



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 10. Décembre 2008

Etude du potentiel d'utilisation de « geocooling » d'une installation avec sondes géothermiques verticales appliqué à un bâtiment administratif Minergie® à Chiasso

Mandant:

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

Mandataire:

Istituto di Sostenibilità Applicata all'Ambiente Costruito, DACD, SUPSI
Dipartimento Ambiente, Costruzioni e Design – DACD
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana – SUPSI
Trevano, CP 105, CH-6952 Canobbio
<http://www.supsi.ch/>

Auteurs:

Daniel Pahud, SUPSI-DACD / ISAAC, Trevano-Canobbio, daniel.pahud@supsi.ch
Paola Caputo, SUPSI-DACD / ISAAC, Trevano-Canobbio
Giovanni Branca, SUPSI-DACD / ISAAC, Trevano-Canobbio
Milton Generelli, SUPSI-DACD / ISAAC, Trevano-Canobbio

Responsable de domaine de l'OFEN: GUnter Siddiqi

Chef de programme de l'OFEN: Rudolf Minder

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 151'546 / 101'291

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Riassunto

Il nuovo edificio della dogana di Brogeda-Chiasso è stato costruito nel rispetto dello standard Minergie®. I bassi fabbisogni di riscaldamento e di raffreddamento permettono l'erogazione dell'energia termica tramite un sistema di solette termoattive (denominato TABS in tedesco). Tali condizioni costituiscono delle premesse ideali ai fini dell'integrazione di un sistema geotermico con geocooling. In particolare, un campo di sonde geotermiche consente di fornire calore in inverno, grazie all'accoppiamento con una pompa di calore e di fornire fresco in estate, grazie ad uno scambiatore di calore. L'edificio è stato utilizzato come caso di riferimento nell'ambito di una ricerca sul geocooling.

Per simulare l'edificio, è stato sviluppato un modello di simulazione dinamica, che consente di rappresentare e mettere a sistema l'erogazione dell'energia termica, l'impianto geotermico e le interazioni termiche. Il programma di simulazione, chiamato COOLSIM e sviluppato con il codice TRNSYS, trova supporto nell'expertise consolidata nell'ambito dei precedenti programmi PILESIM2 e BRIDGESIM.

La ricerca condotta comprende anche la definizione di una procedura per valutare la fattibilità tecnica di un sistema basato su geocooling e per stabilirne il dimensionamento. Inoltre, uno studio di sensibilità permette di valutare e di mettere in evidenza l'influenza dei principali parametri sul dimensionamento del sistema.

Il dimensionamento del campo di sonde geotermiche consiste nella determinazione della lunghezza totale delle sonde in relazione alla potenza della pompa di calore e ai fabbisogni di raffreddamento che devono essere soddisfatti tramite geocooling. I parametri più influenti per i fabbisogni termici sono la potenza termica da estrarre dalle sonde, il livello di temperatura nella distribuzione e il rapporto tra i fabbisogni annui di riscaldamento e di raffreddamento. La progettazione deve essere mirata a ottenere la potenza più bassa possibile e la temperatura più alta possibile. È inoltre importante avere una differenza di temperatura sufficiente tra la temperatura iniziale del terreno e la temperatura di mandata nella distribuzione di raffreddamento. L'energia annuale di raffreddamento soddisfatta tramite geocooling dovrebbe poi essere più bassa dell'energia annuale di riscaldamento, per avere un'energia annuale estratta dalle sonde per il riscaldamento maggiore rispetto a quella immessa nel terreno tramite geocooling, in modo da evitare nel corso degli anni un aumento della temperatura del terreno e ridurre il potenziale di geocooling.

L'influenza delle condizioni geologiche è prima di tutto determinata dalla conducibilità termica del terreno. In secondo luogo, anche la temperatura iniziale dello strato di terreno attraversato dalle sonde è determinante e dipende dalla profondità raggiunta dalle sonde a causa del gradiente di temperatura geotermico. Altri parametri studiati sono la distanza tra le sonde e la grandezza dello scambiatore termico per il geocooling (quest'ultimo separa i due circuiti idraulici delle sonde geotermiche e della distribuzione di raffreddamento). Le simulazioni hanno dimostrato che è importante e sovradimensionare la capacità di trasferimento termico dello scambiatore al fine di permettere la temperatura di ritorno più alta possibile del fluido termovettore nelle sonde geotermiche.

Una conducibilità termica del terreno più elevata permette una minore lunghezza delle sonde sia per il riscaldamento che per il geocooling. Sonde più profonde permettono di ridurre la lunghezza, a causa dell'aumento della temperatura del terreno nel caso del riscaldamento; viceversa, sonde più profonde comportano un aumento della lunghezza per il geocooling. Con l'edificio simulato, è stata ottenuta una profondità ottimale di 150 m.

La simulazione dell'edificio, con le caratteristiche e nelle condizioni di utilizzo previste, e delle solette termoattive ha dimostrato che è possibile impostare un raffreddamento con una temperatura di mandata di 22°C. Avendo una conducibilità termica del terreno pari a 2 W/(m·K), una temperatura iniziale del terreno pari a 12°C vicino alla superficie ed un gradiente di temperatura geotermico pari a 25 K/km, è stata ricavata la seguente combinazione di parametri per il dimensionamento:

- potenza specifica estratta : 28 W/m (relativamente alla potenza della PdC alle condizioni B0W35)
- energia specifica estratta : 43 kWh/(m a)
- potenza specifica iniettata : 23 W/m (relativamente alla potenza media in geocooling)
- energia specifica iniettata : 26 kWh/(m a)
- rapporto iniettato su estratto : 0.6

Il dimensionamento prevede un campo di 10 sonde geotermiche di 150 m di profondità, con una distanza di 8 m tra le sonde.

Il costo dell'energia termica di riscaldamento e di raffreddamento è stimato pari a 10 centesimi al chilowattora, il che corrisponde ad una spesa di 5 CHF per metro quadrato di superficie di riferimento energetico e per anno. L'integrazione e l'ottimizzazione di un sistema geotermico basato sul geocooling appare quindi come un'opzione valida e concorrenziale per un edificio amministrativo dotato di solette termoattive.

Résumé

Le nouveau bâtiment de la douane de Brogeda-Chiasso a été construit pour satisfaire le standard Minergie®. Les faibles besoins de chauffage et de refroidissement rendent possible l'émission d'énergie thermique par un système de dalles actives (dénommé TABS en allemand). Ce sont des conditions idéales pour l'intégration d'un système géothermique basé sur le geocooling : un champ de sondes géothermiques est couplé à une pompe à chaleur en hiver et à la distribution de refroidissement par le biais d'un échangeur de chaleur en été. Le bâtiment a donc été utilisé comme objet de référence pour une étude de cas centrée sur le geocooling.

