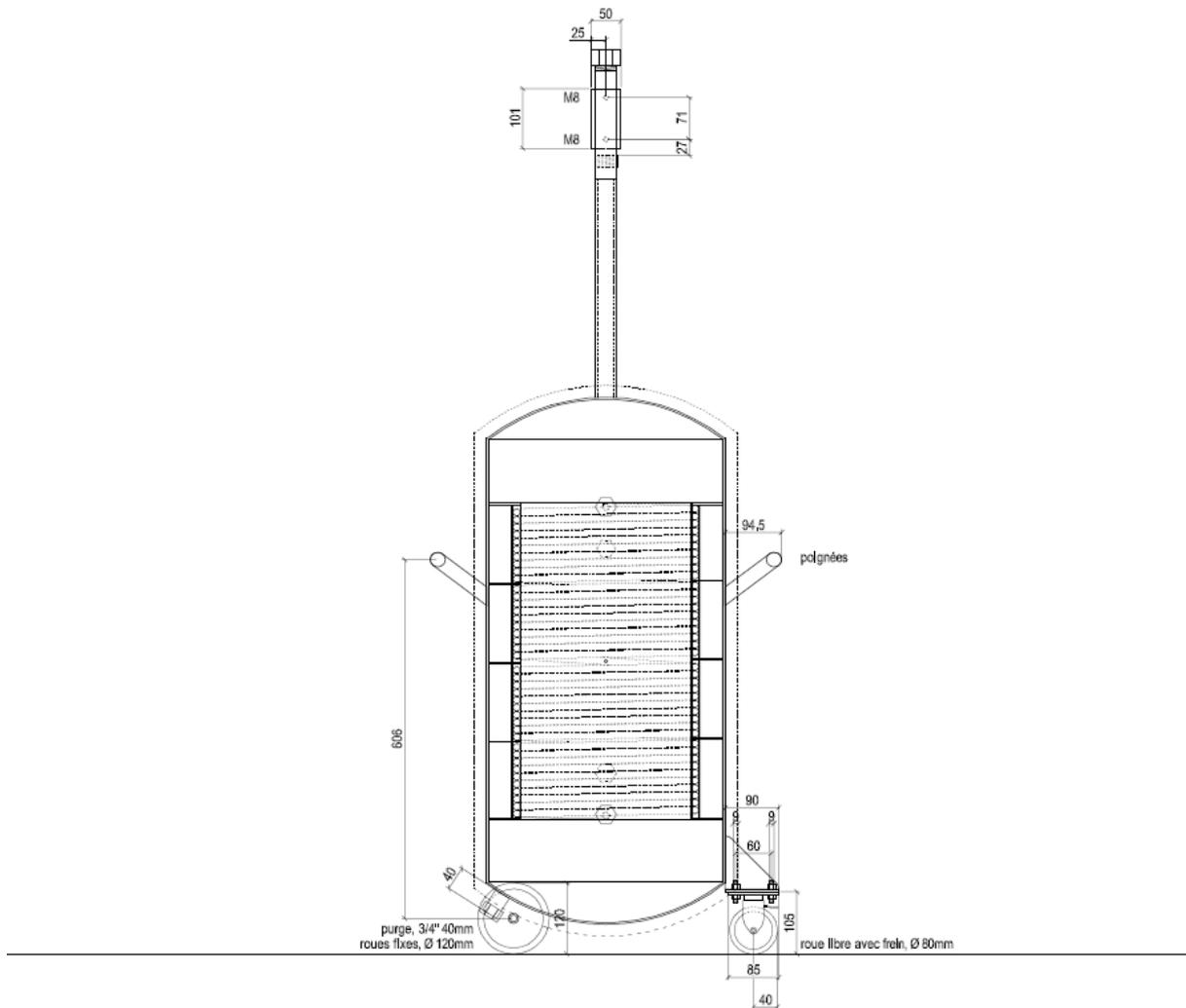
Réservoir tampon

D'une contenance de 100 litres et permettant de raccorder deux calorimètres, le réservoir tampon est construit en chaudronnerie INOX alliage 316L selon plans fournis ci-après. Sauf indication contraire, l'épaisseur est de 15/10. Le réservoir est finalement emballé dans un isolant souple au choix (PU ou PE) de 20mm afin délimiter les pertes thermiques et la condensation. Les raccords sont pourvus de raccords rapides.



Le réservoir est fabriqué par la chaudronnerie industrielle Dujardin Icofrance en Normandie.

Coupe illustrant l'échangeur de chaleur pour le circuit d'eau froide.



Réservoir terminé et équipé de son vase d'expansion avant isolation. A droite, confection de l'isolation en mousse néoprène habillé de tissu Cordura cousu sur mesure.

Circuit hydraulique

Le circuit hydraulique est rapporté contre la face arrière du calorimètre et fixé à l'aide d'une tôle perforée. On y trouve les éléments suivants :

1. Compteur de débit
2. Pompe de circulation
3. Vanne by-pass
4. Vanne de régulation 3 voies
5. Servomoteur de régulation
6. Aller radiateur
7. Retour radiateur
8. Transformateurs basse tension 12 et 24V
9. Borne de connexion
10. Aller eau froide
11. Retour eau froide

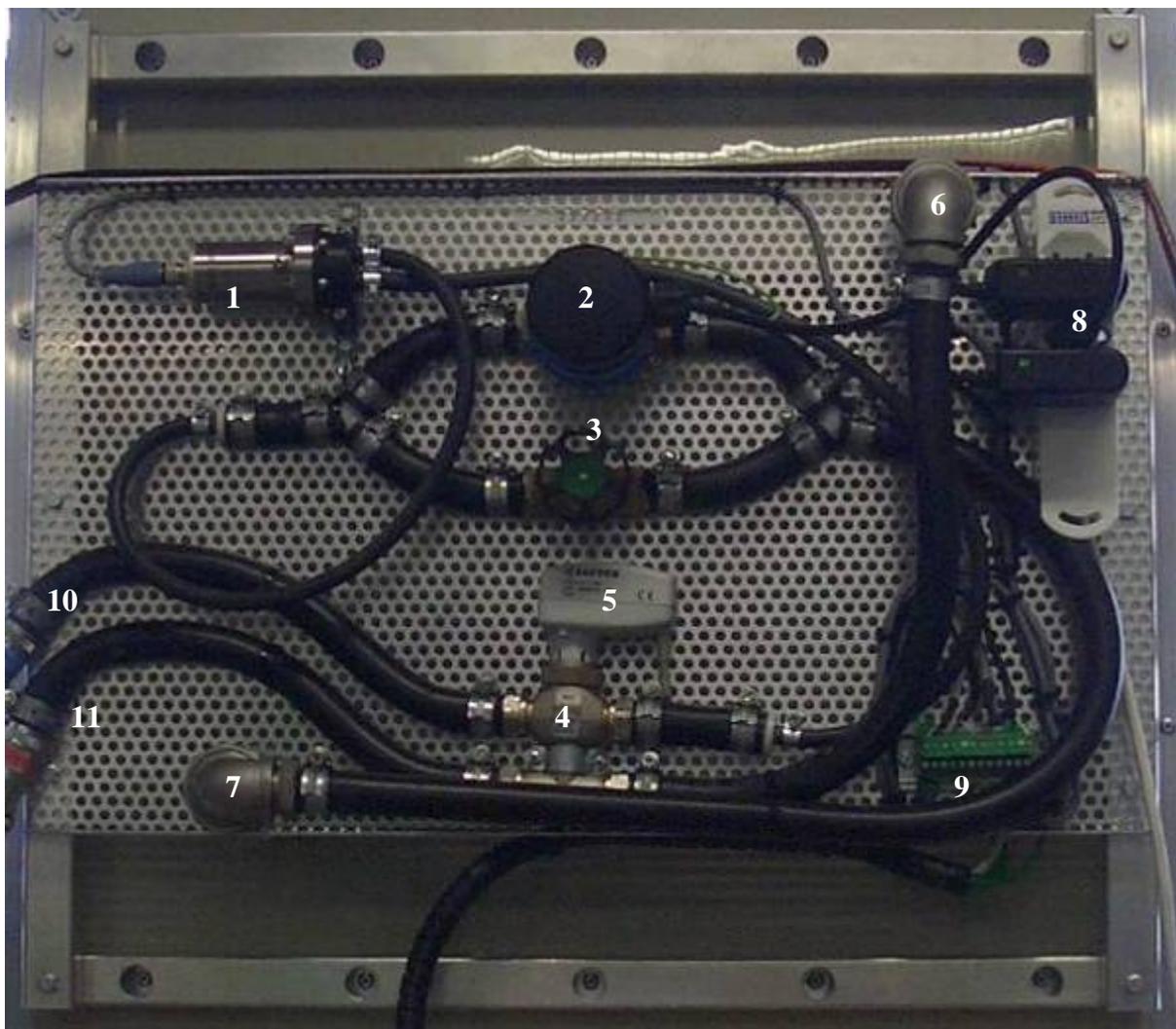
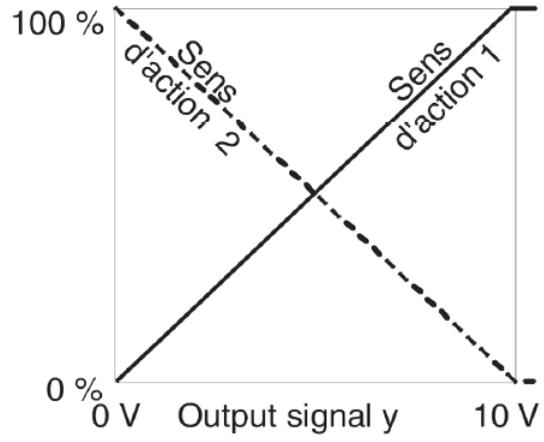
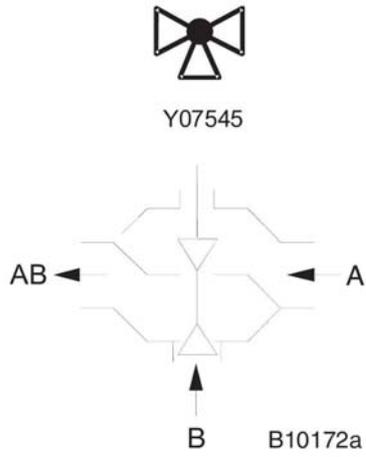


Schéma et caractéristique de régulation de l'électrovanne (4).

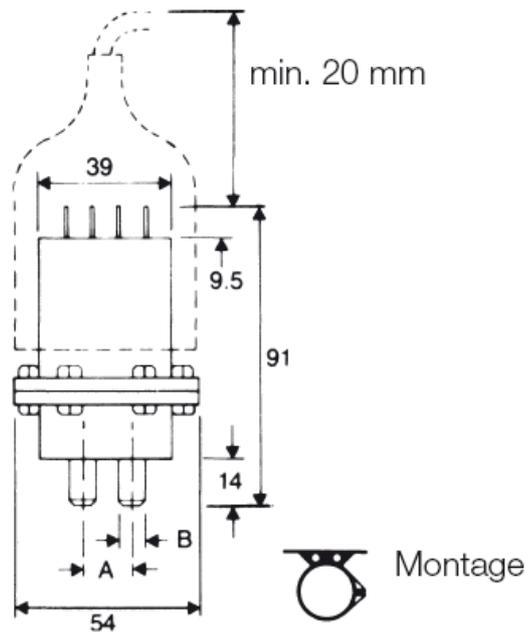
L'ouverture de la vanne est commandé par une tension DC comprise entre 0 et 10 V.



Servomoteur (5) pour vanne 3-voies ; Sauter, modèle AXM 117S F202

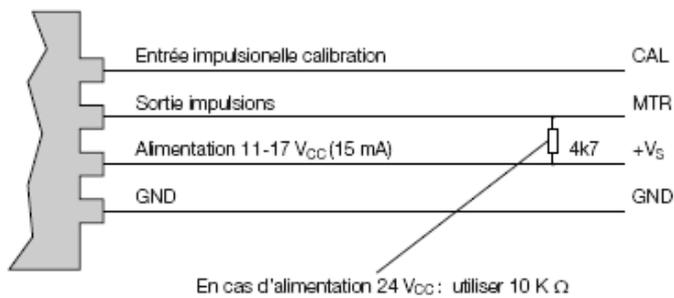


Compteur de débit de précision (1) ; Kobold, modèle PEL-L045-GN1-F



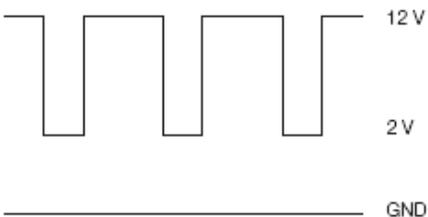
Raccordement électrique

Sortie impulsions standard



Tension d'alimentation - sortie impulsion

Avec 12 V_{CC} alimentation électrique



Boite à relais

La boite à relais est une option permettant de commander à distance différentes fonctions via le datalogger. Elle n'est pas requise en exploitation courante, mais permet de commander certains paramètres du banc d'essais, comme p.ex. l'opération de stores électriques ou encore une charge thermique situé à l'intérieur du calorimètre pour en caractériser son fonctionnement. Ce composant a été développé pour les besoins du projet.

Connexions RC1000 - carte à relais - multiprises

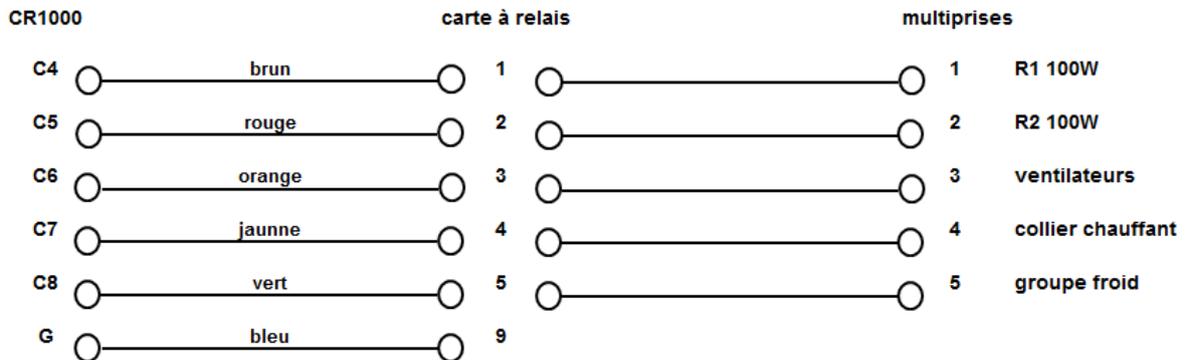
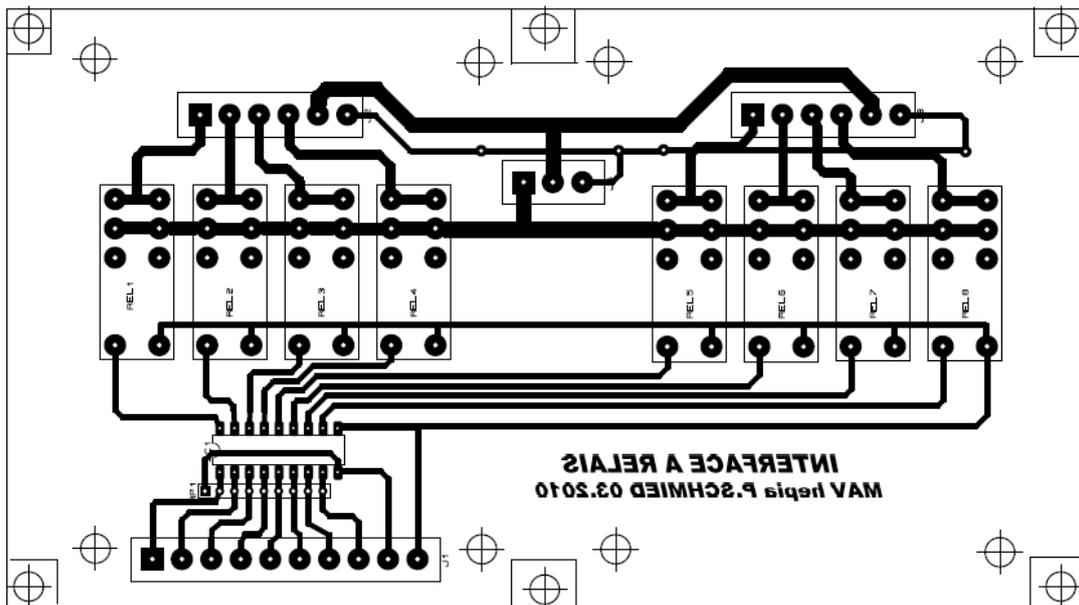
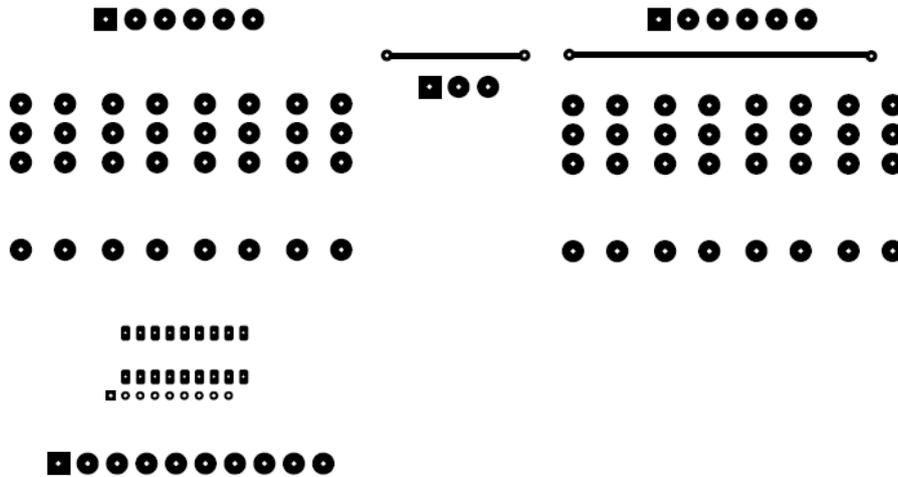


