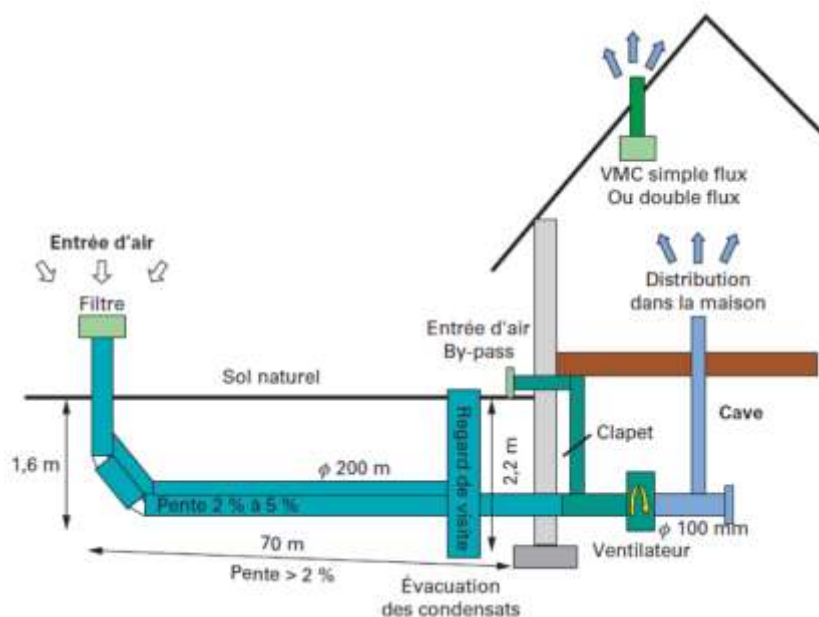


Hoofdstuk 8 – Ondiepe geothermie – Bodem-lucht warmtepompssystemen

8.1. Principe

8.1.1. Inleiding

Een grond–lucht warmtewisselaar of grondbuis (of “earth-air heat exchanger EAHX”) bestaat uit één of meerdere buizen waardoor verse lucht aangezogen wordt om lucht voor te verwarmen (of voor te koelen). In Canada spreekt men van een *Puits Canadien* (warmtewinning). In de Provence (Frankrijk) spreekt men van een *Puits Provençal* (koeltewinning). Volgens Marivoet (2008) wordt het systeem nog niet zoveel toegepast in België, terwijl Duitsland, Zwitserland en Oostenrijk pioniers zijn in het gebruik van deze techniek.



Figuur 1. Principetekening van een grond-lucht warmtewisselaar of “Puits Canadien” (Laplaige & Lemale)

Laplaige & Lemale (BE-8-592)

«Le puits canadien (...) permet de réduire les charges de chauffage l'hiver (jusqu'à 40 % du poste de renouvellement d'air) et d'apporter un confort d'été de façon tout à fait naturelle. Les puits canadiens ou provençaux peuvent équiper tous les types de bâtiments (neufs, en priorité), de la maison individuelle aux bâtiments tertiaires.» (Laplaige & Lemale)

Le principe de fonctionnement du puits canadien consiste à faire circuler à vitesse faible dans des canalisations étanches enterrées, en PVC ou en polyéthylène, l'air destiné au renouvellement de l'ambiance intérieure des locaux (figure 1). En hiver, l'air extérieur aspiré dans le puits par le ventilateur se réchauffe au contact du sol avant de pénétrer dans le bâtiment. Les besoins de chauffage liés au renouvellement d'air des locaux sont ainsi réduits et le maintien hors-gel du bâtiment peut être naturellement assuré. En été, l'air extérieur profite de la fraîcheur du sol pour se refroidir d'une dizaine de degrés et arriver dans le bâtiment durant la journée à une température de l'ordre de 15 à 20°C, ce qui suffit pour en assurer le rafraîchissement. Pendant l'intersaison, un by-pass vient court-circuiter le puits lorsque les températures de confort sont atteintes. Une fois réchauffé ou rafraîchi, l'air peut être diffusé par une grille en un seul point du bâtiment ou bien en plusieurs endroits grâce à un réseau de gaines isolées.

8.1.2. Kosten

Volgens van Lohuizen (2006) zijn de meerkosten van een grond-luchtcollector gecombineerd met een gebalanceerde ventilatie met warmterugwinning beperkt (~€1800 voor een woning met een zomerventilatiebehoefte van 450m³ per uur).