Un modèle de simulation dynamique a été développé pour simuler le bâtiment, l'émission d'énergie thermique, l'installation géothermique et les interactions thermiques entre eux. L'outil de simulation, appelé COOLSIM, a été développé avec TRNSYS et bénéficie de développements et de validations faits avec d'autres programmes comme PILESIM2 et BRIDGESIM. Une procédure a été définie pour évaluer la faisabilité technique d'un système basé sur le geocooling et pour établir son dimensionnement. Une étude de sensibilité permet d'évaluer et de montrer l'influence des principaux paramètres sur le dimensionnement du système.

Le dimensionnement du champ de sondes géothermiques revient à déterminer la longueur totale des sondes relativement à la puissance de la pompe à chaleur et aux besoins de refroidissement qui doivent être satisfaits par geocooling. Les paramètres les plus influents pour les besoins thermiques sont la puissance thermique à extraire des sondes, le niveau de température pour la distribution de geocooling et le rapport des demandes annuelles d'énergie de chauffage et de refroidissement. La puissance la plus basse possible et la température la plus haute possible doivent être recherchées. Il est important d'avoir une différence de température suffisante entre la température initiale du terrain et la température de départ dans la distribution de refroidissement. L'énergie annuelle de refroidissement couverte par geocooling doit être plus basse que la demande d'énergie de chauffage, de manière à ce que l'énergie annuelle extraite des sondes pour le chauffage reste plus grande que l'énergie injectée par geocooling. En effet, une augmentation de la température du terrain au cours des années a pour effet une diminution du potentiel de geocooling.

L'influence des conditions géologiques est avant tout déterminée par la conductivité thermique du terrain, mais aussi par la température initiale de la couche de terrain traversée par les sondes, dont la valeur dépend de la profondeur atteinte par ces dernières en raison du gradient de température géothermique. D'autres paramètres étudiés sont l'espacement entre les sondes et la capacité de transfert de l'échangeur de chaleur pour le geocooling (ce dernier sépare hydrauliquement le circuit des sondes géothermiques du circuit de distribution de refroidissement). Les simulations ont montré qu'il est important de sur-dimensionner la capacité de transfert de ce dernier, afin de permettre la température de retour la plus élevée possible du fluide caloporteur dans les sondes.

Une conductivité thermique du terrain plus élevée permet une longueur de sonde plus courte aussi bien pour le chauffage que pour le geocooling. Une profondeur de sonde plus importante, en raison de l'augmentation de la température du terrain, permet de réduire la longueur des sondes pour le chauffage alors qu'elle doit être augmentée pour le geocooling. Avec le bâtiment simulé de la douane, une profondeur optimale de 150 m est trouvée.

La simulation du bâtiment et des dalles actives a montré qu'il est possible de le refroidir avec une température de départ de 22°C. Avec une conductivité thermique du terrain de 2 W/(mK), une température initiale du terrain de 12°C vers la surface et un gradient de température géothermique de 25 K/km, les clefs de dimensionnement suivantes ont été obtenues :

- puissance spécifique extraite : 28 W/m (relativement à la puissance de la PAC aux conditions B0W35)
- énergie spécifique extraite : 43 kWh/(m a)
- puissance spécifique injectée : 23 W/m (relativement à la puissance moyenne en geocooling)
- énergie spécifique injectée : 26 kWh/(m a)
- ratio injecté sur extrait : 0.6

Le dimensionnement prévoit un champ de 10 sondes géothermiques de 150 m de profondeur, avec un espacement de 8 m entre les sondes.

Le coût de l'énergie thermique de chauffage et de refroidissement est estimé à 10 centimes par kilowattheure, ce qui correspond à une charge de 5 CHF par mètre carré de surface de référence énergétique et par année. L'intégration et l'optimisation d'un système géothermique basé sur le geocooling apparaît donc comme une option valable et concurrentielle pour un bâtiment administratif doté de dalles actives.

Summary

The new office building of Brogeda-Chiasso custom has been built to satisfy the Minergie® standard. Low energy requirements for heating and cooling makes it possible to use active concrete plates for thermal energy emission (they are called TABS in German). Further, there are ideal conditions for the integration of a geothermal system based on geocooling: a borehole heat exchanger field is coupled with a heat pump in winter and with the cooling distribution through a flat plate heat exchanger in summer. The building has been thus taken into account as a reference case in the framework of a study based about geocooling applications.

A dynamic system model has been developed to simulate the building, the emission of thermal energy, the technical installation and the thermal interactions between them. The simulation tool, called COOLSIM, has been developed with TRNSYS and benefits of developments and validations done by previous simulation tools such as PILESIM2 and BRIDGESIM. A procedure has been defined to assess the technical feasibility of a system based on geocooling and to establish its sizing. A sensitivity study has been performed to assess and show the influences of the main system parameters on the system sizing.

The sizing of the borehole heat exchanger field has been evaluated by determining the total borehole length of the boreholes in relation to the heat pump power and the cooling requirements that have to be met by geocooling. The most influential parameters related to thermal requirements are the heat extraction rate from the boreholes, the temperature level in the geocooling distribution and the ratio between the annual heating and cooling energy requirements. The lowest possible heat rate and the highest possible temperature have to be sought. It is important to have a sufficient temperature difference between the initial ground temperature and the forward fluid temperature in the cooling distribution. The annual cooling energy met by geocooling has to be lower than heating energy, so that the annual injected energy in the boreholes is remaining smaller than the extracted energy. It is preventing the ground temperature from rising in the long term and thus does not reduce the geocooling potential.

The influence of the geological conditions is primarily determined by the ground thermal conductivity. So has the initial ground temperature of the ground layer crossed by the boreholes, whose value is also depending on the borehole depth, due to the temperature geothermal gradient. Other studied parameters are the borehole spacing and the heat transfer capacity of the geocooling heat exchanger (this latter separates the hydraulic circuits of the borehole heat exchangers and the cooling distribution). Simulations have shown that it is important to oversize the heat transfer capacity of the geocooling heat exchanger. The return fluid temperature in the boreholes is consequently as high as possible for the benefit of the geocooling potential.

The influence of a larger ground thermal conductivity is a shorter borehole length for both heating and geocooling. With deeper boreholes, due to the ground temperature increase, the required borehole length will decrease for heating and increase for geocooling. Considering the reference office building an optimal depth of 150 m is obtained.