Schéma de connexion au datalogger (CR 1000)



Circuit imprimé, face dessous



Circuit imprimé face dessus

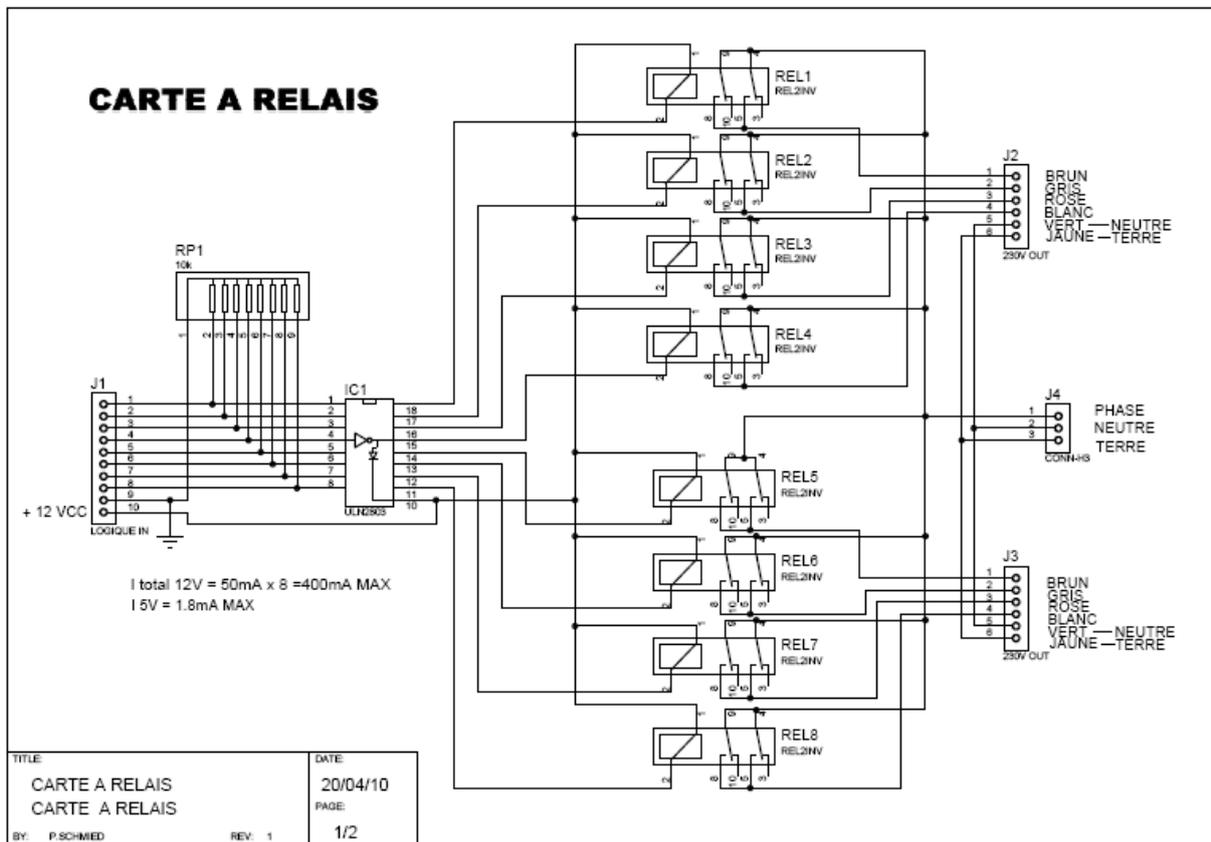
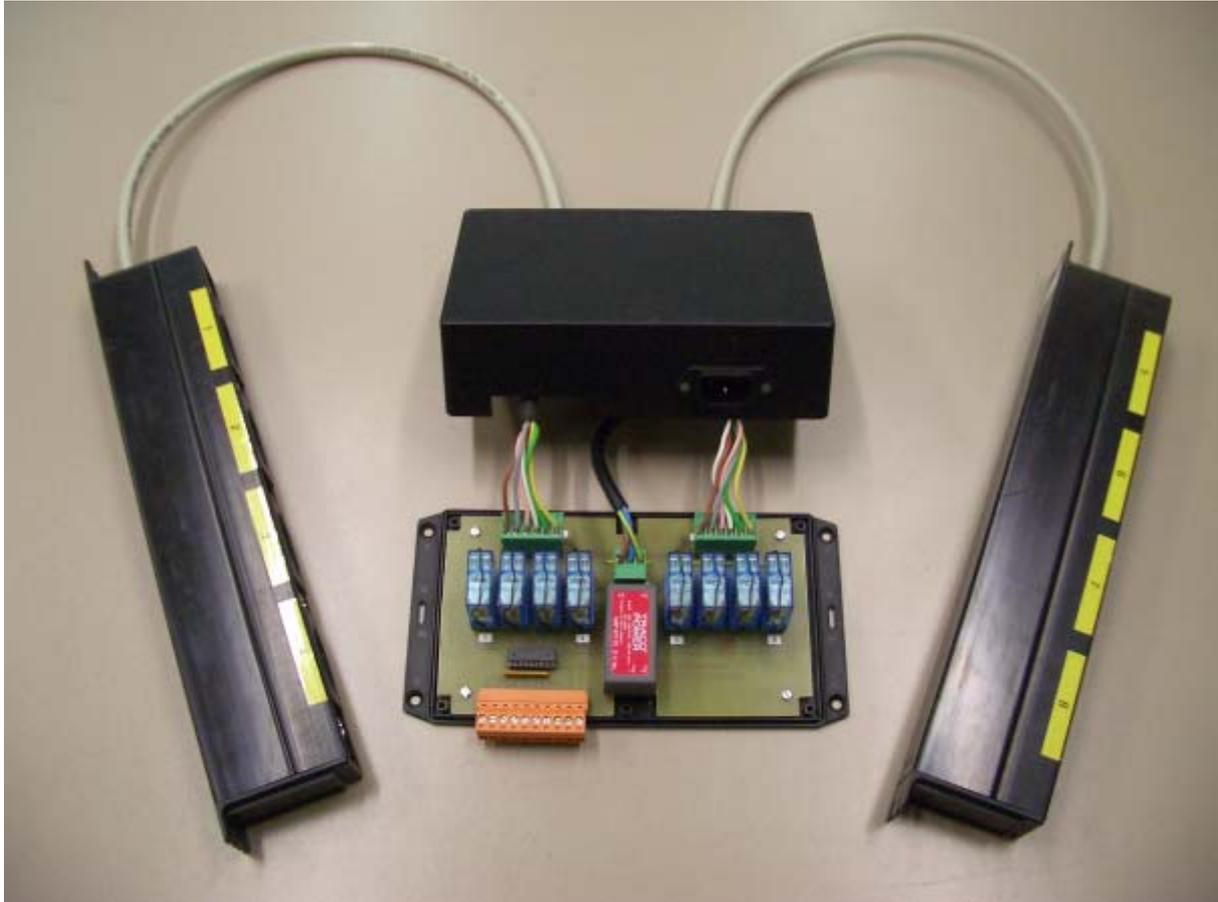


Schéma électrique

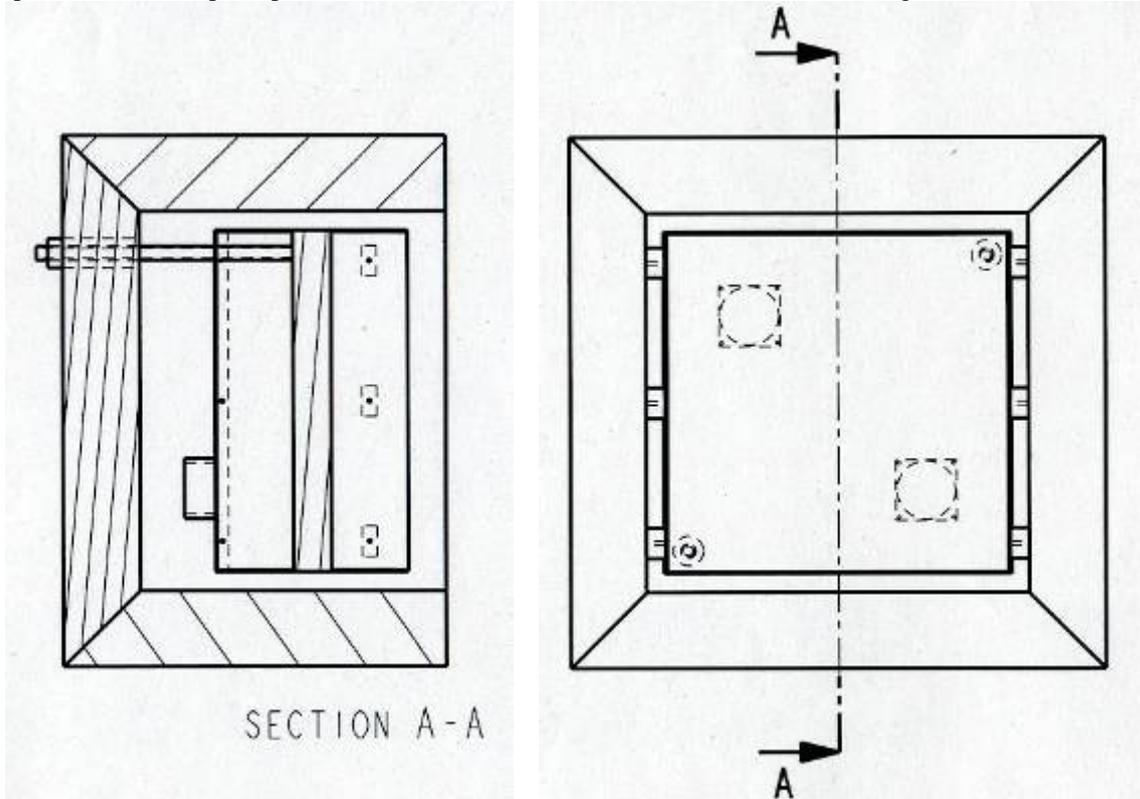


Circuit de commande (au milieu), entouré des 2 borniers 230V AC

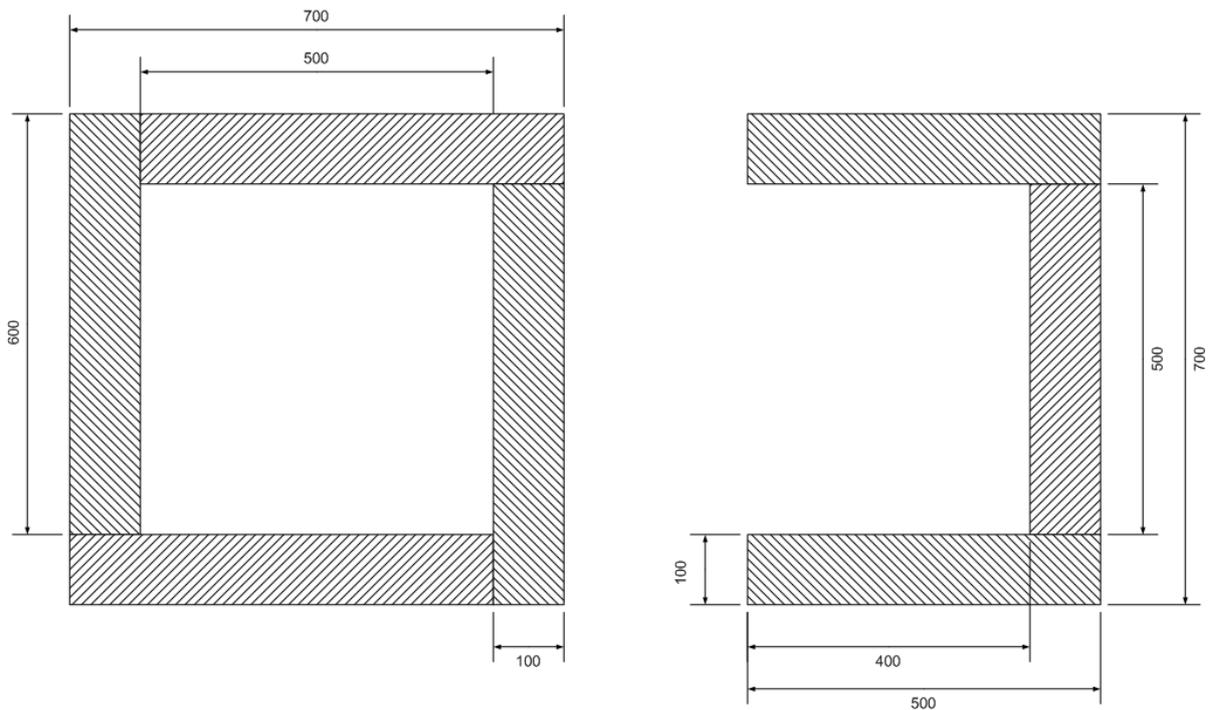
Caisson calorimétrique

Le caisson calorimétrique est fabriqué en mousse EPS de 10cm d'épaisseur autour d'un volume utile de 50x50x40 cm³. Après collage des blocs de mousse, les faces sont recouvertes d'une protection mécanique en matière synthétique grise, les angles protégés par des cornières métalliques.

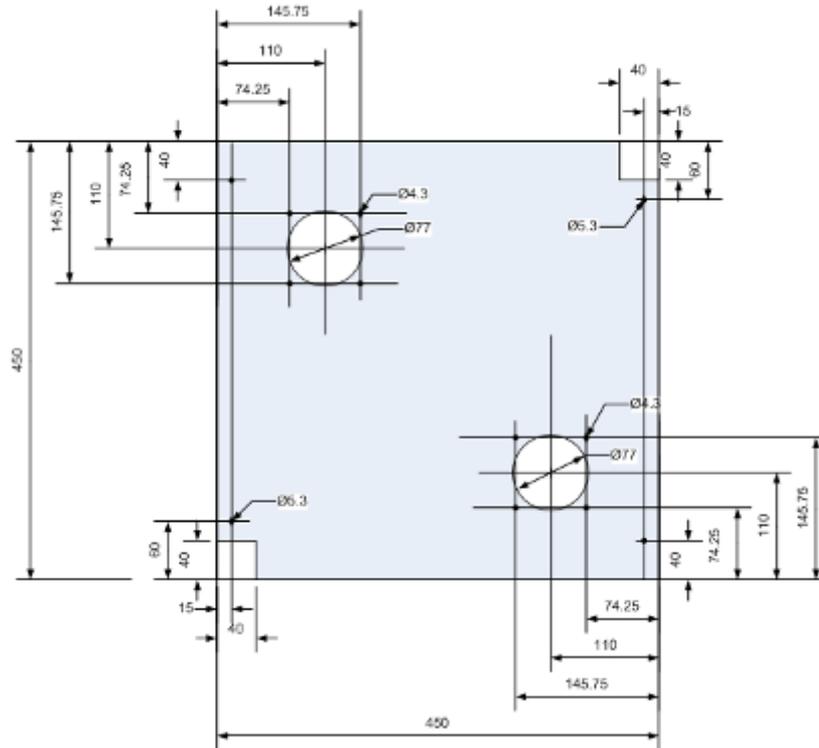
Coupe et élévation de principe du caisson avec le radiateur et les ventilateurs de brassage.