In zijn thesis heeft Marivoet (2008) twee voorbeelden bekeken in verband met het financiële voordeel dat het gebruik van een EAHX brengt.

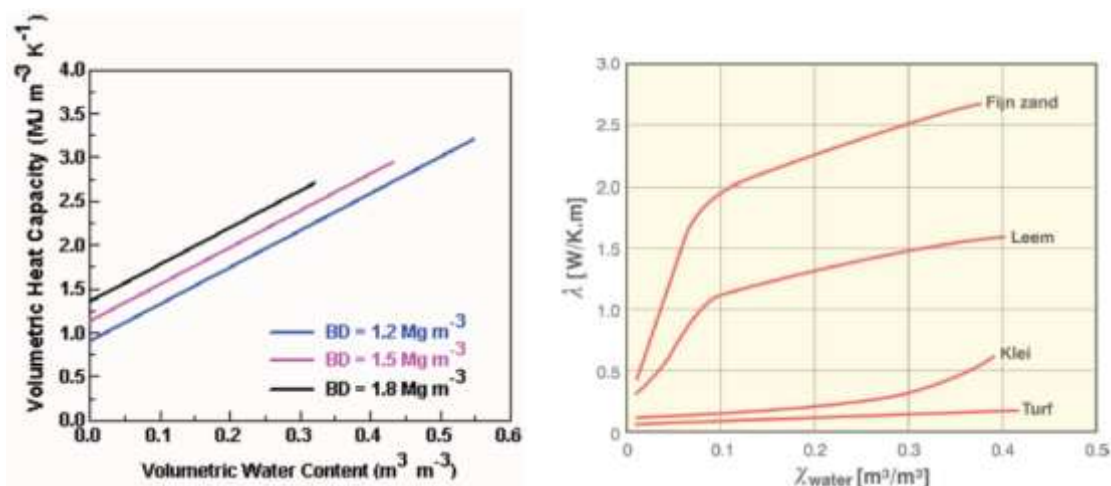
- Het eerste voorbeeld betreft een kantoorgebouw (van IDEWE Roeselare) met aanzuiging van 6000m³/u doorheen 40m lange buizen die gelegen zijn op een diepte van 2.25m in een vochtige zandbodem en met een ventilatorrendement van 80%. De kostprijs (materiaal + grondwerken) voor een systeem met 1 enkele buis (logische keuze voor dit type gebouw) is rond €8000 voor een afschrijving van 17 jaar.
- Het tweede voorbeeld betreft een eengezinswoning (±110m², ventilatiedebiet van 400m³/u, de 30m lange buizen zijn gelegen in een vochtige leembodem op 2.5m diepte). De berekeningen van Marivoet (2008) leiden tot een kostprijs rond €1000 met een afschrijving van 14 jaar.

Marivoet (2008) beschrijft ook gedetailleerd de theoretische berekeningen voor verschillende oplossingen (d.w.z. voor een verschillend aantal buizen).

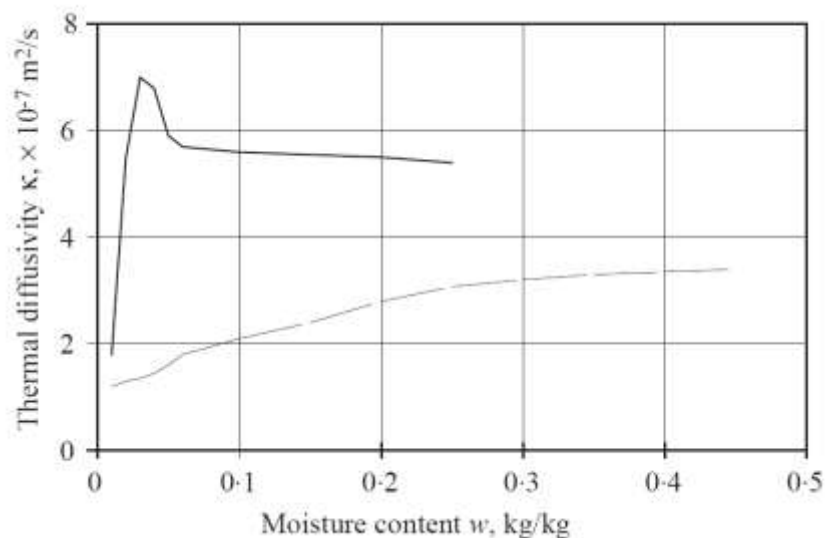
8.1.3. Invloedsfactoren

Het rendement van grond-luchtcollectoren wordt door een groot aantal invloedsfactoren bepaald. Volgens Van Lohuizen (2006) zijn de belangrijkste factoren de samenstelling en het vochtgehalte van de bodem, de aanlegdiepte, tussenafstand en uitvoering (materiaalgebruik, diameter en lengte) van de collectoren en de snelheid waarmee de lucht door de collectoren voert.