The simulation of the building and the active concrete plates has shown that it is possible to cool it with a forward fluid temperature of 22°C. Having a ground thermal conductivity of 2 W/(mK), an initial ground temperature of 12 °C close to the surface and a geothermal temperature gradient of 25 K/km, the following sizing keys were found:

- specific extracted heat rate : 28 W/m (relative to heat pump extracted heat rate at B0W35 conditions)
- specific extracted energy : 43 kWh/(m y)
- specific injected heat rate : 23 W/m (relative to mean geocooling heat rate)
- specific injected energy : 26 kWh/(m y)
- ratio injected over extracted : 0.6

A 10 borehole heat exchanger field is foreseen, each borehole having a depth of 150 m and a spacing of 8 m between them.

The energy cost for heating and cooling is estimated to about 10 centimes per kilowatt-hour, which makes a charge of 5 CHF per square meter of energy reference area and per year. The integration and the optimisation of a geothermal system based on geocooling is therefore a valuable and economically competitive option for an administrative building with active concrete plates.

Zusammenfassung

Das neue Gebäude der Zollstelle Brogeda-Chiasso wurde nach dem MINERGIE®-Standard gebaut. Der geringe Energieverbrauch für Heizung und Kühlung macht es möglich, die Energie mit in die Betondecke integrierten thermoaktiven Bauteilelementen zu decken (auf deutsch als TABS bezeichnet). Die Bedingungen sind damit ideal für die Integration eines auf Geocooling basierenden Erdwärme-Systems: im Winter ist das Erdwärmesondenfeld an eine Wärmepumpe gekoppelt und im Sommer durch einen Wärmetauscher an ein Kühlungsverteilungssystem. Das Gebäude dient als Referenz-Objekt für eine Fallstudie über das Geocooling.

Ein dynamisches Simulationsmodell wurde entwickelt, um das Gebäude, die Emission von Wärmeenergie, die technische Installation sowie die thermischen Wechselwirkungen zu simulieren. Das Simulationsprogramm, benannt als COOLSIM, wurde mit TRNSYS entwickelt und es profitiert von der Entwicklung und Validierung anderer Simulationsprogramme wie PILESIM2 und BRIDGESIM. Ein Verfahren zur Bewertung der technischen Machbarkeit eines auf Geocooling basierenden Systems und dessen Dimensionierung wurde hierfür definiert. Eine Sensitivitätsstudie wurde durchgeführt, um die Einflüsse der wichtigsten System-Parameter auf die Dimensionierung zu zeigen und zu bewerten.

Die Dimensionierung des Erdwärmesondenfeldes ist gegeben durch die Gesamtlänge der Erdwärmesonden in Bezug auf die Wärmepumpleistung und die Kühlanforderungen, die durch Geocooling erfüllt werden müssen. Die den thermischen Bedarf am stärksten beeinflussenden Parameter, sind die Wärmeentzugsleistung durch die Erdwärmesonden, das Temperaturniveau in der Geocoolingverteilung und das Verhältnis zwischen jährlichem Heiz- und Kühlbedarf. Die Dimensionierung muss darauf zielen die geringstmögliche Leistung und höchstmögliche Temperatur zu erreichen. Es ist ausschlaggebend, einen ausreichenden Temperaturunterschied zwischen der ursprünglichen Bodentemperatur und der Temperatur der Kühlverteilungsflüssigkeit zu haben. Die jährliche Energie zur Kühlung durch Geocooling muss nie dringer sein als die Heizenergie, so dass die jährlichen in die Erdwärmesonden zugeführte Energie weniger ist als die entnommene Energie.

Der Einfluss der geologischen Bedingungen ist vor allem durch die thermische Leitfähigkeit des Bodens bestimmt. Die ursprüngliche Temperatur der durch die Sonden durchquerten Erdschicht ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung und wiederum bedingt durch die Sondentiefe, auf Grund des geothermischen Temperaturgradientes. Andere Parameter die untersucht wurden, sind der Sondenabstand sowie die fürs Geocooling benötigte Wärmetauschergrösse (der letztere trennt die Hydraulikkreisläufe der Erdwärmesonden und der Kühlverteilung). Die Simulationen haben gezeigt, dass eine Überdimensionierung der Wärmeübertragungskapazität des Geocooling-Wärmetauschers wichtig ist.

Eine höhere thermische Leitfähigkeit des Bodens ermöglicht eine geringere Länge der Sonden sowohl für die Heizung als auch für das Geocooling. Eine höhere Sondentiefe, aufgrund der stärkeren Bodenerwärmung, benötigt kürzere Sonden zum heizen aber längere fürs Geocooling. Bei der Simulation des Zollgebäudes wurde eine optimale Tiefe von 150 m bestimmt.

Die Simulation des Gebäudes und des thermo-aktiven Bauteilelementes hat gezeigt, dass eine Kühlung mit einer Vorlaufstemperatur von 22°C möglich ist. Mit einer thermischen Leitfähigkeit des Bodens von 2 W/(mK), einer Anfangstemperatur des Bodens von 12°C in der oberen Schicht und eines geothermischen Temperaturgradientens von 25K/km, wurden die folgenden Dimensionierungsparameter erhalten:

- spezifische Entzugsleistung :	28 W/m
- spezifischer Wärmeentzug :	43 kWh/(m y)
- spezifische Zufuhrleistung :	23 W/m
- spezifische Wärmezufuhr :	26 kWh/(m y)
- Verhältnis von zugeführter zur entnommener Energie :	0.6

Ein Erdwärmesondenfeld besteht aus 10 Erdwärmesonden, die vorgesehen sind, jede Sonde hat eine Tiefe von 150 m und einen Abstand von 8 m untereinander.

Die Energiekosten für Heizung und Kühlung werden auf 10 Rappen pro Kilowatt-Stunde geschätzt, was einer Ausgabe von 5 CHF pro Quadratmeter Energiebezugsfläche und Jahr entspricht. Die Integration und Optimierung eines auf Geocooling basierenden Erdwärmesystems ist eine gute und wirtschaftlich wettbewerbsfähige Lösung für ein mit thermo-aktiven Bauteilelementen ausgestatteten Verwaltungsgebäude.