Découpe des blocs de mousse.

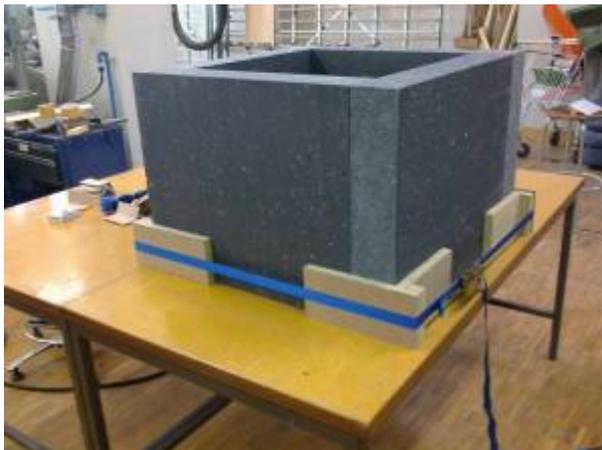


Le fond accueille un radiateur eau-air en inox fabriqué pour les besoins. Deux ventilateurs de type PC assurent un brassage de l'air. Une moquette claire sert de joint avec la fenêtre.



Les ventilateurs de brassage d'une puissance de 2x 1.5 W aspirent l'air au travers du radiateur. L'air est recirculé autour de celui-ci.

Clichés de la construction des caissons.



Préparation à l'assemblage et après collage
Matériau: EPS épaisseur 100mm, colle PU liquide

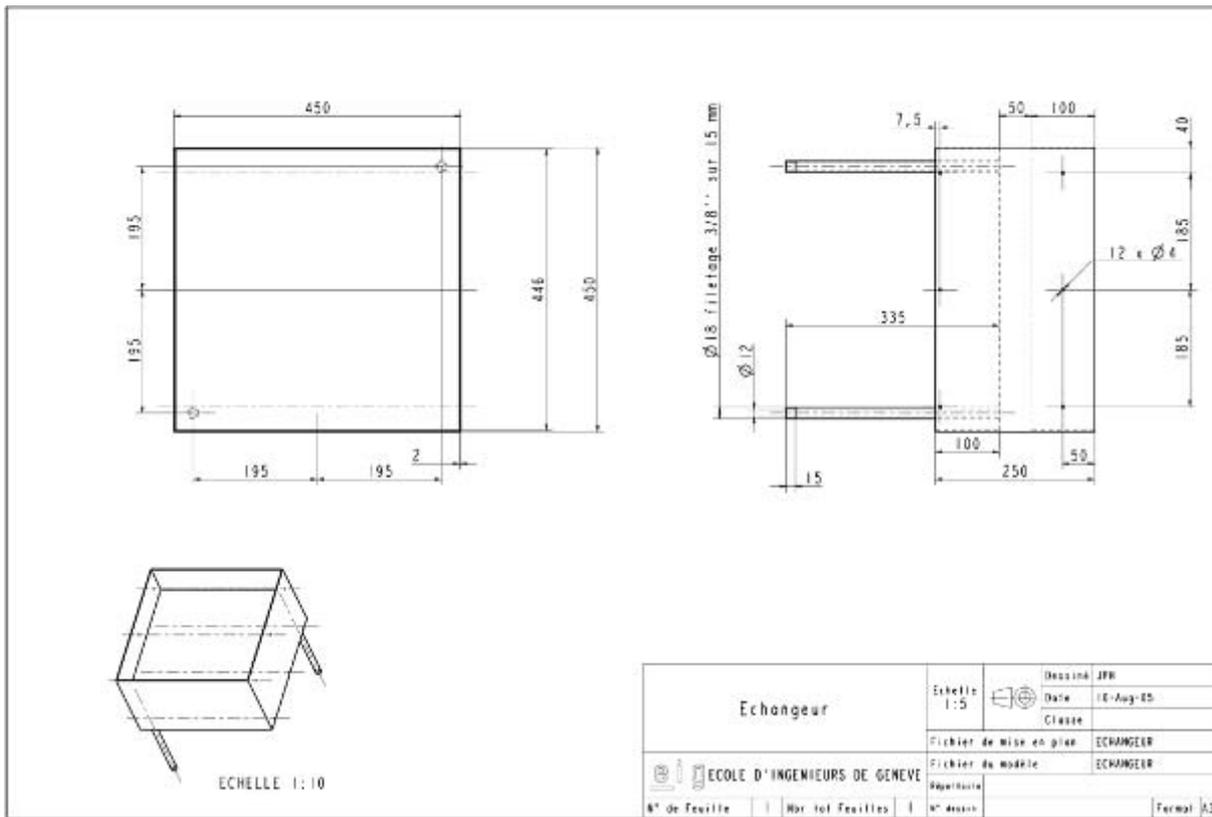


Habillage des caissons en atelier ,maison'

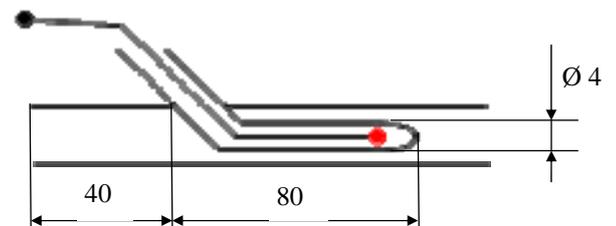
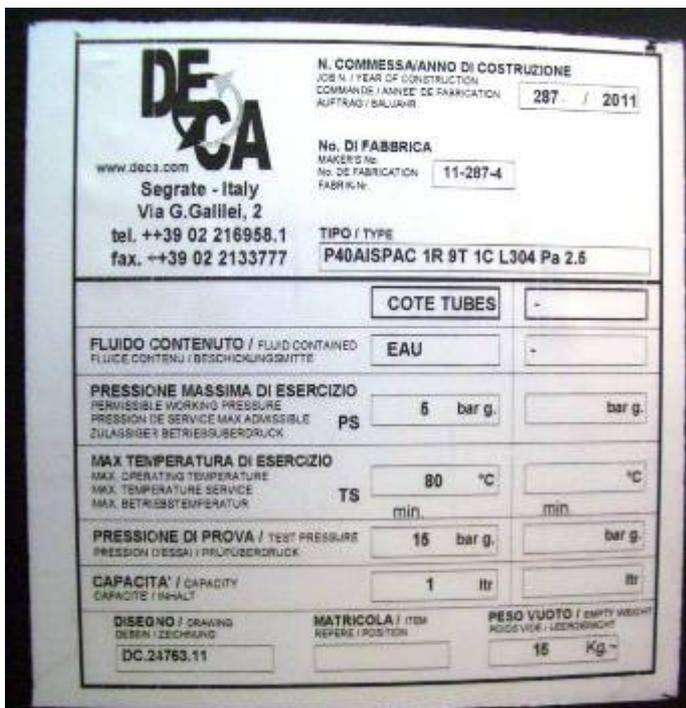


Caisson face avant et face arrière avant installation radiateur.

Radiateur, dessin d'encombrement



Le radiateur est fabriqué par la société DECA, spécialisée dans les radiateurs industriels en inox. A droite, détail des puits thermométriques (doigt de gant) pour insertion des thermocouples de mesures des températures 'aller' et 'retour' de l'eau de refroidissement. Leur emplacement doit être choisi de façon à se situer à cheval sur l'épaisseur de l'isolation. Photo : sortie du fil thermocouple du doigt de gant.



Puits thermométrique
(doigt de gant)

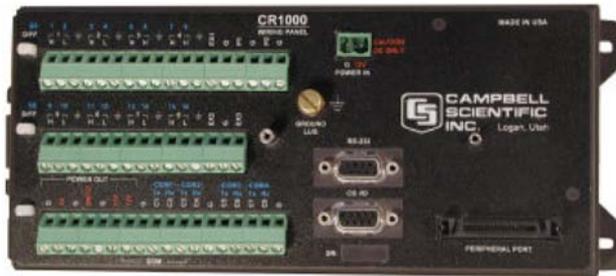


Plaquette constructeur.

Acquisition, datalogger, interfaces PID et IP

Le contrôle, l'acquisition et l'enregistrement de données est construit autour des produits Campbell Scientific.

Acquisiteur programmable



« La CR1000 est une centrale d'acquisition et de contrôle de données autonome pour la science, l'industrie et la recherche. Elle est alimentée par batterie (non incluse). Habituellement placée dans un coffret étanche avec une alimentation, la CR1000 acquiert les sorties d'un grand nombre de capteurs puis les numérise, les traite et sauvegarde les résultats. Les données peuvent être collectées directement sur site par un microordinateur ou par un moyen de télécommunication (téléphone ou radio). »

Convertisseur D/A pour le contrôle de l'électrovanne

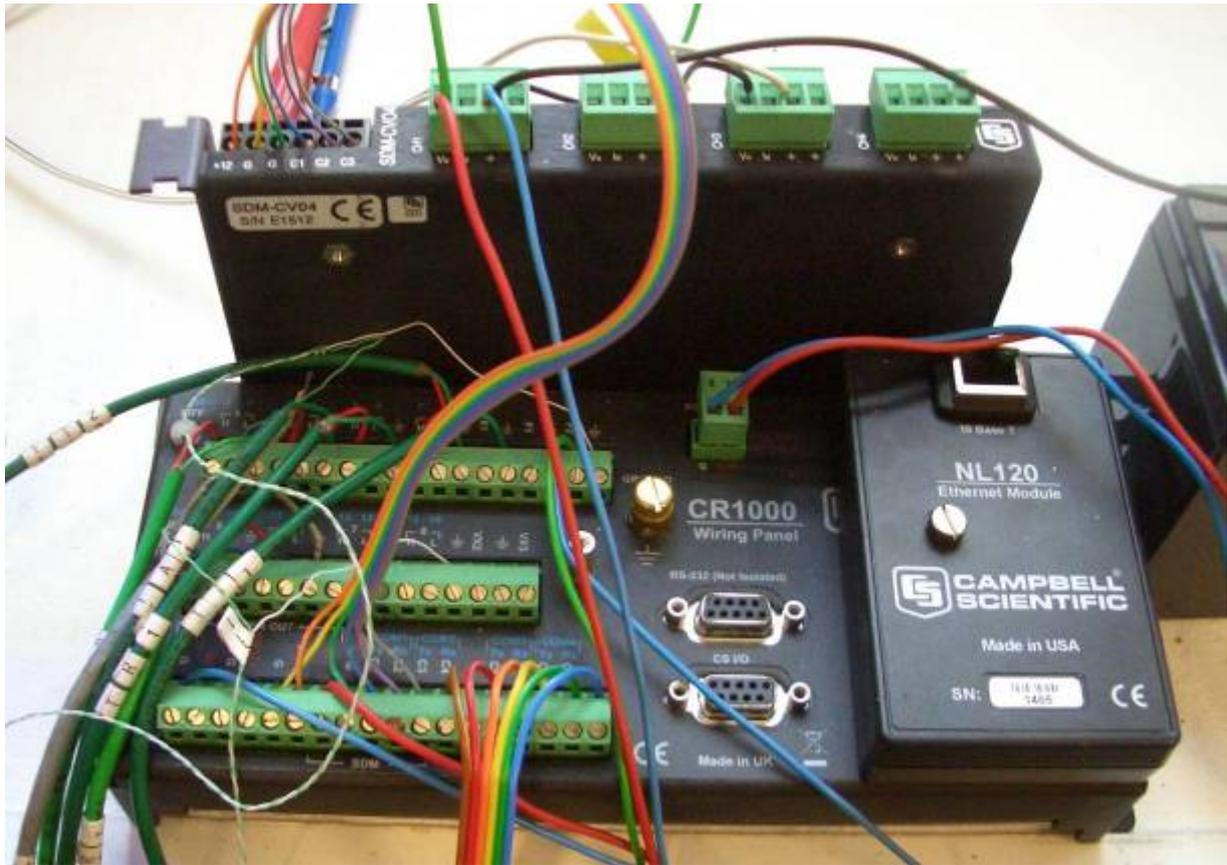


« Le module SDM-CV04 a 4 voies de sorties indépendantes ; il est prévu pour permettre à la centrale de fournir un courant ou une tension variable, sous le contrôle du programme de la centrale de mesure. La centrale de mesure peut être configurée soit en sortie tension 0 à 10 V CC ou en boucle de courant (0 à 20 mA). Les sorties courant peuvent être paramétrées et limitées de 4 à 20 mA. »

Interface IP



« L'interface NL120 permet aux centrales d'acquisition de mesure de communiquer à travers un réseau local ou sur Internet via le TCP/IP. En utilisant l'écran Connect du logiciel LoggerNet, vous pouvez directement, envoyer et rapatrier un programme ou télécharger les données. »



Connexions du datalogger avec le SDM-CV04 et la boîte à relais ; câbles colorés.