Bodem en water: de grond moet goede thermische eigenschappen bezitten (thermische geleidbaarheid en warmtecapaciteit). Deze eigenschappen worden positief beïnvloed door het watergehalte (zie Figuren 2 en 3; Marivoet, 2008).



Figuur 2. (a) De volumetrische warmtecapaciteit van 3 bodemstalen met verschillende dichtheid in functie van het watergehalte (Nofziger and Wu, 2003); (b) De thermische geleidbaarheid λ van 3 bodemtypes in functie van het watergehalte (BIM (Brussels Instituut voor milieubeheer), 2007)



Figuur 3. Warmtediffusiviteit α of κ ($= \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$) in functie van het watergehalte voor een zanderige (volle lijn) en een kleibodem (streeplijn) (Abu-Hamdeh, 2003).

De temperatuurvariaties in de bodem: De temperatuur is idealiter min of meer constant op de gekozen diepte. Afhankelijk van de grondsoort en het vochtgehalte van de bodem worden de buizen daarvoor best 1.5m tot 3m onder het oppervlak geplaatst (zie Tabel 1; Marivoet, 2008).

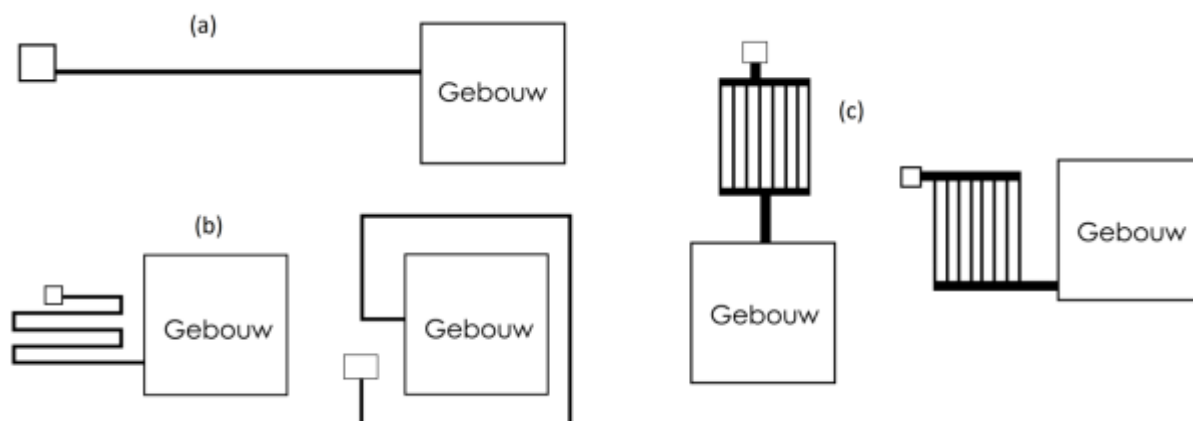
Tabel 1: Penetratiediepte voor dagelijkse en jaarlijkse temperatuurcycli (REHAU AG, 2008)

Bodemtype	α (m ² /s)	d_{dag} (m)	d_{jaar} (m)	ρ (kg/m ³)
Kwartzand, droog	$2.01 \cdot 10^{-7}$	0.0743	1.420	1650
Kwartzand, 8% vochtig	$3.33 \cdot 10^{-7}$	0.0957	1.828	1750
Zand, droog	$5.06 \cdot 10^{-7}$	0.1180	2.254	1650
Zand, 15% vochtig	$3.75 \cdot 10^{-7}$	0.1016	1.940	1780
Leem, vochtig	$6.02 \cdot 10^{-7}$	0.1287	2.458	1800
Leem, 36% vochtig	$4.90 \cdot 10^{-7}$	0.1161	2.218	1650
Leem, verzadigd	$10.13 \cdot 10^{-7}$	0.1669	3.189	1800
Kalkhoudende aarde	$1.92 \cdot 10^{-7}$	0.0727	1.388	1670
Veen	$0.60 \cdot 10^{-7}$	0.0406	0.776	1500

8.2. Uitvoeringsmethode

De buizen hebben een diameter van 100 tot 1000mm en zijn vervaardigd uit kunststof, beton of metaal. De installatiediepte beïnvloedt de demping van de thermische schommelingen en bedraagt typisch 1 tot 6m (Marivoet, 2008).