Table des matières

1. Introduction	2
2. Objectifs	3
3. Simulation thermique du bâtiment de la douane Brogeda-Chiasso.....	4
4. Modèle de simulation du bâtiment et du système géothermique.....	6
4.1 COOLSIM.....	6
4.2 Système de contrôle du bâtiment.....	7
4.3 Exigences thermiques à satisfaire.....	8
5. Dimensionnement de l'installation géothermique avec geocooling	9
5.1 Introduction.....	9
5.2 Procédure de dimensionnement	10
6. Dimensionnement de l'installation géothermique	11
6.1 Détermination des besoins de chauffage	11
6.2 Détermination des besoins de refroidissement	12
6.3 Dimensionnement des sondes géothermiques	13
6.4 Performances thermiques de l'installation géothermique.....	16
7. Sensibilité aux principaux paramètres de dimensionnement.....	19
7.1 Sensibilité à la conductivité thermique du terrain	19
7.2 Sensibilité à l'espacement entre les sondes	22
7.3 Sensibilité à la taille de l'échangeur de chaleur pour le geocooling	25
7.4 Sensibilité à la profondeur des sondes géothermiques.....	26
7.5 Sensibilité à la température initiale du terrain	29
8. Règles simplifiées de dimensionnement	32
9. Aspects économiques	33
10. Conclusions.....	34
11. Remerciements.....	35
12. Références	35

Annexe 1 : Nuovo edificio della dogana commerciale di Chiasso-Brogeda

Annexe 2 : Calcolo del bilancio energetico del nuovo edificio della dogana commerciale di Chiasso-Brogeda

Annexe 3 : The COOLSIM simulation tool

Cette étude a été accomplie sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie. L'auteur est seul responsable du contenu et des conclusions.

1. Introduction

Le nouveau bâtiment de la douane commerciale de Chiasso – Brogeda est un bâtiment administratif de 2'360 m² de surface de référence énergétique répartie sur 6 étages. Construit de manière à respecter le standard Minergie® avec une distribution de chaleur et de froid par dalles actives (donc avec des températures très basses pour le chauffage et très haute pour le refroidissement), il possède de bonnes caractéristiques pour une intégration optimale d'un système de chauffage et de refroidissement couplé à un champ de sondes géothermiques. Malheureusement, l'option « géothermique » n'a pas été retenue, notamment par le manque de connaissance sur le potentiel d'application et sur le dimensionnement d'un tel système.

Ce projet de recherche appliquée veut partir d'un cas concret (qui est le premier bâtiment administratif Minergie® au Tessin) pour évaluer la faisabilité technique et le potentiel énergétique offert par un champ de sondes géothermiques pour couvrir les besoins de chauffage et de refroidissement par « geocooling » du bâtiment.

Dans le chapitre 2 les objectifs de l'étude sont présentés. Le chapitre 3 contient une brève description de la modélisation thermique du bâtiment et des dalles actives. Le modèle complet de simulation, incluant l'installation géothermique, est présenté dans le chapitre 4 et les exigences thermiques à satisfaire sont définies. La problématique et la procédure de dimensionnement sont décrites dans le chapitre 5. Le dimensionnement de l'installation géothermique fait l'objet du chapitre 6 et la longueur totale des sondes requise pour le chauffage et le geocooling est calculée en fonction de la conductivité thermique du terrain. Les performances thermiques du système dimensionné sont montrées. Le chapitre 7 contient les études de sensibilité du dimensionnement à la conductivité thermique du terrain, à l'espacement entre les sondes, à la taille de l'échangeur de chaleur pour le geocooling, à la profondeur des sondes et à la température initiale du terrain. Des règles simplifiées pour un pré-dimensionnement sont présentées dans le chapitre 8 et les aspects économiques dans le chapitre 9. Pour terminer la conclusion fait l'objet du chapitre 10.

2. Objectifs

Les buts principaux du projet sont de simuler le comportement dynamique du bâtiment et des dalles actives en y incluant l'installation géothermique complète du système. Le potentiel de géocooling est ensuite évalué sur la base des résultats des simulations dynamiques obtenues avec l'outil de calcul ainsi élaboré.

Les objectifs de l'étude peuvent se résumer à :

- simuler de façon dynamique le bâtiment (avec les distributions d'énergie de chauffage et de refroidissement) de manière à pouvoir établir de façon précise les besoins en chauffage et en refroidissement avec les niveaux de température associés;
- coupler le modèle de bâtiment au modèle du système de chauffage et de refroidissement pour étudier la faisabilité technique du système, établir le dimensionnement (PAC et champ de sonde) et évaluer le potentiel de «géocooling» offert par les sondes géothermiques;
- analyse de sensibilité et établissement de recommandations et de règles du pouce pour le pré dimensionnement d'un système analogue ;
- estimer le coût de l'énergie de l'installation géothermique avec géocooling.

3. Simulation thermique du bâtiment de la douane Brogeda-Chiasso

Le nouveau bâtiment Minergie[®] de la douane de Brogeda à Chiasso est documenté dans l'annexe 1. Ses caractéristiques géométriques et physiques sont reprises pour la simulation de son comportement thermique avec l'outil de simulation TRNSYS 16.1 (Klein et al., 2007). Le concept thermique du bâtiment est réduit à deux zones pour la simulation des espaces intérieurs. Le TYPE 56 du software TRNSYS est utilisé. Le formalisme développé par Pahud et Travaglini (2000) pour la simulation des dalles actives est appliqué au bâtiment, ce qui nécessite la définition de 4 zones supplémentaires dans le TYPE 56 pour la simulation de ces dernières.

La figure 3.1 montre la décomposition du bâtiment en 6 zones, 2 pour les zones AULA et UFFICI et 4 pour les dalles actives. La zone AULA est définie pour simuler la salle de réunion située au dernier étage et traversant la largeur du bâtiment dans l'axe nord-est sud-ouest. La zone UFFICI correspond à tout le reste du bâtiment chauffé et refroidi.