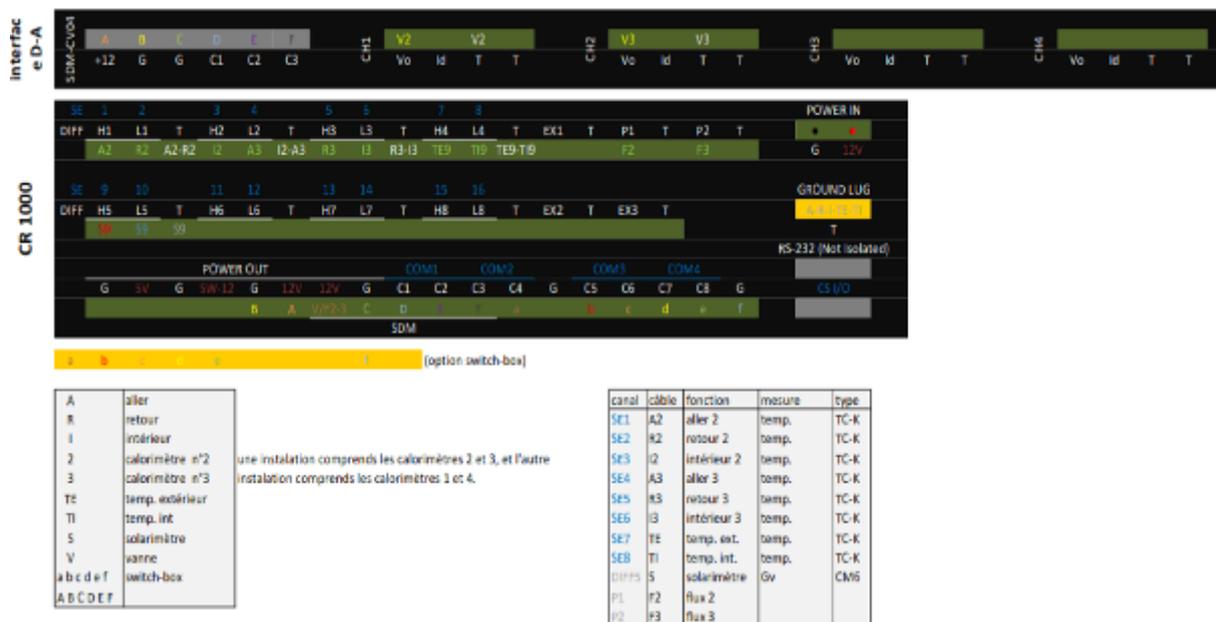


Schéma de câblage des capteurs sur le CR1000 et de l'interface SDM

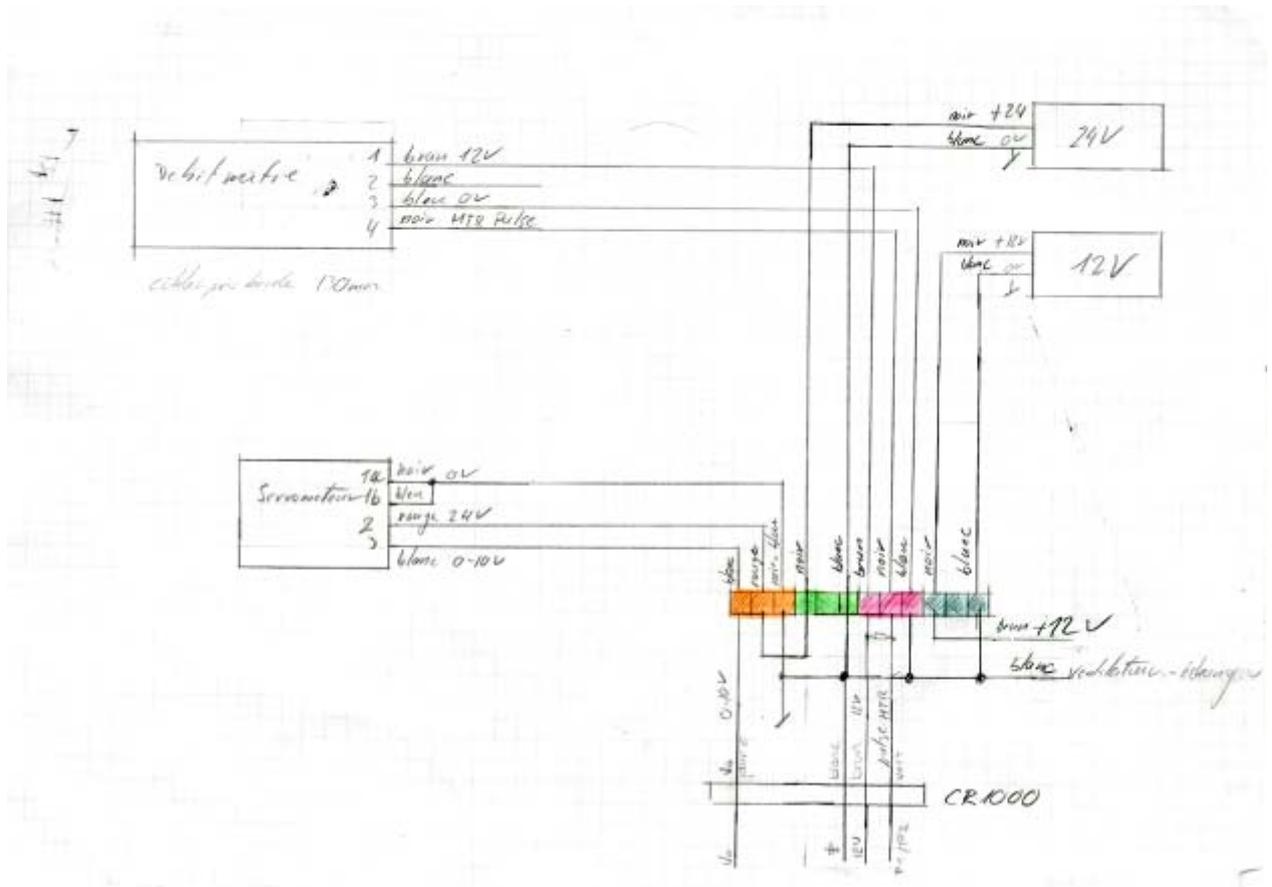
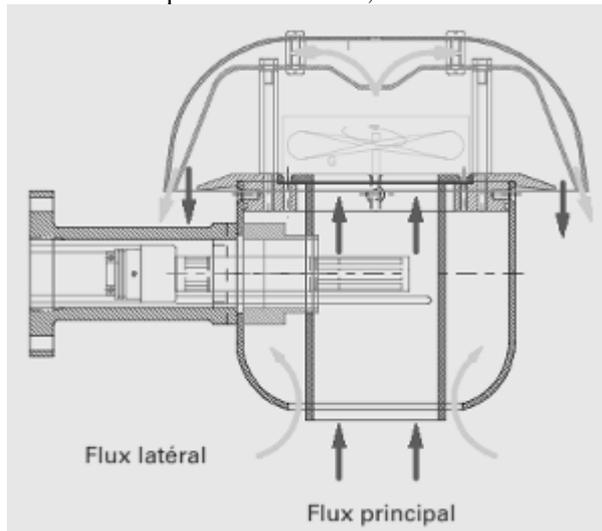


Schéma de câblage du dos hydraulique

Capteurs de climat extérieur

Mesure de température ambiante ; abri ventilé Rotronic équipé d'un thermocouple calibré type K



Mesure du rayonnement solaire sur le plan de la fenêtre ; pyranomètre K&Z CM11



Inventaire des composants

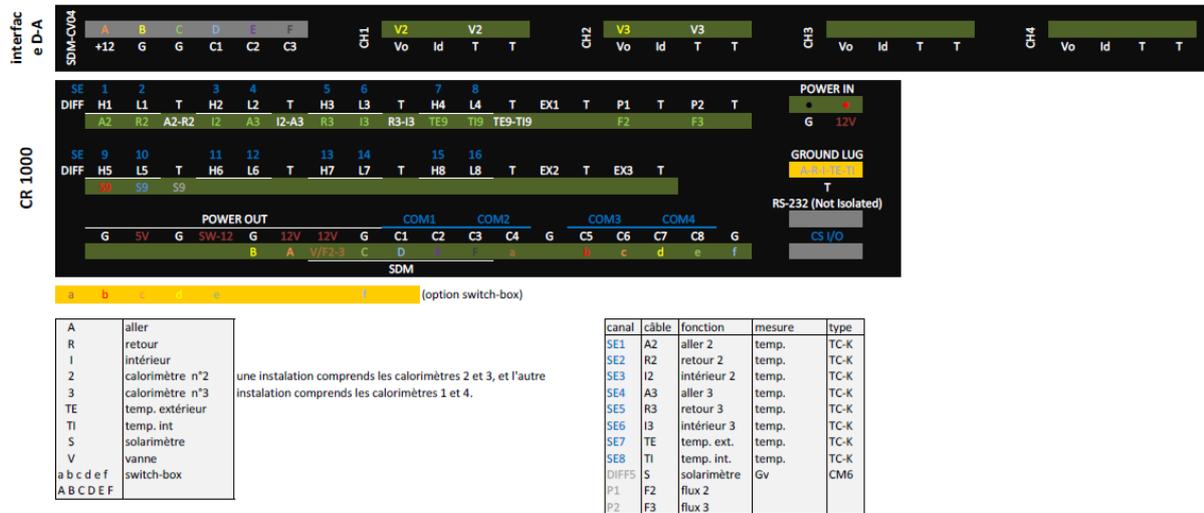
Le tableau suivant dresse une liste exhaustive des matériels entrant dans la construction d'un g-box avec deux calorimètres. Les prix sont en Frs indicatifs 2010.

Liste composant															
		Désignation		Quantité	en stock	à commander	Fournisseur	Référence	prix/pc HT	prix/total HT					
Groupe froid GF			refroidisseur eau glacée	1	x		Froid widmer	Riedel VKW170K	CHF 3'004.00	CHF 3'004.00					
	entrée	sortie	rallonge 1/2"	2	x		Débruner	550.960.200	CHF 13.30	CHF 26.60					
			contre-écrou	4	x		Débruner	548.210.120	CHF 6.00	CHF 24.00					
			raccord pour tuyaux 1/2" mâle laiton	2		x	Débruner	550.447.140	CHF 5.40	CHF 10.80					
			raccord pour tuyaux 1/2" mâle inox	2		x	Kholer	R-144 1/2-17	CHF 9.50	CHF 19.00					
			collier de serrage 18-25mm	2		x	Faldy		CHF 1.75	CHF 3.50					
			réduction 3/4"-1/2"	4		x	Débruner	552.155.120	CHF 9.95	CHF 39.80					
			raccord à clapet 3/4"	4		x	Débruner	552.135.100	CHF 30.20	CHF 120.80					
			poignée	2	x		Monacord	MZF-8312	CHF 2.80	CHF 5.60					
			tuyau Ø 16 - 23.5mm	x		x	Angst-Pfister	06.5326.1116							
	x	x	fil d'étanchéité	1		x	Débruner	760.106.100	CHF 20.00	CHF 20.00					
Tuyau de liaison GF - RT	x	x	raccord double	8		x	Débruner	552.145.100	CHF 13.20	CHF 105.60					
	x	x	raccord à clapet 3/4"	8		x	Débruner	552.135.100	CHF 30.20	CHF 241.60					
			raccord à clapet 3/4" pour raccord hexagonale à tuyaux 3/4"	8		x	Débruner	552.140.120	CHF 9.15	CHF 73.20					
			raccord hexagonale à tuyaux 3/4"	8		x	Kholer	R-145 3/4" -16mm	CHF 12.50	CHF 100.00					
	x	x	raccord pour tuyaux 3/4" mâle	8		x	Débruner	552.146.110	CHF 6.35	CHF 50.80					
	x	x	collier de serrage 18-25mm	4		x	Faldy		CHF 1.75	CHF 7.00					
			tuyau Ø 16 - 23.5mm	x		x	Angst-Pfister	06.5326.1116							
Réservoir tampon RT			raccord à clapet 3/4"	12	x		Sas Dujardin		CHF 3'400.00	CHF 3'400.00					
	x	x	console murale	1		x	Débruner	552.135.100	CHF 30.20	CHF 362.40					
			vase d'expansion 8 litres pneumatex	2		x	Débruner	912.180.080	CHF 67.00	CHF 134.00					
			vis de rappel	2		x	Débruner	548.221.160	CHF 95.00	CHF 190.00					
			réduction en laiton 3/4" -1/2"	2		x	Débruner	548.150.160	CHF 42.24	CHF 84.48					
	x		raccord mâle-femelle 3/4"	2		x	Kholer	R-134-U-3/4"	CHF 3.90	CHF 7.80					
	x		bonnet (bouchon) hexagonal 1"	1		x	Kholer	R-231-1"	CHF 35.10	CHF 35.10					
			bonnet (bouchon) hexagonal 3/4"	7		x	Kholer	R-231-3/4"	CHF 18.00	CHF 126.00					
			mamelon à souder 3/4" L=50mm	6		x	Kholer	R-208 R=3/4" L=50mm	CHF 12.00	CHF 72.00					
			mamelon à souder 3/4" L=40mm	1		x	Kholer	R-208 R=3/4" L=40mm	CHF 5.00	CHF 5.00					
			roue 125mm	2		x	Kaiser-Kraft	604 345	CHF 4.00	CHF 8.00					
			roue pivotante avec blocage 80mm	1		x	Kaiser-Kraft	604 335	CHF 15.00	CHF 15.00					
Tuyau de liaison RT - RE			raccord double	8		x	Débruner	552.145.100	CHF 13.20	CHF 105.60					
			raccord à clapet 3/4"	8		x	Débruner	552.135.100	CHF 30.20	CHF 241.60					
			raccord à clapet 3/4" pour raccord hexagonale à tuyaux 3/4"	16		x	Débruner	552.140.120	CHF 9.15	CHF 146.40					
			raccord hexagonale à tuyaux 3/4"	16		x	Kholer	R-145 3/4" -16mm	CHF 12.50	CHF 200.00					
			raccord pour tuyaux 3/4" mâle	8		x	Débruner	552.146.110	CHF 6.35	CHF 50.80					
Régulation RE			vanne 3 voies	3		x	Sauter	BUL 010 F430	CHF 51.00	CHF 153.00					
	x	x	raccord	12		x	Sauter	378 133 010	CHF 3.00	CHF 36.00					
			servomoteur	3		x	Sauter	AXM 117S F202	CHF 200.00	CHF 600.00					
			alimentation 24V servomoteur	4		x	Distrelec	92.06.79	CHF 42.00	CHF 168.00					
			connecteur femelle 2.1- 5.5mm	4		x	Distrelec	118700	CHF 3.35	CHF 13.40					
			barrette à broches	4		x	Distrelec	142737	CHF 11.95	CHF 47.80					
			reglette à douille coudée	12		x	Distrelec	140936	CHF 2.25	CHF 27.00					
			reglette à douille droite1	12		x	Distrelec	142321	CHF 2.80	CHF 33.60					
			reglette à douille droite2	12		x	Distrelec	142328	CHF 2.80	CHF 33.60					
			rail DIN	1		x	Distrelec	303239	CHF 7.00	CHF 7.00					
			circulateur	3		x	Débruner	550.789.101	CHF 228.00	CHF 684.00					
			vanne by-pass	3		x	Débruner	550.177.105	CHF 43.80	CHF 131.40					
			débitmètre à turbine	3		x	Kobold	PEL-L045-GN1-F	CHF 950.00	CHF 2850.00					
			alimentation 12V	4		x	Distrelec	92.06.76	CHF 42.00	CHF 168.00					
			connecteur femelle 2.5 - 5.5mm	4		x	Distrelec	118701	CHF 3.35	CHF 13.40					
	x	x	raccord pour tuyaux 1/2" mâle laiton	12		x	Débruner	550.447.140	CHF 5.40	CHF 64.80					
	x	x	raccord en y	8		x	Semadani	0387	CHF 2.85	CHF 22.80					
	x	x	raccord réducteur	8		x	Semadani	0625	CHF 4.45	CHF 35.60					
			collier de serrage 18-25mm	54		x	Faldy		CHF 1.75	CHF 94.50					
	x	x	collier de serrage 9.5-10.5mm	20		x	Angst-Pfister	06.5045.8010	CHF 8.00	CHF 160.00					
			tuyau Ø 16 - 23.5mm	40		x	Angst-Pfister	06.5326.1116	CHF 5.60	CHF 224.00					
			tuyau Ø 8 - 15mm	10		x	Angst-Pfister	06.5338.4008	CHF 3.80	CHF 38.00					
Tuyau de liaison RE - ECH		x	raccord pour tuyaux 3/4" mâle	16		x	Débruner	552.146.110	CHF 6.35	CHF 101.60					
		x	collier de serrage 18-25mm	8		x	Faldy		CHF 1.75	CHF 14.00					
		x	raccord à clapet 3/4"	8		x	Débruner	552.135.100	CHF 30.20	CHF 241.60					
		x	raccord double	8		x	Débruner	552.145.100	CHF 13.20	CHF 105.60					
Echangeur ECH				4		x	Coli		CHF 1'680.00	CHF 6'720.00					
		x	raccord à clapet 3/4"	8		x	Débruner	552.135.100	CHF 30.20	CHF 241.60					
		x	réduction 3/4"-1/2"	8		x	Débruner	552.155.120	CHF 9.95	CHF 79.60					
			raccord pour tuyaux 3/4 16mm" mâle inox	8		x	Kholer	R-144 3/4" 16mm	CHF 12.50	CHF 100.00					
			raccord à visser 3/4"	8		x	Kholer	R-511 3/4"	CHF 32.40	CHF 259.20					
			manchon filetage traversant 3/4" x 80mm	8		x	Kholer	R-402 3/4" 80mm	CHF 12.30	CHF 98.40					
			mamelon hexagonal 3/4" mâle-mâle	8		x	Kholer	R-207 3/4"	CHF 14.20	CHF 113.60					
			ventilateur 12V palier lise	8		x	Distrelec	39.09.65	CHF 21.50	CHF 172.00					
			plaque polypropylène 4mm 1000x2000	1		x	Poliplast		CHF 96.00	CHF 96.00					
			alimentation 12V	4		x	Distrelec	92.06.76	CHF 42.00	CHF 168.00					
Caisson			cornière extérieure 30mm	1		x	Monacord	MZF-8001	CHF 89.00	CHF 89.00					
			coin à bouille pm	16		x	Monacord	MZF-8509	CHF 0.90	CHF 14.40					
			poignée	8		x	Monacord	MZF-8312	CHF 2.80	CHF 22.40					
			renfort d'angle	16		x	Monacord	MZF-8508	CHF 0.30	CHF 4.80					
			rivet	3		x	Monacord	MZF-9611	CHF 6.80	CHF 20.40					
			plaque polypropylène 2mm 1500x3000	3		x	Poliplast		CHF 216.00	CHF 648.00					
			plaque polypropylène 2mm 2000x1000	1		x	Poliplast		CHF 96.00	CHF 96.00					
			plaque lambda roof 980x980x100mm	20		x	Swissport			CHF 507.00					
			colle Balco	12kg		x	Jerome	80 290		CHF 236.00					
			colle Kleiberit	2kg		x	Jerome	509	CHF 34.00	CHF 34.00					
			colle Sikaflex-11FC	2		x	Débruner	798.806.120		CHF 218.00					
			ruban adhésif double-face 3mx50mm	7		x	Doit Migros	6630.306	CHF 6.90	CHF 48.30					
			moquette blanche	4m2		x	Lachenal			CHF 218.00					
			tube carré alu 30x30x3 6500mm	2		x	Metallica	100414							
			toile perforée 2000x1000mm	3		x	Metallica	120705	CHF 168.00	CHF 504.00					
			thermocouple 25m	1		x	TC Direct	818-432	CHF 95.00	CHF 95.00					
			module CR1000 avec bornier	1		x	Campbell	10300	CHF 1'740.00	CHF 1'740.00					
			module ethernet NL120	1		x	Campbell	10691	CHF 265.00	CHF 265.00					
			module 4 sorties SDM-CVO4	1		x	Campbell	9660	CHF 902.00	CHF 902.00					

Annexe C

Acquisition des mesures Branchements du CR1000 et calibration des senseurs de température et des débitmètres

Schéma de branchement des sondes sur le CR 1000



Mesures:

- A1, A2, A3, A4 température de l'eau "aller" à l'entrée de l'échangeur de chaleur du calorimètre (box) n° 1, 2, 3 ou 4.
- R1, R2, R3, R4 température de l'eau "retour" à la sortie de l'échangeur de chaleur du calorimètre (box) n° 1, 2, 3 ou 4.
- I1, I2, I3, I4 température de l'air intérieur au calorimètre (box) n° 1, 2, 3 ou 4.
- TE température de l'air extérieur.
- TI température de l'air (intérieur) de la pièce.
- S ensoleillement dans le plan d'ouverture du calorimètre (box).
- F1, F2, F3, F4 compteur d'impulsions pour le débit d'eau traversant le calorimètre (box) 1, 2, 3 ou 4.