Voorbeelden van schikking van de grondbuis zijn weergegeven in Marivoet (2008), zie Figuur 4.



Figuur 4. Schikking van de grondbuis: (a) Rechte lijn; (b) Serpentine-opstelling; (c) Parallele opstelling (Marivoet, 2008)

De meest eenvoudige opstelling is één enkele buis met een bepaalde diameter in een rechte lijn. Volgens REHAU AG 2006, geciteerd in Marivoet (2008), is deze vorm de meest economische oplossing voor eengezinswoningen. Toch is een grote buis in strijd met het thermisch rendement. Volgens Marivoet (2008) kiest men best voor een parallelle opbouw (met een minimale tussenafstand van 1m) als men opteert voor de opstelling met meerdere buizen (in grotere gebouwen).

Andere specifieke eisen bij de uitvoering van grond-luchtsystemen zijn hieronder verzameld.

Marivoet (2008) :

Hydraulische eisen: Het luchtdebiet hangt af van het ventilatiesysteem. Het drukverlies dat overwonnen moet worden door het ventilatiesysteem hangt af van de wrijvingsverliezen (weerstandscoefficiënt, lengte en diameter van de leiding, snelheid van het verplaatste medium), obstakels (bochten, kranen, vernauwingen, ...), soort stroming (laminair & turbulent), in- en uitstroomopeningen (filters, roosters, ...).

Thermische eisen: De grondbuis mag geen te hoge warmteweerstand bieden (dit hangt af van het materiaal waaruit de ondergrondse buis vervaardigd is). Bovendien moet de stroming turbulent zijn.

Hygiënische eisen: de lucht moet vrij zijn van bacteriën, deeltjes (stof en organisch) en geurtjes (zie Marivoet (2008) voor meer details).

Eisen naar veiligheid: De leiding moet zeer goed gesloten zijn om infiltratie van grondwater en vooral van Radon te voorkomen.

Conseils de mise en oeuvre (Laplaige & Lemale)

Qualité de l'air : L'entrée d'air doit être située loin des sources possibles de pollution (parking, local à poubelles...) et à une hauteur suffisante pour éviter l'aspiration de poussières. Elle doit être protégée des vents dominants et fermée par une grille à faibles mailles.

Gestion des condensats : En raison des variations de température de l'air entre l'intérieur des canalisations et l'extérieur, de l'eau peut se condenser dans le puits. Pour éviter que cette eau qui se forme, stagne, il est nécessaire de donner au puits une légère pente (de 1 à 3 %) dans le sens de l'écoulement de l'air. Un siphon, installé au point bas, permet de recueillir et d'évacuer les condensats.

Conduits : Les conduits doivent être résistants à la pression de la terre, étanches à l'air et à l'eau.

Débit d'air dans les canalisations : Un compromis est à rechercher pour assurer un préchauffage permanent de l'air neuf sans accroître toutefois les débits d'hygiène (débits fixés par la réglementation pour assurer la bonne hygiène d'une habitation).

Vitesse d'écoulement de l'air : En hiver, il est important de privilégier au maximum l'échange thermique, et donc une faible vitesse d'écoulement de l'air (~ 1m/sec). En été, l'objectif étant de rafraîchir le bâtiment, une plus grande efficacité est obtenue avec une vitesse d'écoulement de l'air plus importante (de l'ordre de 3 m/s au maximum pour éviter une trop grande augmentation des pertes de charge). Il est donc intéressant de disposer d'un ventilateur à double vitesse pour pouvoir assurer les deux fonctions de façon optimale.