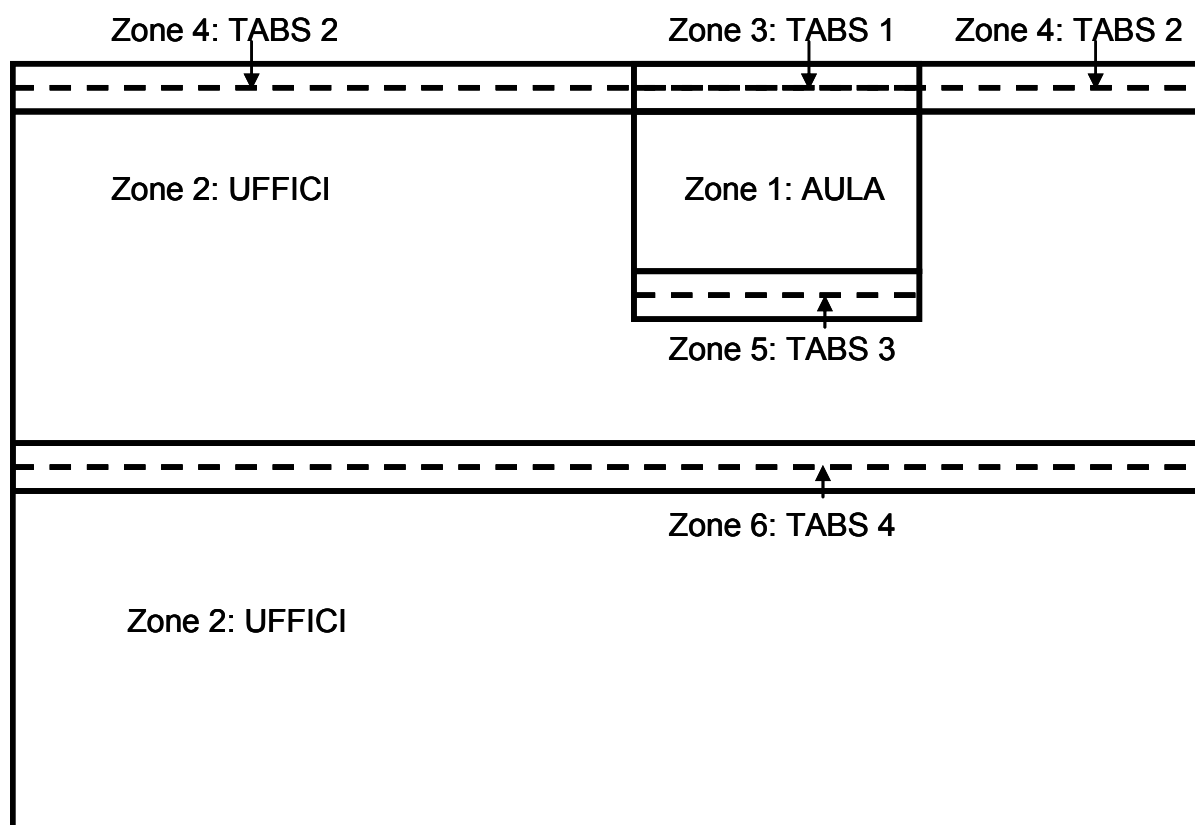


Figure 3.1 Représentation schématisée des zones thermiques définies pour la simulation dynamique du bâtiment et des dalles actives.

Les surfaces de référence énergétique avec correction de hauteur (SRE) des zones 1 (AULA) et 2 (UFFICI) sont de respectivement 90 m^2 et $2'270 \text{ m}^2$. La SRE totale du bâtiment

est donc de $2'360 \text{ m}^2$. La surface de référence énergétique sans correction de hauteur (SREo) est de $2'190 \text{ m}^2$, soit 90 m^2 pour la zone 1 (AULA) et $2'100 \text{ m}^2$ pour la zone 2 (UFFICI).

Les 4 zones pour les dalles actives sont :

- zone 3 (TABS1) : 90 m^2 , dalle du toit séparant l'extérieur et la zone 1 (AULA) ;
- zone 4 (TABS2) : 350 m^2 , dalle du toit séparant l'extérieur et la zone 2 (UFFICI) ;
- zone 5 (TABS3) : 90 m^2 , dalle séparant la zone 1 (AULA) de la zone 2 (UFFICI) ;
- zone 6 (TABS4) : $1'350 \text{ m}^2$, dalles actives comprises à l'intérieur de la zone 2 (UFFICI).

Des calculs ont montré que l'influence du local technique sur le bilan énergétique du bâtiment est négligeable. Ceci a permis de ne pas le prendre en considération et ainsi de simplifier le modèle de simulation.

Les façades comportent une « peau » de verres sérigraphiés, réalisant ainsi un ombrage sur les vitrages du bâtiment (cf. annexe 1). Le calcul des ombrages des verres, implémentés dans le modèle de simulation, est explicité dans l'annexe 2. La définition des gains internes et des taux de renouvellement d'air, basés sur la norme SIA 380/1, ont permis de simuler le bilan énergétique du bâtiment sans les installations techniques (cf. annexe 2). Les demandes annuelles de chauffage et de refroidissement, en prenant compte d'une récupération de chaleur dans le système de ventilation et d'un rafraîchissement nocturne par aération en été, sont calculées à :

- demande d'énergie de chauffage annuelle : 105 MJ/m^2 ou 69 MWh
- demande d'énergie de refroidissement annuelle : 21 MJ/m^2 ou 14 MWh

4. Modèle de simulation du bâtiment et du système géothermique

4.1 COOLSIM

Le deck TRNSYS pour la simulation du bâtiment est couplé au deck qui a été développé pour PILESIM2 (Pahud, 2007). PIL ESIM2 utilise un « user made » TYPE pour la simulation des différents types de système, de la pompe à chaleur, de la machine frigorifique et des contrôles associés. Le code Fortran de ce dernier est adapté pour permettre un contrôle externe et permettre ainsi le couplage du bâtiment au système géothermique. Seul le type de système « pompe à chaleur et géocooling » peut être simulé. Le modèle de simulation permet de prendre en compte de façon dynamique tout ce qui est illustré à l'intérieur de la frontière du système indiquée dans la figure 4.1. Un échangeur de chaleur à contre-courant sépare hydrauliquement le circuit de la distribution de froid avec le circuit des sondes géothermiques. Une application TRNSYS du modèle est créée et appelée COOLSIM (cf. annexe 3).