Températures

Les mesures de température sont faites par des thermocouples de type K (chromel / alumel).

g-box de l'ISAAC (composé par les box 2 et 3)

T_A2_calibré [°C]	=	0.9925	x	T_A2_mesuré [°C]	+ 0.1260
T_R2_calibré [°C]	=	0.9937	x	T_R2_mesuré [°C]	+ 0.1185
T_I2_calibré [°C]	=	0.9982	x	T_I2_mesuré [°C]	- 0.0111
T_A3_calibré [°C]	=	0.9914	x	T_A3_mesuré [°C]	+ 0.1901
T_R3_calibré [°C]	=	0.9992	x	T_R3_mesuré [°C]	- 0.0050
T_I3_calibré [°C]	=	0.9950	x	T_I3_mesuré [°C]	+ 0.1172

g-box du LEEA (composé par les box 1 et 4)

T_A1_calibré [°C]	=	0.9977	x	T_A1_mesuré [°C]	- 0.0052
T_R1_calibré [°C]	=	0.9901	x	T_R1_mesuré [°C]	+ 0.1973
T_I1_calibré [°C]	=	0.9981	x	T_I1_mesuré [°C]	- 0.0077
T_A4_calibré [°C]	=	0.9934	x	T_A4_mesuré [°C]	+ 0.1697
T_R4_calibré [°C]	=	0.9990	x	T_R4_mesuré [°C]	+ 0.0105
T_I4_calibré [°C]	=	0.9917	x	T_I4_mesuré [°C]	+ 0.2028

Ensoleillements

Les mesures d'ensoleillement sont faites par des solarimètres Kipp&Zonen.

g-box de l'ISAAC (solarimètre K&Z CM11 : $5.009 \mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$ - PYR20 - no serie 038171)

Gn [W/m^2]	=	199.64	x	S_mesuré [mV]
------------------------------	---	--------	---	---------------

g-box du LEEA (solarimètre K&Z CM6B : $9.41 \mu\text{V}/(\text{Wm}^{-2})$)

Gn [W/m^2]	=	106.27	x	S_mesuré [mV]
------------------------------	---	--------	---	---------------

Débitmètres

Les mesures de débit sont faites par des débitmètres à turbine KOBOLD, modèle PEL – L045 GN1 – F.

g-box de l'ISAAC, box 2 (KOBOLD PEL-L045GN1F, n° de série 45/211860)

Débit_box2_calibré [litre/min]	=	0.0147	x	F2/ Δt [1/sec]	- 0.0132
--------------------------------	---	--------	---	------------------------	----------

g-box de l'ISAAC, box 3 (KOBOLD PEL-L045GN1F, n° de série 45/211861)

Débit_box3_calibré [litre/min]	=	0.0146	x	F3/ Δt [1/sec]	- 0.0207
--------------------------------	---	--------	---	------------------------	----------

Δt : intervalle de temps entre deux lectures des canaux, fixé à 2 [s]

g-box du LEEA, box 1 (KOBOLD PEL-L045GN1F, n° de série 45/211862)

Débit_box1_calibré [litre/min]	=	0.0145	x	F1/ Δt [1/sec]	- 0.0146
--------------------------------	---	--------	---	------------------------	----------

g-box de l'ISAAC, box 4 (KOBOLD PEL-L045GN1F, n° de série 45/210573)

Débit_box4_calibré [litre/min]	=	0.0145	x	F4/ Δt [1/sec]	- 0.0137
--------------------------------	---	--------	---	------------------------	----------

Δt : intervalle de temps entre deux lectures des canaux, fixé à 2 [s]

Grandeurs enregistrées

Les grandeurs suivantes sont enregistrées chaque minutes dans l'ordre indiqué ci-dessous. Elles sont écrites sur 1 ligne dans un fichier ASCII et sont séparées par le caractère « , ».

TIMESTAMP	date et heure de l'enregistrement [dd.mm.yyyy hh:mm]
RECORD	numéro de ligne assigné aux mesures au temps TIMESTAMP
batt_volt_Avg	voltage de la tension d'alimentation du datalogger [V]
Tref_Avg	température moyenne de référence du datalogger [°C]
Te_Avg	température moyenne de l'air extérieur [°C]
Tp_Avg	température moyenne de l'air de la pièce [°C]
Ta_box1_Avg	température moyenne « aller » de l'eau à l'entrée de l'échangeur du box 1 (g-box ISAAC : box 2 et g-box LEEA : box 1) [°C]
Ta_box2_Avg	température moyenne « aller » de l'eau à l'entrée de l'échangeur du box 2 (g-box ISAAC : box 3 et g-box LEEA : box 4) [°C]
Tr_box1_Avg	température moyenne « retour » de l'eau à la sortie de l'échangeur du box 1 (g-box ISAAC : box 2 et g-box LEEA : box 1) [°C]
Tr_box2_Avg	température moyenne « retour » de l'eau à la sortie de l'échangeur du box 2 (g-box ISAAC : box 3 et g-box LEEA : box 4) [°C]
Ti_box1_Avg	température moyenne de l'air à l'intérieur du box 1 (g-box ISAAC : box 2 et g-box LEEA : box 1) [°C]
Ti_box2_Avg	température moyenne de l'air à l'intérieur du box 2 (g-box ISAAC : box 3 et g-box LEEA : box 4) [°C]
Gn_Avg	ensoleillement moyen dans le plan d'ouverture des box [W/m^2]
Flow_box1_Avg	débit moyen traversant l'échangeur du box 1 (g-box ISAAC : box 2 et g-box LEEA : box 1) [litre/min]
Flow_box2_Avg	débit moyen traversant l'échangeur du box 2 (g-box ISAAC : box 3 et g-box LEEA : box 4) [litre/min]
Ctrl_Avg(1)	signal de contrôle pour fixer l'état d'ouverture de la vanne trois voies du box 1 (g-box ISAAC : box 2 et g-box LEEA : box 1) [-]
Ctrl_Avg(2)	signal de contrôle pour fixer l'état d'ouverture de la vanne trois voies du box 2 (g-box ISAAC : box 3 et g-box LEEA : box 4) [-]
Ti_consigne_Avg	température de consigne pour la température intérieure des box, calculée comme étant la moyenne glissante de la température de la pièce Tp sur 30 minutes [°C]

Annexe D

Mesures et analyses

Classe A204 - SUPSI - Trevano

Vitrage mesuré :

Triple vitrage

Thermovit Selekt: Silverstar Selekt – triple vitrage avec gas

Coefficient g 0.38 [-]

Valeur U 0.50 [W/m²]

Protection solaire

Store vénitien à lamelles inclinables

Placé à l'extérieur

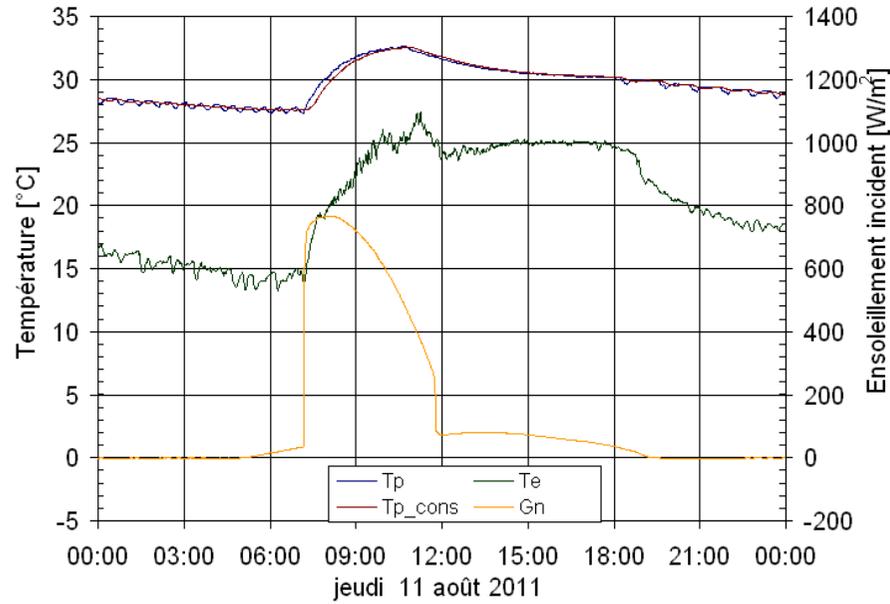
Mesures

Les deux box ont mesuré le même vitrage avec trois positions de store:

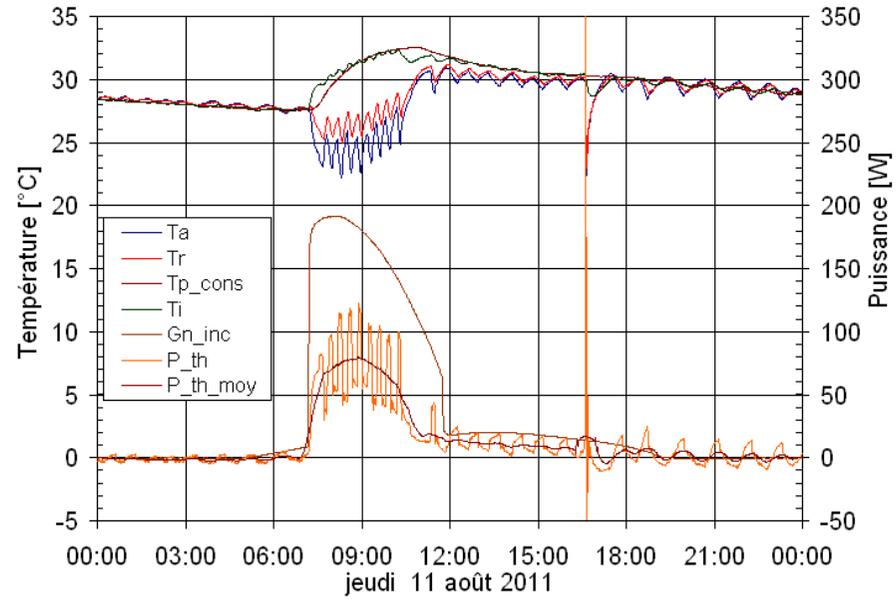
- store levé le vitrage est mesuré sans protection solaire;
- horizontal le store est baissé devant le vitrage avec inclinaison des lamelles à l'horizontale
- 45° le store est baissé devant le vitrage avec inclinaison des lamelles à 45°

Date	Qualité jour ou mesures	Evaluation	Box 1	Box 2
10.08.2011	Très bon jour	1	store levé	store levé
11.08.2011	Très bon jour	1	store levé	store levé
12.08.2011	Mesures médiocres	-1	store levé	store levé
13.08.2011	Très bon jour	1	store levé	store levé
14.08.2011	Très bon jour	1	store levé	store levé
15.08.2011	Mauvais jour	X	store levé	store levé
16.08.2011	Jour moyen	0	store levé	store levé
17.08.2011	Jour médiocre	-1	horizontal	store levé
18.08.2011	Jour médiocre	-1	horizontal	store levé
19.08.2011	Très bon jour	1	horizontal	store levé
20.08.2011	Très bon jour	1	horizontal	store levé
21.08.2011	Très bon jour	1	horizontal	store levé
22.08.2011	Très bon jour	1	horizontal	store levé
23.08.2011	Très bon jour	1	45°	store levé
24.08.2011	Très bon jour	1	45°	store levé
25.08.2011	Très bon jour	1	45°	store levé
26.08.2011	Jour moyen	0	45°	store levé
27.08.2011	Mauvais jour	X	horizontal	horizontal
28.08.2011	Très bon jour	1	horizontal	horizontal
29.08.2011	Jour moyen	0	horizontal	horizontal
30.08.2011	Jour moyen	0	horizontal	horizontal

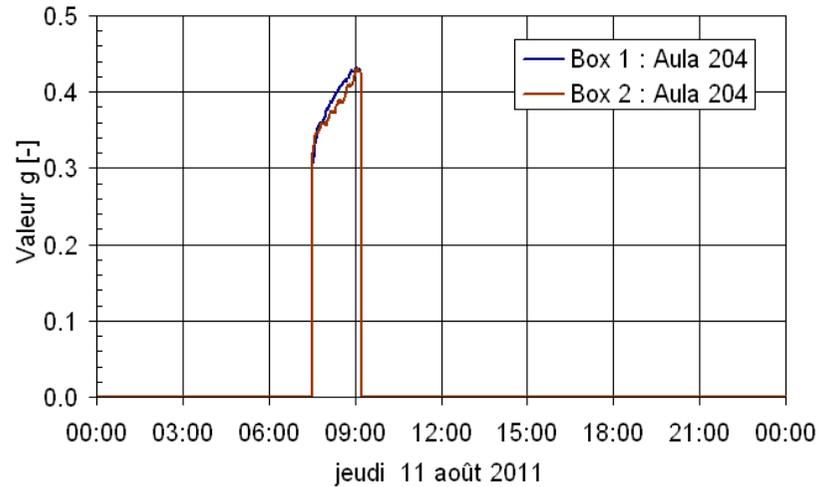
Mesures météo et température ambiante



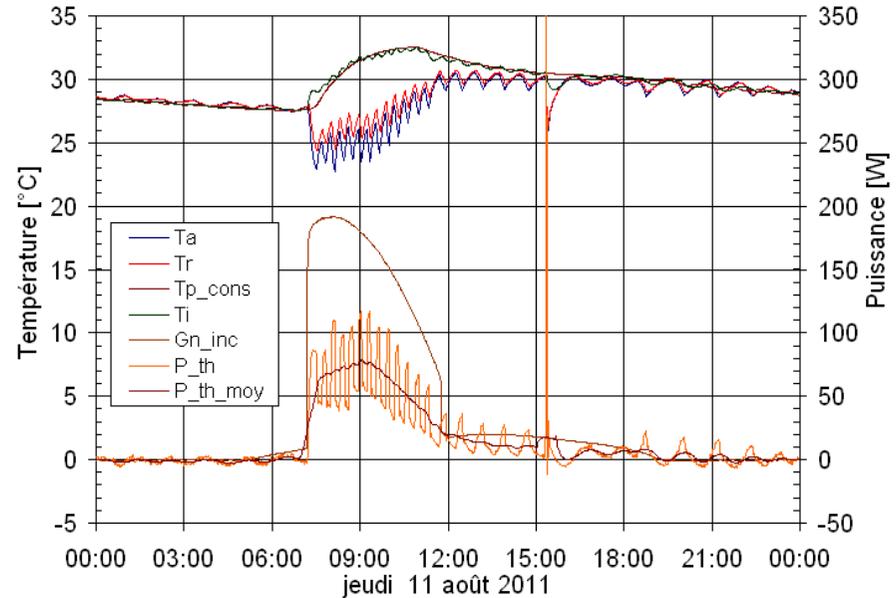
Box 1 - mesures



Box 1 et 2 - valeur g



Box 2 - mesures



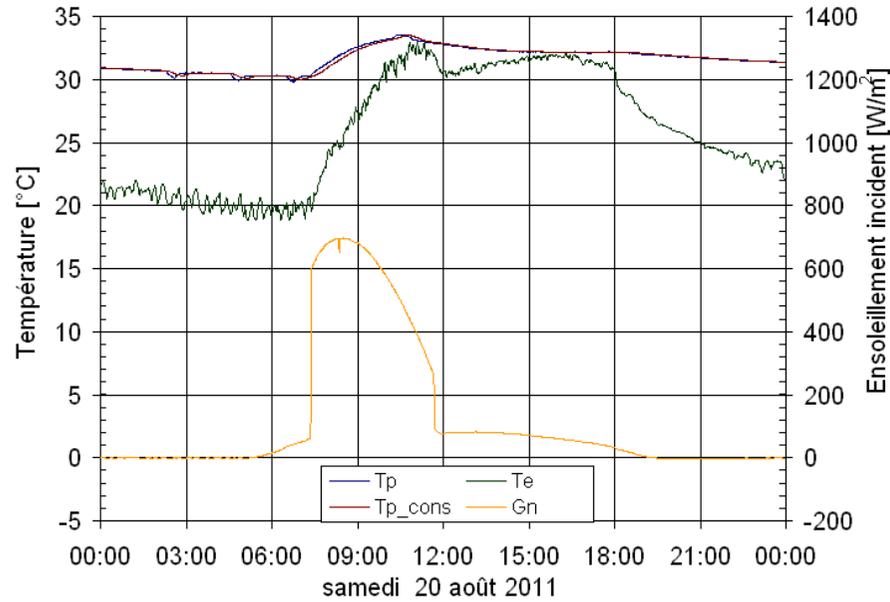
Valeur journalière mesurée		Valeur donnée	Paramètres d'évaluations:	
g-moyen-Box1	0.39 +/-0.03	0.38	Valeurs moyennes:	40 [min]
g-moyen-Box2	0.38 +/-0.04	0.38	Gn minimum:	200 [W/m2]
			Angle d'incidence maximum:	50 [°]