Longueur des canalisations : La longueur optimale du puits dépend du débit dans les canalisations. En effet, on montre que pour les faibles débits, la température minimale est atteinte assez rapidement, et qu'à partir d'une certaine longueur, l'échange avec le puits ne tempère plus l'air, ayant atteint sa limite d'efficacité. Par contre, plus le débit augmente et plus cette longueur limite croît, mais plus les pertes de charge augmentent aussi. Dans la littérature, on recommande, une longueur de puits comprise entre 25 et 40 m. Si le linéaire de conduits doit être plus important, alors il convient de réaliser un réseau en augmentant le nombre de conduits.

Diamètre des canalisations Une augmentation du diamètre des tubes entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais n'augmente pas nécessairement l'échange thermique du fait d'une diminution de la vitesse pour un débit donné. Au-delà d'une certaine valeur optimale, dépendant de la vitesse d'écoulement, le coefficient d'échange convectif chute. Cela est dû au fait que l'augmentation de la vitesse d'écoulement diminue l'épaisseur de la couche limite où va être échangée la chaleur. L'air circulant au cœur de la canalisation ne va plus être en contact avec le tube et sa température est peu influencée par la température du sol. Cet optimum est indépendant de la longueur du tube, d'où une relation directe entre débit d'air et diamètre optimal. En règle générale, pour les débits utilisés, cet optimum conduit à un diamètre de l'ordre d'une vingtaine de centimètres.

Distance entre canalisations : Il est important d'assurer une distance suffisante entre deux canalisations pour éviter des interférences thermiques et permettre le bon échange de chaque canalisation avec le sol. On recommande de les espacer d'une distance d'environ cinq fois leur diamètre.

Profondeur d'enfouissement des canalisations : Le sol joue un rôle de tampon thermique entre l'extérieur et la canalisation enterrée. La profondeur doit être déterminée en fonction de la nature du sol et de l'objectif recherché (chauffage ou rafraîchissement). Dans le cas d'un puits qui chercherait à utiliser le déphasage journalier (la fonction rafraîchissement est alors recherchée), une profondeur de 40 cm est a priori suffisante. Pour un déphasage saisonnier (on privilégie dans ce cas la fonction préchauffage), une profondeur minimale de 1,50 m est requise. Au-delà, l'efficacité du puits augmente encore, mais des contraintes réglementaires et économiques ne permettent pas généralement d'installer le puits à de telles profondeurs. En effet, l'augmentation de la profondeur et les obligations de sécurisation des travaux font croître les coûts de réalisation bien plus vite que l'économie d'énergie réalisée grâce au puits.

Qualité du sol et taux d'humidité : La capacité calorifique et la conductivité du terrain ont un impact important sur l'efficacité du procédé. Ces caractéristiques dépendent de la composition du sol, de son degré d'humidité et des circulations d'eau l'affectant. L'eau possédant une capacité thermique plus grande que celle des autres constituants du sol, plus le sol est humide, mieux il garde sa fraîcheur ou sa chaleur et meilleur est l'échange thermique avec les canalisations du puits.

8.3. Dimensioneren

Volgens van Lohuizen (2006) volstaat één collectorbuis met een lengte van 20m voor een woning met een zomerventilatiebehoefte van 450 m³ per uur. Dit om een idee te geven van de dimensionering van een bodem-lucht warmtepompsysteem.

Marivoet (2008) heeft in het kader van zijn thesis een berekeningstool ontwikkeld, die volgens de randvoorwaarden van de gebruiker een zo efficiënt mogelijke grondbuis voorstelt. Deze tool is geschreven in MATLAB en integraal weergegeven in zijn thesis.

Design of Earth-to-air heat exchanger (EAHX) by Kopecky, 2006

Theoretical background: If a constant internal pipe surface temperature is considered as t_s [°C] along the length of EAHX the outlet air temperature t_{out} [°C] can be described with this formula:

$$t_{out} = t_s + (t_{in} - t_s) \cdot e^{-NTU}$$

where **NTU** (number of transfer unit) is a dimensionless parameter:

$$NTU = \frac{h_a \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_0 \cdot L}{m_a \cdot c_a}$$

where m_a is the air flow rate in [kg/s], c_a is the specific thermal capacity of the air [J/kgK], h_a is the air-to-pipe convective heat transfer coefficient [W/m².K], $2 \cdot r_0$ is the internal diameter of pipe [m], L [m] is pipe length, and t_{in} is the inlet air temperature [°C].