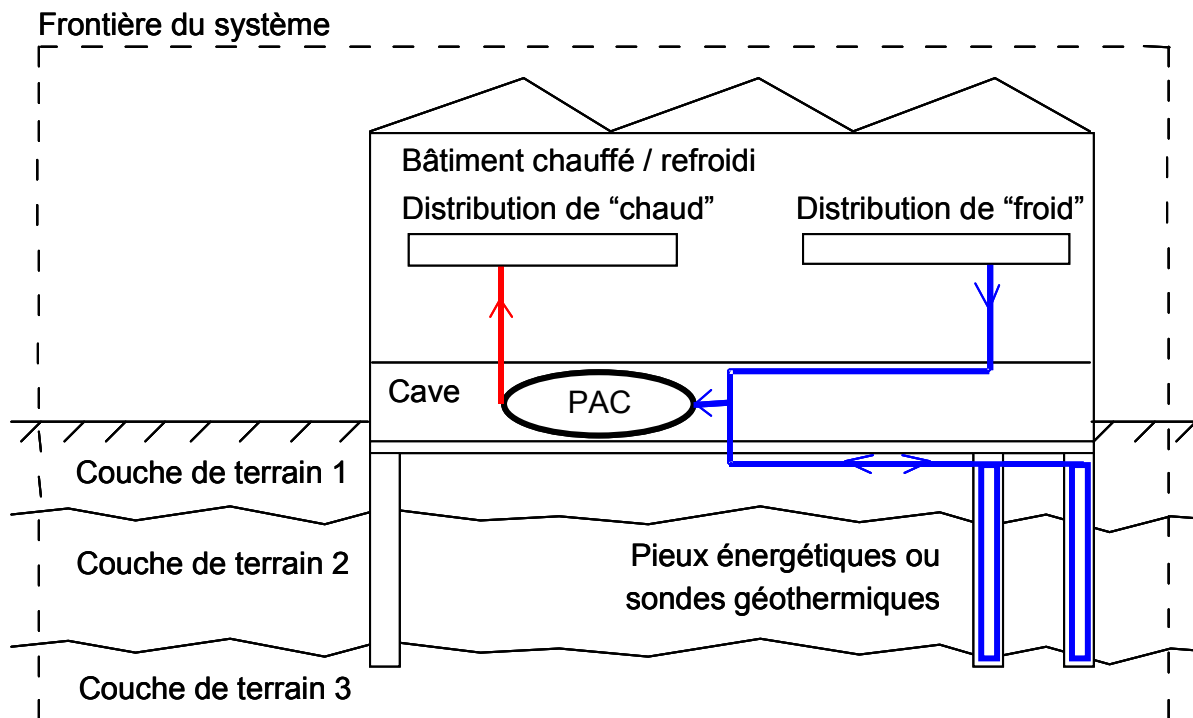


Figure 4.1 Frontière du système simulé par COOLSIM.

Simulation Studio 2006 du package TRNSYS a été utilisé pour développer COOLSIM. Une représentation de COOLSIM dans Simulation Studio 2006 est montrée dans la figure 4.2 sans les unités OUTPUT qui génèrent les résultats de la simulation.

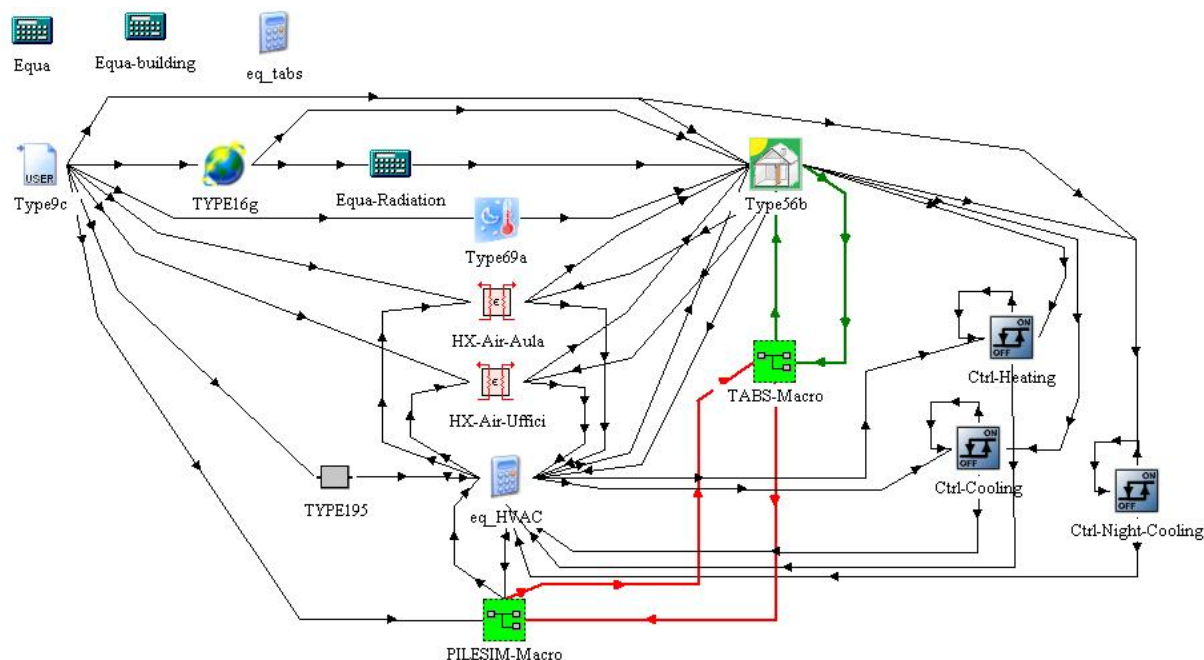


Figure 4.2 Interface Simulation Studio 2006 du package TRNSYS utilisé pour le développement de COOLSIM.

4.2 Système de contrôle du bâtiment

Dans le modèle COOLSIM, les énergies de chauffage et de refroidissement sont exclusivement distribuées par les dalles actives. Pour des raisons de simplification, le système de ventilation n'est pas utilisé pour transporter de l'énergie thermique. Un système de récupération de chaleur est toutefois simulé (cf. unités « HX-Air-Aula » et « HX-Air-Uffici »), ce qui limite une injection d'air trop froid dans les locaux en hiver.

Le système de contrôle du bâtiment est également simplifié au maximum. Trois unités de contrôle ON/OFF sont utilisées :

- « Ctrl-Heating » : contrôle du chauffage par simple différence de température entre la température de l'air intérieure et une valeur de consigne. Une valeur de consigne minimum enclenche le chauffage et une valeur maximum le déclenche.
- « Ctrl-Cooling » : contrôle du refroidissement par simple différence de température entre la température intérieure de l'air et une valeur de consigne. Une valeur de consigne maximum enclenche le refroidissement et une valeur minimum le déclenche. D'autre part, le refroidissement n'est enclenché que pendant la période estivale (cf. annexe 3).
- « Ctrl-Night-Cooling » : contrôle de la ventilation nocturne pour un refroidissement passif et estival. La ventilation nocturne est enclenchée si la température de l'air intérieur dépasse celle de l'air extérieur de 2 K, et déclenchée quand la différence de température devient inférieure à 1 K. En outre la ventilation nocturne n'est permise que pendant la période estivale et pendant la nuit, de 22 heures à 6 heures du matin.

4.3 Exigences thermiques à satisfaire

Le système de contrôle du bâtiment doit être paramétré de façon à pouvoir maintenir la température opérative de l'air intérieur dans la zone de confort tout en utilisant le moins possible d'énergie possible.

Le système géothermique est caractérisé par un « producteur de chaleur » qui injecte une puissance thermique dans le système de distribution du bâtiment (pompe à chaleur), et un « producteur de froid » qui envoie un fluide caloporteur (eau) à une température prescrite dans le système de distribution (geocooling).

Le paramétrage du système de contrôle du bâtiment doit être fait avant de dimensionner les sondes géothermiques. Il est donc suffisant de savoir avec quelle puissance le bâtiment doit être chauffé et avec quelle température (la plus haute possible) il peut être refroidi. Un deck simplifié, appelé TABSIM, est créé sans l'installation géothermique dans le but de pouvoir ajuster les paramètres du système de contrôle.