Te: température de l'air extérieur
 Ti: température de l'air à l'intérieur d'un box
 Tp: température de l'air de la pièce
 Tp_cons: température de consigne pour l'air dans un box

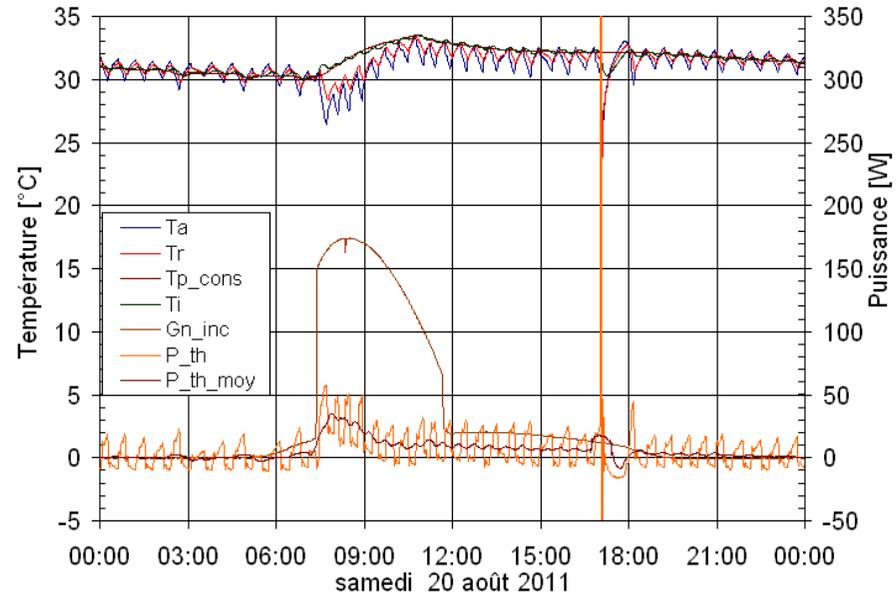
Ta: température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box
 Tr: température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box
 Gn: rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box
 Gn_inc: puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un box

P_th: puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un box
 P_th_moy: valeur moyenne de la puissance thermique transférée

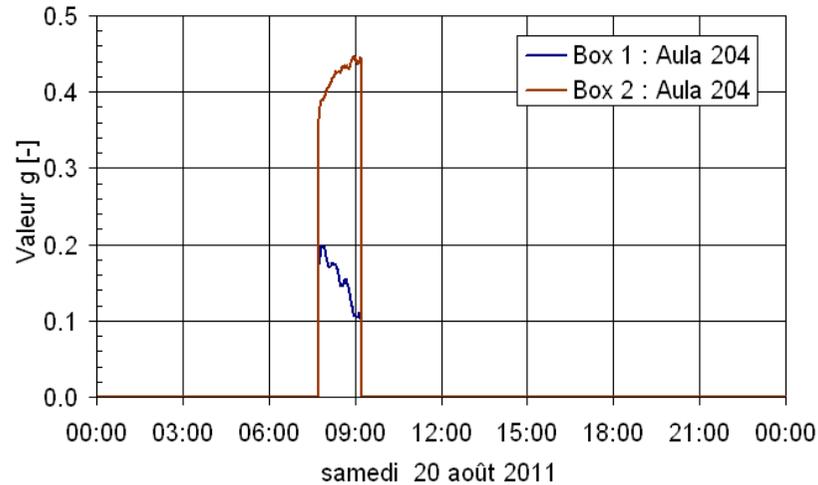
Mesures météo et température ambiante



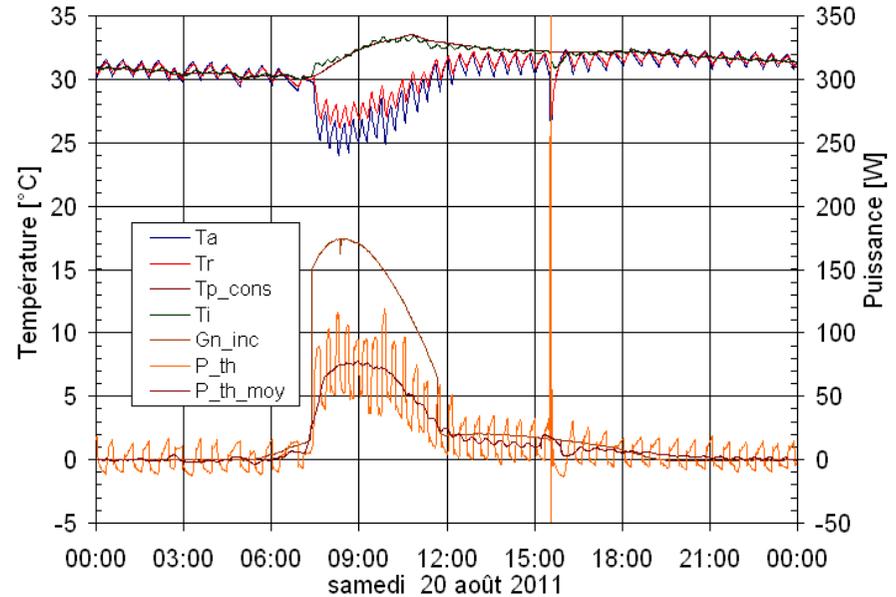
Box 1 - mesures



Box 1 et 2 - valeur g



Box 2 - mesures



Valeur journalière mesurée		Valeur donnée	Paramètres d'évaluations:	
g-moyen-Box1	0.15 +/-0.02	0.38	Valeurs moyennes:	40 [min]
g-moyen-Box2	0.42 +/-0.04	0.38	Gn minimum:	200 [W/m2]
			Angle d'incidence maximum:	50 [°]

Te: température de l'air extérieur

Ti: température de l'air à l'intérieur d'un box

Tp: température de l'air de la pièce

Tp_cons: température de consigne pour l'air dans un box

Ta: température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box

Tr: température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box

Gn: rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box

Gn_inc: puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un box

P_th: puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un box

P_th_moy: valeur moyenne de la puissance thermique transférée

Annexe E

Mesures et analyses Tetto BIPV - SUPSI - Trevano

Vitrages mesurés :

Module BIPV 2	Module BIPV 3	Module BIPV 4
Oerlikon, type micromorfo	Schott, type a-Si/a-Si	Oerlikon, type a-Si trasp
Coefficient g 0.153 [-]	Coefficient g 0.120 [-]	Coefficient g 0.184 [-]
Valeur U 1.2 [W/m ²]	Valeur U 1.1 [W/m ²]	Valeur U 1.2 [W/m ²]

Pour des raisons évidentes, les modules BIPV sont mesurés sans protection solaire.

Mesures

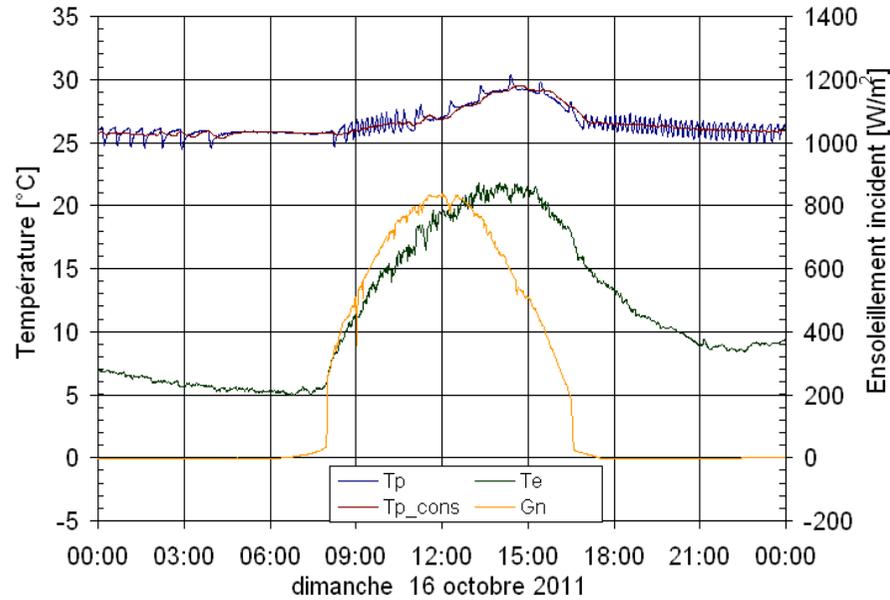
Seuls les très bons jours et les jours moyens sont montrés

Date	Qualité jour ou mesures	Evaluation	Box 1	Box 2
12.10.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
13.10.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
15.10.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 4	Module BIPV 3
16.10.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
17.10.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 4	Module BIPV 3
18.10.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
20.10.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
21.10.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
09.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
10.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
12.11.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 4	Module BIPV 3
13.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
14.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
15.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
16.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
17.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
18.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
20.11.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 4	Module BIPV 3
22.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
23.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
24.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
25.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
26.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
27.11.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 4	Module BIPV 3
28.11.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 4	Module BIPV 3
29.11.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 4	Module BIPV 3
05.12.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
07.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
08.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
10.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2

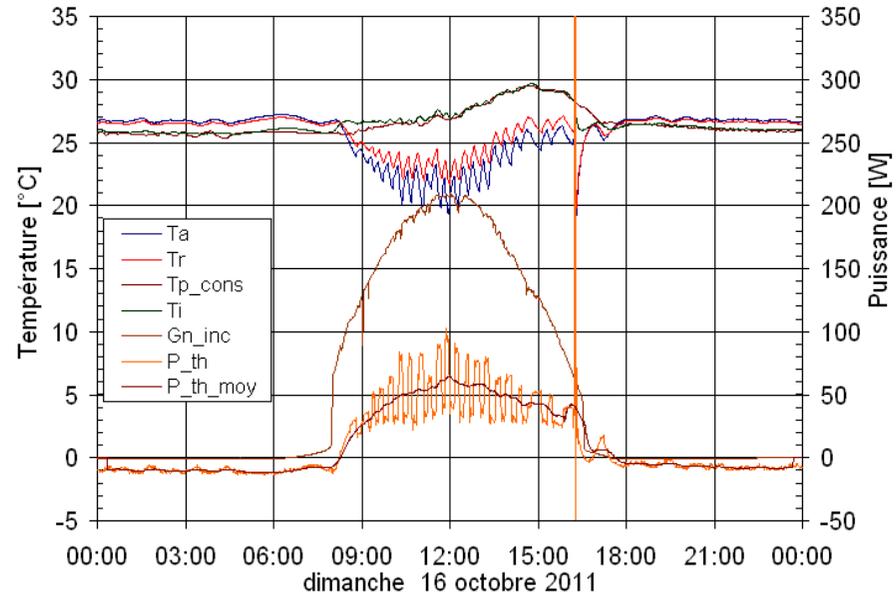
Date	Qualité jour ou mesures	Evaluation	Box 1	Box 2
17.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
22.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
23.12.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
24.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
25.12.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
26.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
27.12.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
28.12.2011	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
29.12.2011	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
03.01.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
07.01.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
08.01.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
09.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
10.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
11.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
12.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
13.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
14.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
15.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
16.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
18.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
21.01.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
24.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
25.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
26.01.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
15.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
16.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
17.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
18.02.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
21.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
22.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
24.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
25.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
26.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
27.02.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
28.02.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
01.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
02.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
03.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2

Date	Qualité jour ou mesures	Evaluation	Box 1	Box 2
07.03.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
08.03.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
09.03.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
10.03.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
11.03.2012	Jour moyen	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2
13.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
14.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
15.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
16.03.2012	Jour moyen	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
26.03.2012	Jour moyen	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
27.03.2012	Jour moyen	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
28.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
29.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
30.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
31.03.2012	Très bon jour	1	Module BIPV 3	Module BIPV 2
01.04.2012	Très bon jour	0	Module BIPV 3	Module BIPV 2

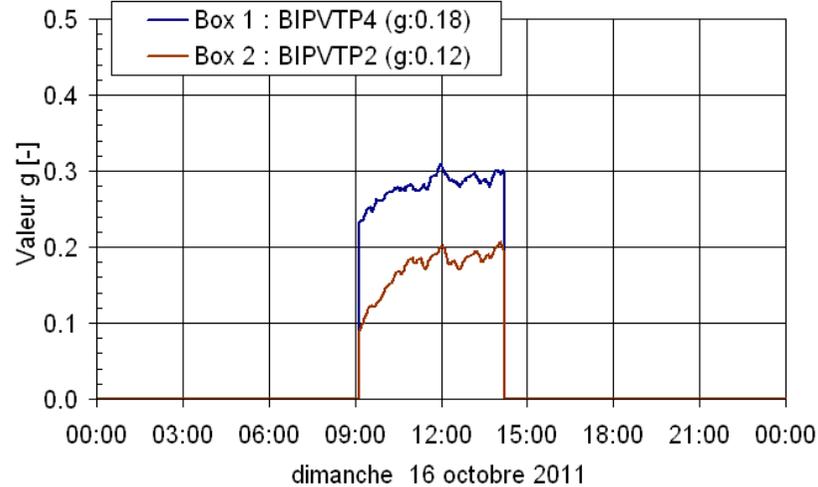
Mesures météo et température ambiante



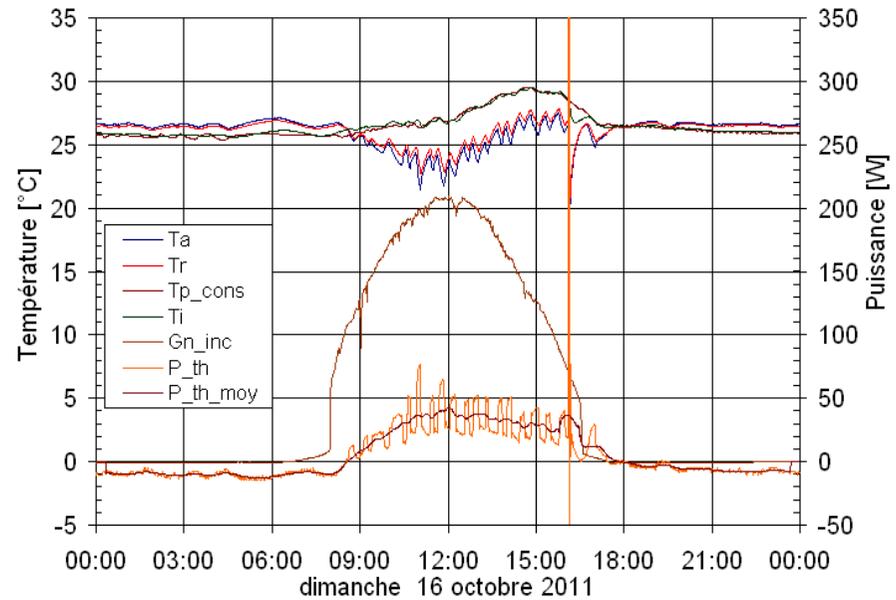
Box 1 - mesures



Box 1 et 2 - valeur g



Box 2 - mesures



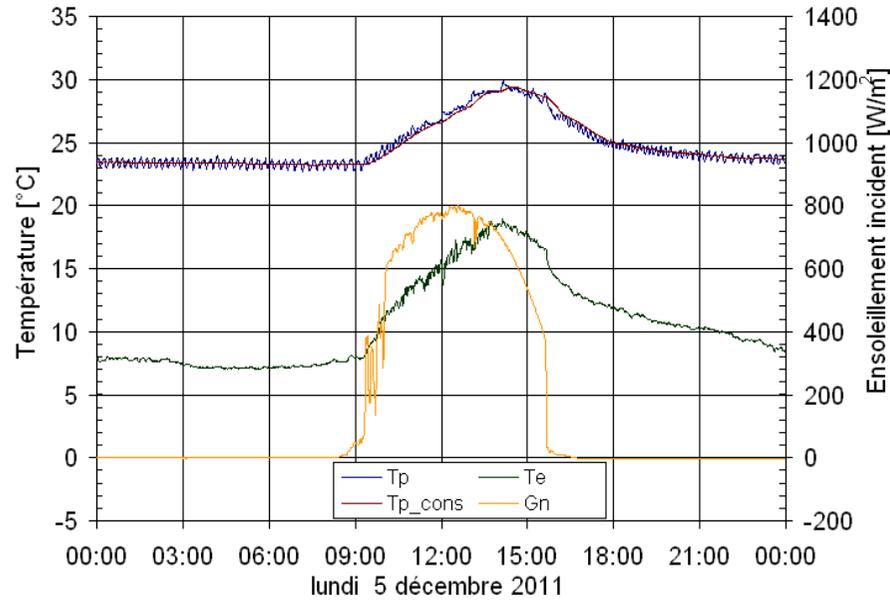
Valeur journalière mesurée		Valeur donnée	Paramètres d'évaluations:	
g-moyen-Box1	0.28 +/-0.03	0.184	Valeurs moyennes:	40 [min]
g-moyen-Box2	0.17 +/-0.04	0.120	Gn minimum:	200 [W/m2]
			Angle d'incidence maximum:	50 [°]