EAHX efficiency: $\eta_{ZVT} = 1 - e^{-NTU}$ [-] represents how much the outlet air temperature comes close to the internal pipe surface temperature. Theoretically, we should increase **NTU** as much as possible to increase the exchanger efficiency. It would lead to a combination of minimal airflow rate and a very long pipe. However, when a certain value of **NTU** (2.0 – 2.5) is reached, there is only a minor gain in efficiency. Therefore, **NTU** should be higher than 1.2, but it should not exceed 2.5. Such a range leads to efficiency from 70 % to 92 %.

Pressure loss : Δp_{fric} [Pa] in a straight pipe can be calculated as:

$$\Delta p_{fric} = \xi \cdot \frac{L}{2r_0} \cdot \frac{\rho v_a^2}{2}$$

where ξ [-] is the friction factor, ρ [kg/m³] is the density of air, and v_a [m/s] is the mean air velocity inside pipe.

Heat flow Q_{ZVT} [W] extracted from or delivered to soil is not equal to EAHX cooling power $Q_{cooling}$ [W]. Despite air-cooling in EAHX, when the temperature of the internal air is lower than the outlet air temperature from EAHX, a building cannot be cooled down. The heat flow Q_{zvt} [W] is defined as:

$$Q_{zvt} = m_a \cdot c_a \cdot (t_{in} - t_{out})$$

On the contrary, cooling power $Q_{cooling}$ [W] is defined as:

$$Q_{zvt} = m_a \cdot c_a \cdot (t_i - t_{out})$$

where t_i is the temperature of internal air in a cooled building.

Generally, lower pipe diameter leads to higher **NTU**; higher **NTU** leads to higher exchanger efficiency. The increase of the airflow rate does not reduce **NTU** considerably. The increase of the airflow rate or the decrease in pipe diameter leads to a higher value of the convective heat transfer coefficient, and this characteristic compensates the disadvantage of the higher airflow rate, to some extent. However, the pressure loss increases with the increase of the airflow rate and/or with the decrease in pipe diameter. Therefore, it is rather suitable to split the total airflow rate into more pipes with as low a diameter as possible, which will ensure reasonable high efficiency and still acceptable pressure loss. On the contrary, many long pipes are in conflict with financial restrictions and often with building site possibilities, as well.

When one designs EAHX it is essential to choose the combination of design parameters (pipe length, pipe diameter, and the number of pipes) for the already known maximal airflow rate so that:

- EAHX efficiency should be higher than 70 %, but it should be lower than 92 %. The requirement leads to **NTU** in interval from 1.2 to 2.5
- EAHX total pressure loss (including filters, the inlet shaft, fittings, and other additional resistances) should not exceed a reasonable number. Such a limitation has to be specified by the designer of the building ventilation system. The highest acceptable EAHX pressure loss is different for different projects; it depends on the size of used air handling unit and the pressure loss of building duct system.
- EAHX cooling power should be high enough to remove significant (e.g. one half) part of building cooling load. The design of EAHX to remove the total value of building cooling load need not be so efficient because it would often lead to rather large systems.
- Further conditions should be fulfilled. For instance, it might be the length restriction and/or the number of pipes restriction because of the site area.
- The outlet air temperature should be higher than the specified minimal value (not too low outlet air temperature).
- Total investment costs should not be too high. The cost limit should be specified by the designer of the building ventilation system and investor.

8.4. Case histories

Een eerste toepassingsvoorbeeld betreft een demonstratieproject in Nijeveen, Nederland (van Lohuizen 2006). In dit demonstratieproject werd het systeem met een collectorbuis in zes vrijstaande woningen toegepast. De woningen werden voorzien van een gebalanceerd ventilatiesysteem. Het onderzoek bestond uit de monitoring van de prestaties van het systeem ten aanzien van energiegebruik, bewonerservaring, ventilatie en binnenklimaat.

Een tweede voorbeeld is beschreven door Marivoet (2008). Het gaat over een kantoorgebouw (IDEWE/IBEVE Roeselare) waar temperatuurmetingen werden uitgevoerd tussen 7 februari 2008 en 25 maart 2008.

Andere voorbeelden zijn gepubliceerd door:

- Baradeau, 2007: Salle de spectacle (11,000m² in totaal) te Dijon, France
- Lelong, 2006: Médiathèque André Malraux à Béziers (France)
- Las Cahiers Techniques du Bâtiments, 2006: Immeuble de bureaux à Noisy-Le-Grand (France)