La norme SIA 382/1 (2007) fixe les exigences de confort en stabilisant des limites sur la température de l'air intérieur. La figure 4.3 permet de montrer les limites de température de la norme et les températures intérieures simulées du bâtiment.

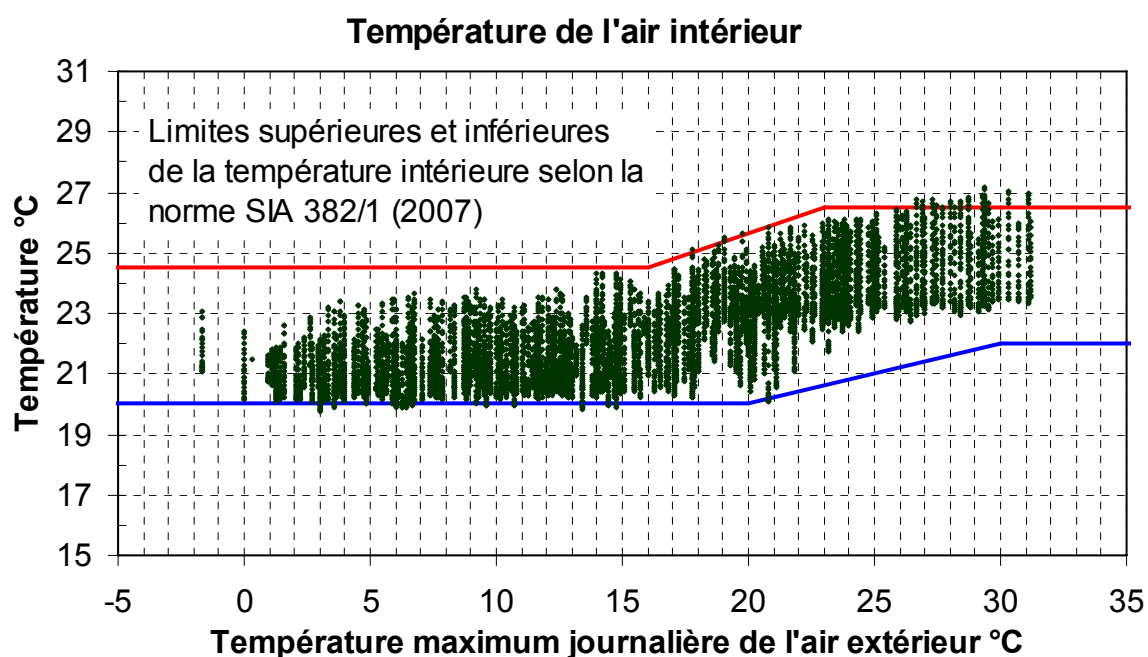


Figure 4.3 Températures intérieures simulées en valeurs horaires ordonnées en fonction de la température journalière maximum de l'air extérieur.

En été la température de l'air intérieur ne devrait pas dépasser **26.5 °C** et ceci même durant les jours de canicule. Toutefois une tolérance est acceptée, et la température maximum peut être dépassée tout au plus pendant **100h par an** durant les heures d'occupation du bâtiment. A titre informatif, les températures simulées dans le graphique de la figure 4.3 dépassent la température maximum permise pendant 43 h/an.

5. Dimensionnement de l'installation géothermique avec geocooling

5.1 Introduction

Le concept de système étudié est basé sur le geocooling (cf. figure 5. 1). Pas de machine frigorifique couplée aux sondes géothermiques n'est simulée. Si une machine frigorifique est utilisée, c'est uniquement dans le but de déshumidifier l'air du système de ventilation avant de le distribuer dans le bâtiment.

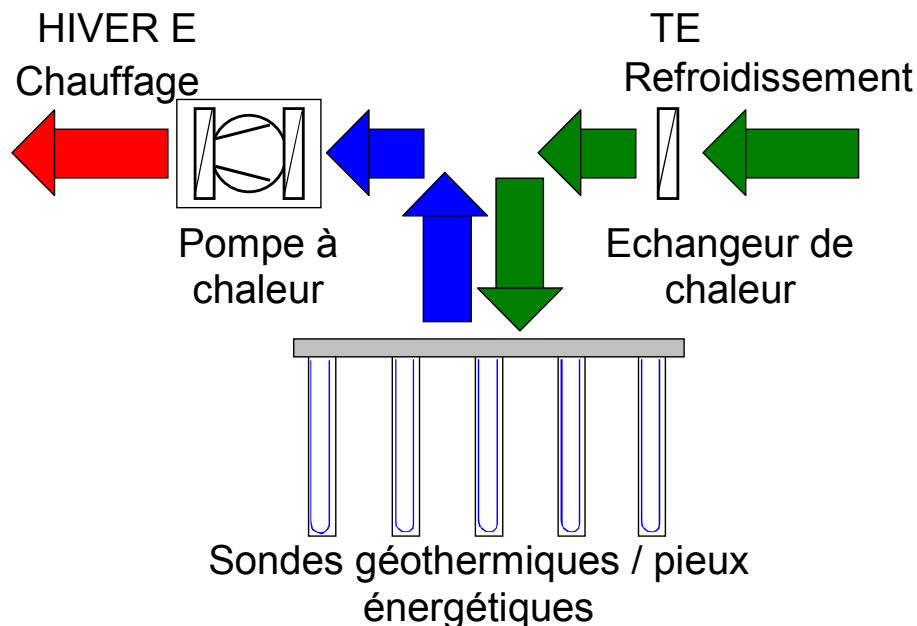


Figure 5.1 Concept de système basé sur le geocooling.

La problématique liée au dimensionnement et à l'optimisation de ce type de système doit prendre en compte une multitude de facteurs. Ils peuvent être regroupés dans les deux catégories suivantes :

- les exigences thermiques à satisfaire;
- les conditions géologiques et hydrogéologiques locales.

Il s'agit de dimensionner la taille de la pompe à chaleur ainsi que le nombre, la longueur et la disposition des sondes géothermiques, aussi bien pour le fonctionnement en chauffage qu'en geocooling.

Le dimensionnement est conditionné par les variations de température permises du fluide circulant dans les sondes. Ces dernières dépendent aussi bien de la dynamique à court terme (intégration dans le système, dimensionnement de la pompe à chaleur, niveaux de température pour le geocooling) que des effets à long terme. Ces derniers, pour une configuration donnée (nombre, longueur et disposition des sondes) et en l'absence d'un écoulement significatif de l'eau souterraine, sont en grande partie influencés par le rapport des énergies annuelles extraites ou injectées dans les sondes.