Te: température de l'air extérieur
 Ti: température de l'air à l'intérieur d'un box
 Tp: température de l'air de la pièce
 Tp_cons: température de consigne pour l'air dans un box

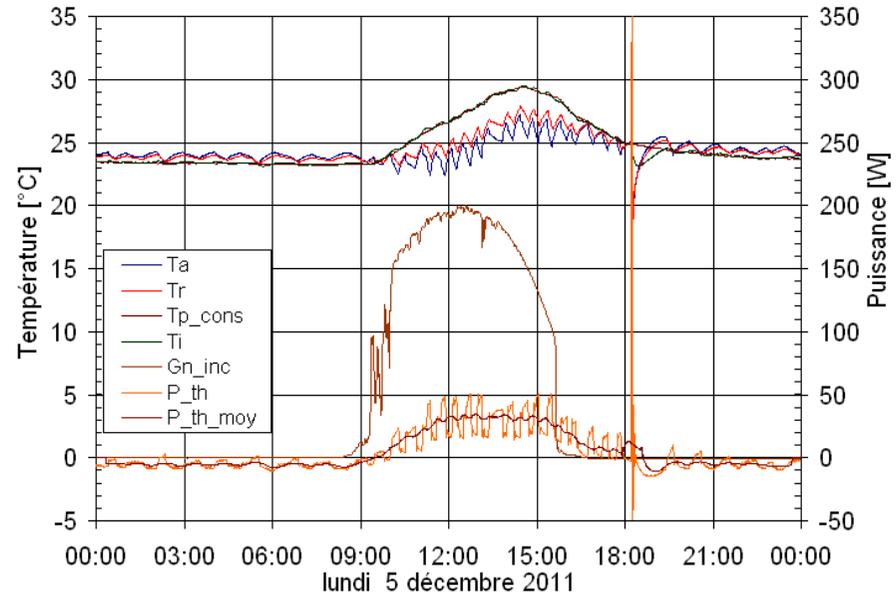
Ta: température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box
 Tr: température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box
 Gn: rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box
 Gn_inc: puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un box

P_th: puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un box
 P_th_moy: valeur moyenne de la puissance thermique transférée

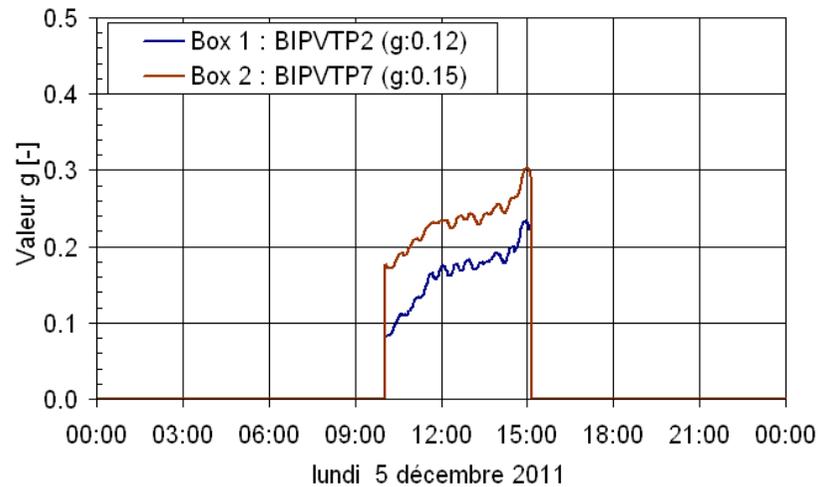
Mesures météo et température ambiante



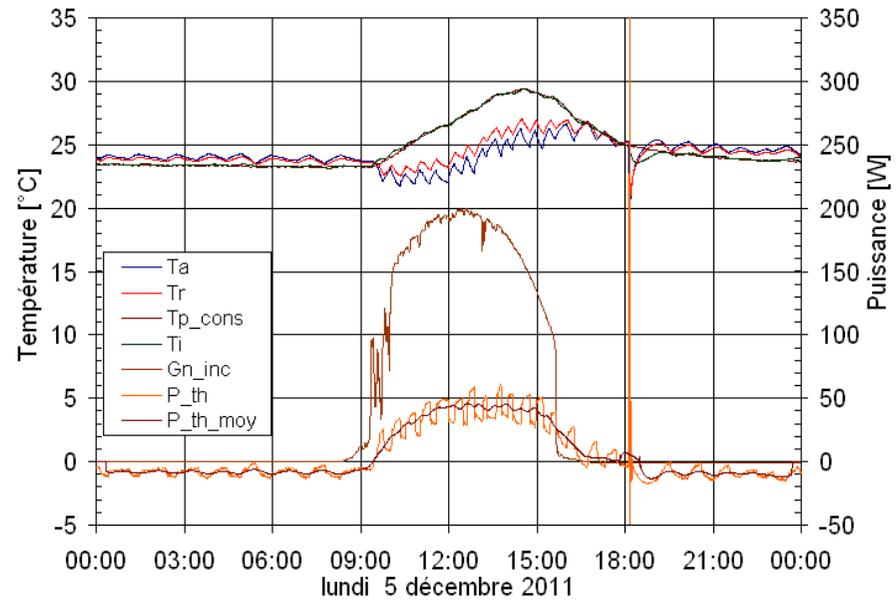
Box 1 - mesures



Box 1 et 2 - valeur g



Box 2 - mesures



Valeur journalière mesurée		Valeur donnée	Paramètres d'évaluations:	
g-moyen-Box1	0.16 +/-0.03	0.120	Valeurs moyennes:	40 [min]
g-moyen-Box2	0.23 +/-0.03	0.153	Gn minimum:	200 [W/m2]
			Angle d'incidence maximum:	50 [°]

Te: température de l'air extérieur

Ti: température de l'air à l'intérieur d'un box

Tp: température de l'air de la pièce

Tp_cons: température de consigne pour l'air dans un box

Ta: température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box

Tr: température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box

Gn: rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box

Gn_inc: puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un box

P_th: puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un box

P_th_moy: valeur moyenne de la puissance thermique transférée

Annexe F

Mesures et analyses Bâtiment A - HEPIA - Genève

Vitrage mesuré :

Double vitrage

Double vitrage des années 80 - 90

Caractéristiques pas connues

Coefficient g 0.6 – 0.75 [-]

Valeur U ca. 1.6 [W/m²]

Protection solaire

Store vénitien à lamelles inclinables

Placé à l'extérieur

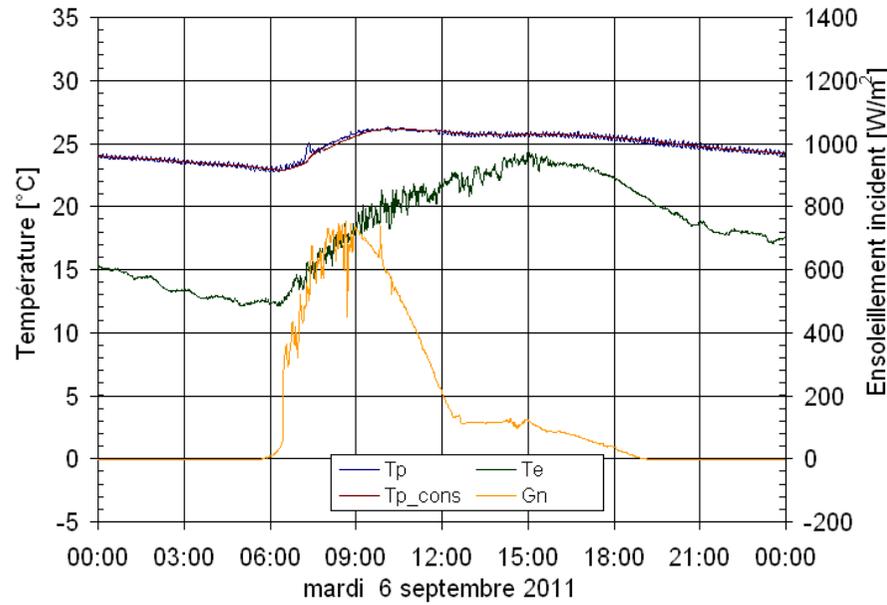
Mesures

Les deux box ont mesuré le même vitrage avec trois positions de store:

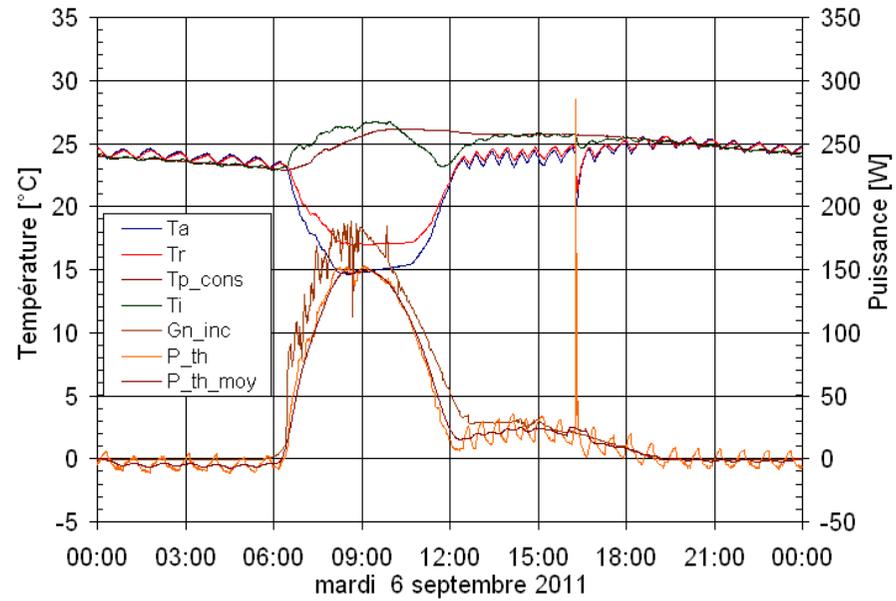
- store levé le vitrage est mesuré sans protection solaire;
- horizontal le store est baissé devant le vitrage avec inclinaison des lamelles à l'horizontale
- 45° le store est baissé devant le vitrage avec inclinaison des lamelles à 45°

Date	Qualité jour ou mesures	Evaluation	Box 1	Box 2
06.09.2011	Très bon jour	1	store levé	store levé
09.09.2011	Très bon jour	1	store levé	store levé
10.09.2011	Très bon jour	1	store levé	store levé
11.09.2011	Jour moyen	0	store levé	store levé
12.09.2011	Jour moyen	0	store levé	store levé
15.09.2011	Jour moyen	0	horizontal	45°
16.09.2011	Très bon jour	1	horizontal	45°

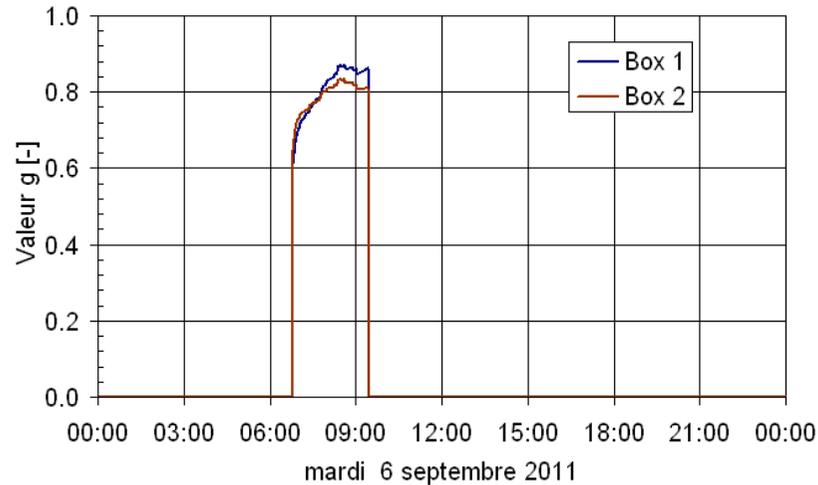
Mesures météo et température ambiante



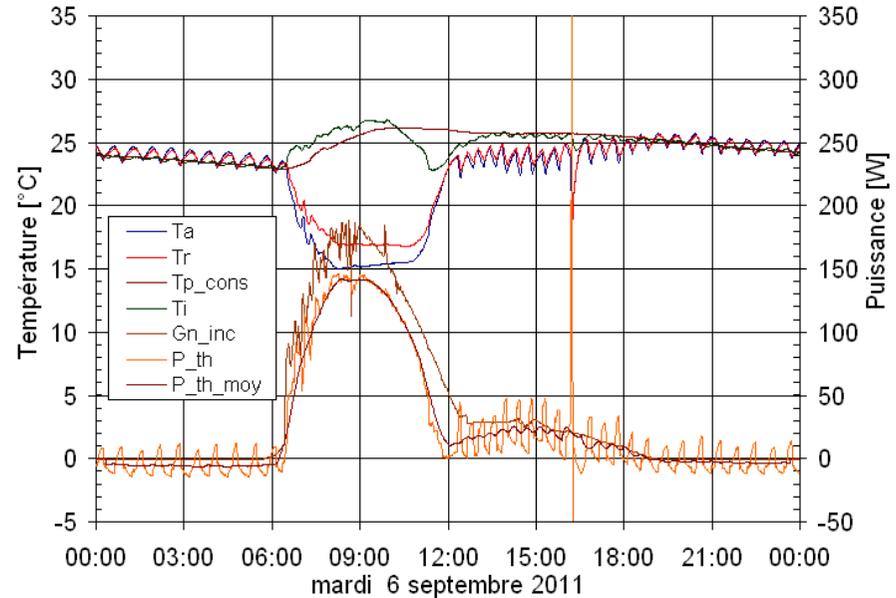
Box 1 - mesures



Box 1 et 2 - valeur g



Box 2 - mesures



Valeur journalière mesurée		Valeur donnée	Paramètres d'évaluations:	
g-moyen-Box1	0.82 +/-0.06	0.6	Valeurs moyennes:	40 [min]
g-moyen-Box2	0.80 +/-0.07	0.6	Gn minimum:	200 [W/m2]
			Angle d'incidence maximum:	50 [°]

Te: température de l'air extérieur
 Ti: température de l'air à l'intérieur d'un box
 Tp: température de l'air de la pièce
 Tp_cons: température de consigne pour l'air dans un box

Ta: température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box
 Tr: température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box
 Gn: rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box
 Gn_inc: puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un box

P_th: puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un box
 P_th_moy: valeur moyenne de la puissance thermique transférée

Annexe G

Mesures et analyses Bâtiment B - HEPIA - Genève

Vitrage mesuré :

Double vitrage

Double vitrage des années 80 - 90

Caractéristiques pas connues

Coefficient g 0.6 – 0.75 [-]

Valeur U ca. 1.6 [W/m²]

Protection solaire

Store vénitien à lamelles inclinables

Placé à l'extérieur

Mesures

Les deux box ont mesuré le même vitrage avec trois positions de store:

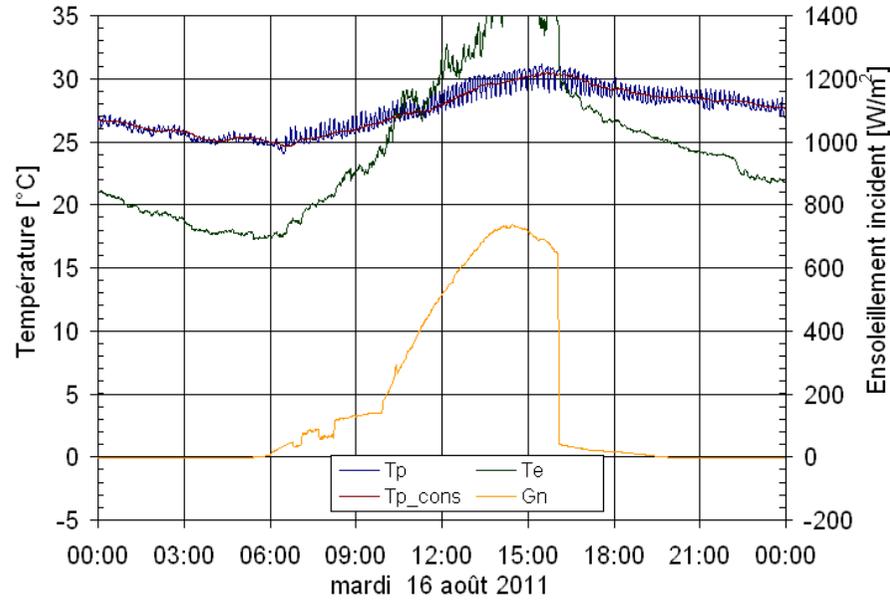
store levé le vitrage est mesuré sans protection solaire;

store baissé le store est baissé devant le vitrage

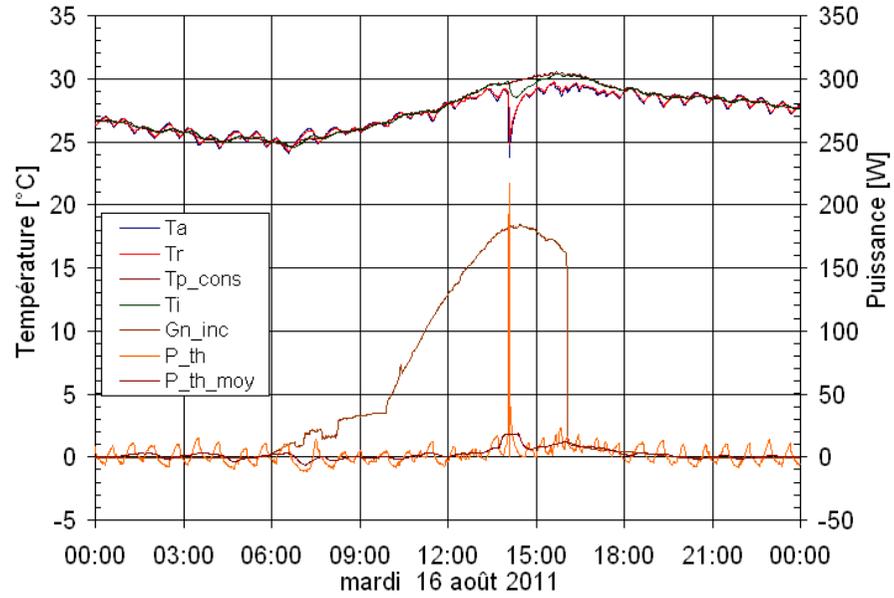
film blanc le store est levé et un film blanc est posé contre le vitrage

Date	Qualité jour ou mesures	Evaluation	Box 1	Box 2
16.08.2011	Très bon jour	1	store baissé	store levé
17.08.2011	Très bon jour	1	store baissé	store levé
18.08.2011	Jour moyen	0	store baissé	store levé
19.08.2011	Jour moyen	0	store baissé	store levé
20.08.2011	Très bon jour	1	store baissé	store levé
21.08.2011	Très bon jour	1	store baissé	store levé
22.08.2011	Très bon jour	1	store baissé	store levé
28.08.2011	Très bon jour	1	film blanc	film blanc
29.08.2011	Jour moyen	0	film blanc	film blanc
31.08.2011	Jour moyen	0	film blanc	film blanc

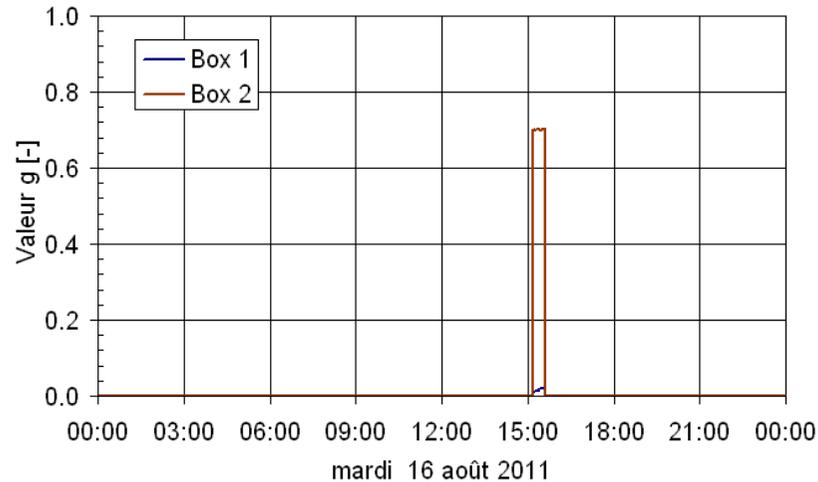
Mesures météo et température ambiante



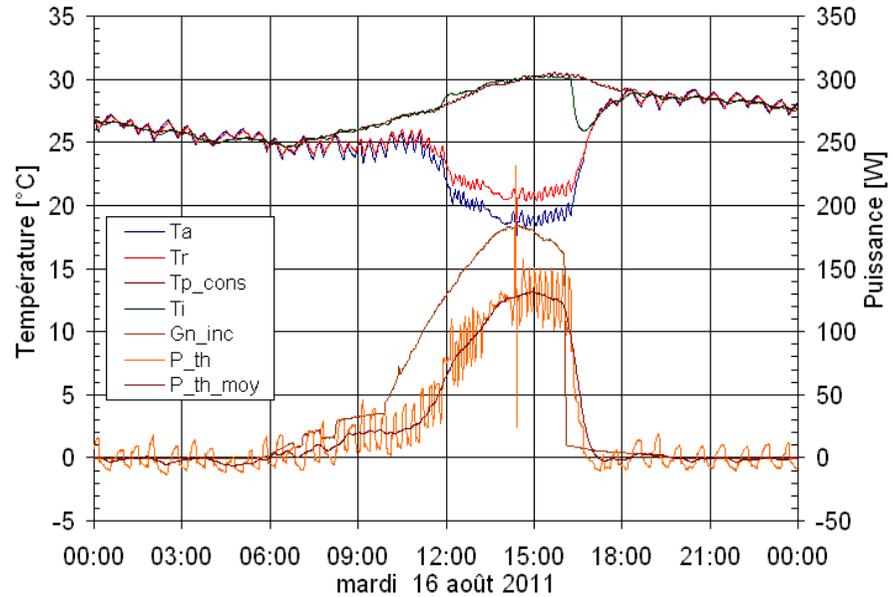
Box 1 - mesures



Box 1 et 2 - valeur g



Box 2 - mesures



Valeur journalière mesurée		Valeur donnée	Paramètres d'évaluations:	
g-moyen-Box1	0.02 +/-0.06	0.6	Valeurs moyennes:	40 [min]
g-moyen-Box2	0.70 +/-0.06	0.6	Gn minimum:	200 [W/m2]
			Angle d'incidence maximum:	50 [°]

Te: température de l'air extérieur

Ti: température de l'air à l'intérieur d'un box

Tp: température de l'air de la pièce

Tp_cons: température de consigne pour l'air dans un box

Ta: température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box

Tr: température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box

Gn: rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box

Gn_inc: puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un box

P_th: puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un box

P_th_moy: valeur moyenne de la puissance thermique transférée

Annexe H

Mesures et analyses Bâtiment C - HEPIA - Genève

Vitrage mesuré :

Double vitrage

Double vitrage des années 80 - 90

Caractéristiques pas connues

Coefficient g 0.6 – 0.75 [-]

Valeur U ca. 1.6 [W/m²]

Protection solaire

Store vénitien à lamelles inclinables

Placé à l'extérieur

Mesures

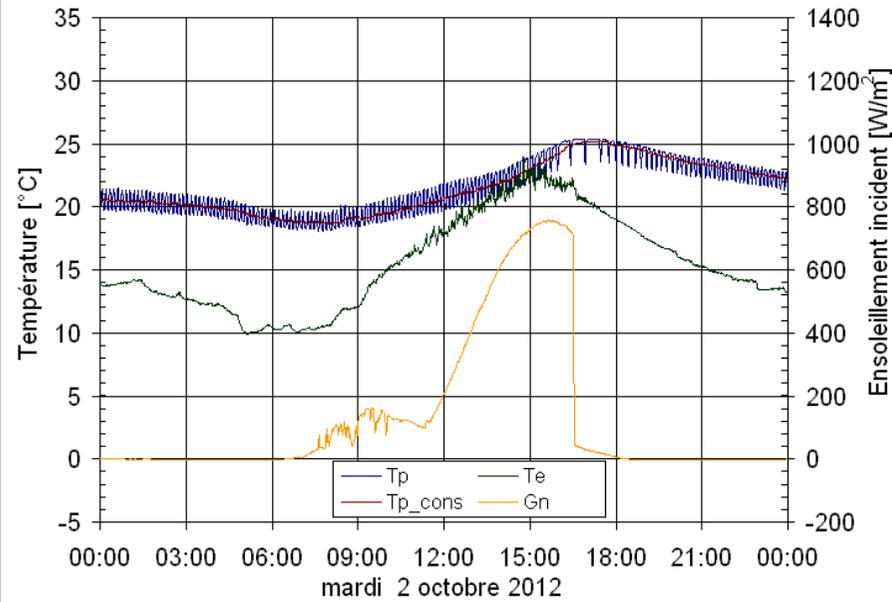
Les deux box ont mesuré le même vitrage avec trois positions de store:

store levé le vitrage est mesuré sans protection solaire;

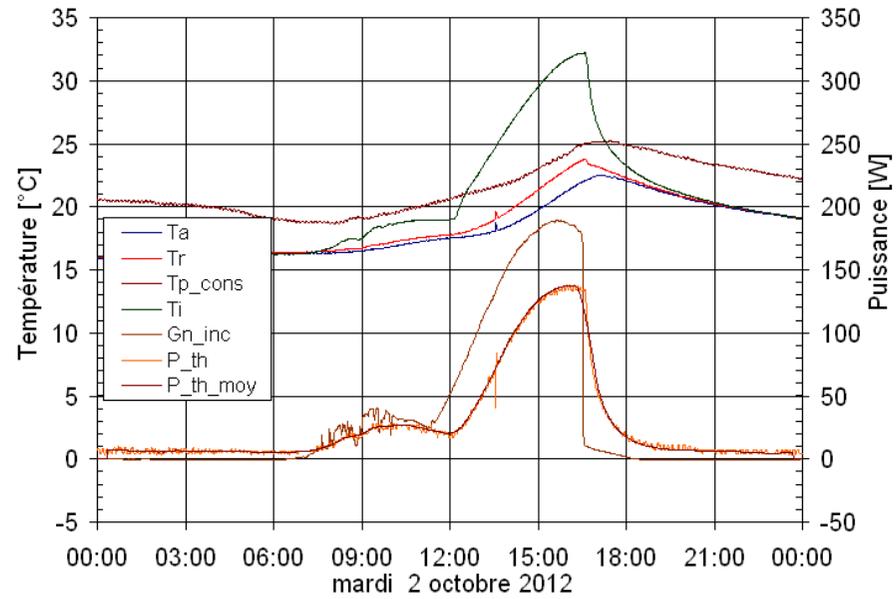
store baissé le store est baissé devant le vitrage

Date	Qualité jour ou mesures	Evaluation	Box 1	Box 2
02.10.2012	Très bon jour	1	store levé	store levé
06.10.2012	Jour moyen	0	store levé	store levé
11.10.2012	Jour moyen	0	store levé	store levé
13.10.2012	Jour moyen	0	store baissé	store levé
20.10.2012	Jour moyen	0	store baissé	store levé
29.10.2012	Jour moyen	0	store levé	store baissé

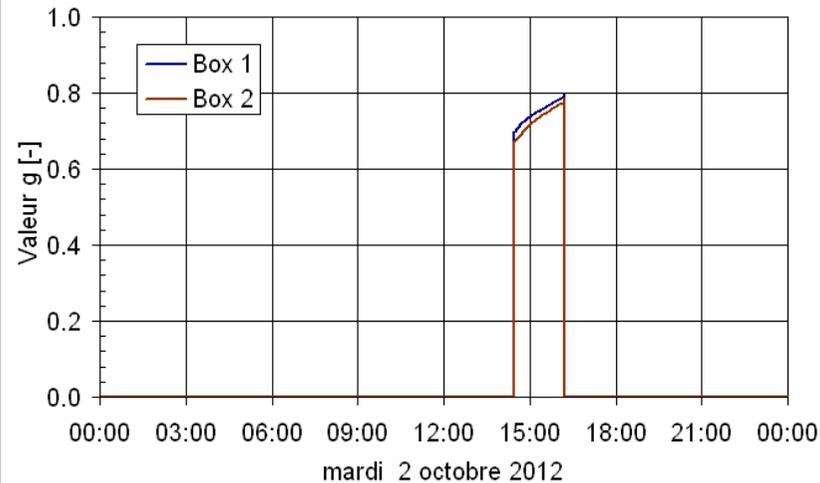
Mesures météo et température ambiante



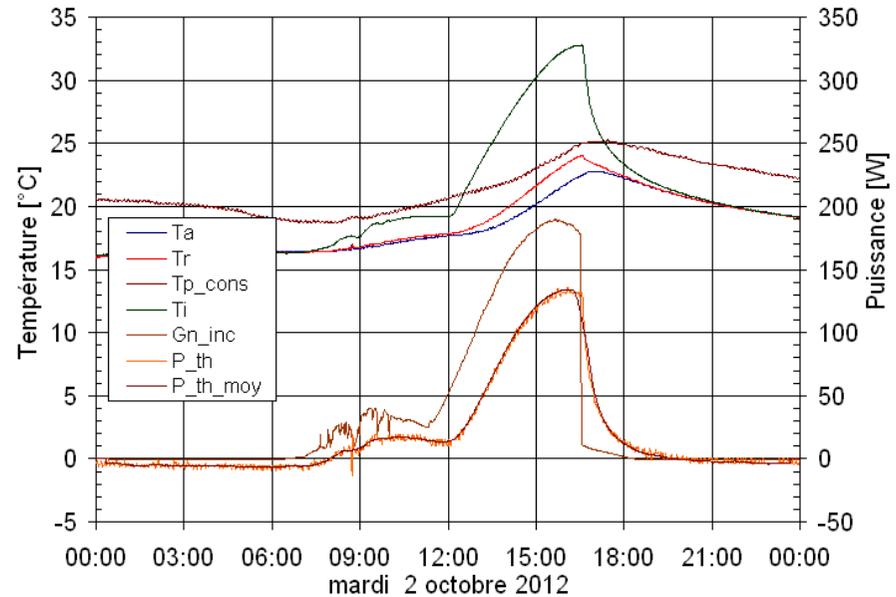
Box 1 - mesures



Box 1 et 2 - valeur g



Box 2 - mesures



Valeur journalière mesurée		Valeur donnée	Paramètres d'évaluations:	
g-moyen-Box1	0.75 +/-0.06	0.6	Valeurs moyennes:	40 [min]
g-moyen-Box2	0.73 +/-0.07	0.6	Gn minimum:	200 [W/m2]
			Angle d'incidence maximum:	50 [°]

Te: température de l'air extérieur
 Ti: température de l'air à l'intérieur d'un box
 Tp: température de l'air de la pièce
 Tp_cons: température de consigne pour l'air dans un box
 Ta: température aller de l'eau à l'entrée de l'échangeur d'un box
 Tr: température retour de l'eau à la sortie de l'échangeur d'un box
 Gn: rayonnement solaire incident dans le plan d'ouverture d'un box
 Gn_inc: puissance radiative incidente dans la surface d'ouverture d'un box
 P_th: puissance thermique transférée par l'échangeur de chaleur d'un box
 P_th_moy: valeur moyenne de la puissance thermique transférée