Dans le cas du bâtiment de la douane de Brogeda-Chiasso les sondes seraient placées sous le bâtiment. Les variations de température du fluide sont conditionnées par :

- la température minimum permise du fluide circulant dans les sondes, fixée à 0°C (avec une marge d'erreur de plus ou moins 1 K) pour ne pas risquer le gel des sondes ;
- la température maximum permise dans les sondes, dont la limite est conditionnée par le niveau de température maximum possible dans la distribution de froid.

La difficulté est d'optimiser le système tout en conservant suffisamment de marge pour tenir compte de conditions d'exploitation ou de paramètres qui ne correspondent plus ou qui peuvent varier relativement aux valeurs de design. Il est donc important de ne pas avoir un dimensionnement trop juste ou trop à la limite du permissible. En particulier, le rapport des énergies thermiques annuelles « injectée » sur « extraite » des sondes ne doit pas être trop faible. On comprend l'importance des simulations, qui permettent d'évaluer la sensibilité du système à telle ou telle variation.

5.2 Procédure de dimensionnement

Dans un premier temps il s'agit de satisfaire les exigences thermiques du bâtiment aussi bien en chauffage qu'en refroidissement et avec les demandes d'énergie annuelles les plus contenues possible. La puissance de chauffage doit être la plus basse possible et la température de refroidissement la plus haute possible.

Une fois les paramètres du bâtiment et du système de distribution d'énergie définis pour le modèle de simulation, les paramètres du système de contrôle, la puissance de chauffage et la température de refroidissement peuvent être ajustés en simulant 1 année complète avec TABSIM. Cette étape permet en outre de dimensionner la puissance de la pompe à chaleur.

Dans un deuxième temps l'ensemble du système est simulé. Une fois les paramètres du système géothermique définis et fixés dans COOLSIM, une série de simulations peut être exécutée en faisant varier les paramètres de dimensionnement des sondes géothermiques.

Un dimensionnement est obtenu lorsque les critères de température imposés sur le fluide caloporteur circulant dans les sondes sont respectés aussi bien à court terme qu'à long terme (20 années ou plus). Le meilleur dimensionnement est celui qui, compte tenu des incertitudes sur les paramètres d'entrée, permet de satisfaire les critères de température avec la longueur de sondes géothermiques la plus courte possible.

Plus précisément, les critères de température sont satisfaits si :

- la température du fluide dans les sondes reste toujours supérieure à la valeur minimum prescrite ;
- la tolérance de confort (nombre d'heures par année avec une température intérieure supérieure à 26.5°C) n'excède pas celle qui a été établie dans la première étape pour la détermination des paramètres du système de contrôle du bâtiment, et ceci pour toutes les années simulées.

6. Dimensionnement de l'installation géothermique

6.1 Détermination des besoins de chauffage

TABSIM est utilisé dans un premier temps pour déterminer les paramètres de contrôle du chauffage et les besoins qui en découlent. Les paramètres relatifs au refroidissement sont fixés à des valeurs plausibles mais n'ont pas besoin d'être à leurs valeurs optimales.

Les besoins de chauffage sont satisfaits si la température des locaux reste au-dessus de 20°C en hiver. Si le système de chauffage et sa régulation ne permettent pas de satisfaire cette exigence, la température des locaux sera par moment inférieure à 20°C. Afin de mesurer l'importance de cet écart, les degrés-heures annuels de la différence de température « consigne (20°C) – air des locaux » est calculée pour toutes les valeurs positives.

Dans la figure 6.1, les degré-heures sont montrés en fonction de la puissance de chauffage et de trois intervalles de contrôle du chauffage (le chauffage est contrôlé avec la température intérieure). L'énergie annuelle de chauffage qui en résulte est également indiquée.

Un ensemble de paramètres est satisfaisant si le nombre de degré-heure est quasiment nul avec la puissance de chauffage la plus contenue possible. Pour la simulation du bâtiment de la douane, les paramètres choisis sont :

- puissance de chauffage : 55 kW ou 23 W/m²
- enclenchement du chauffage si la température intérieure descend en dessous de : 20.5°C
- déclenchement du chauffage si la température intérieure monte en dessus de : 21°C

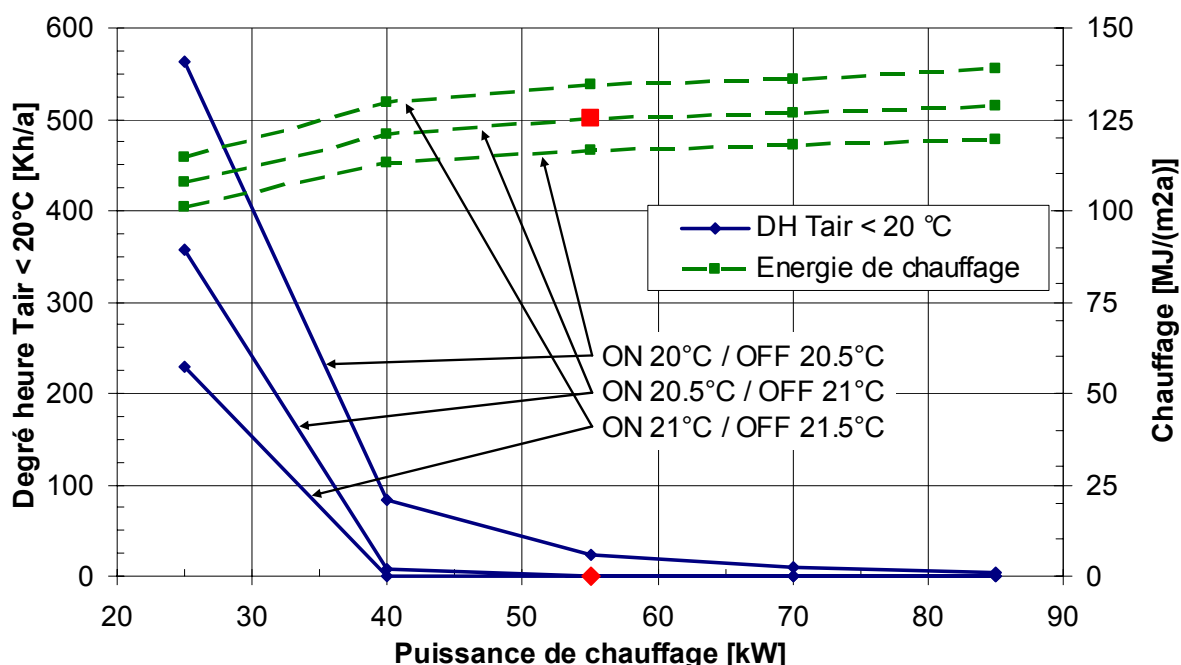


Figure 6.1 Ajustement des paramètres de chauffage (puissance de chauffage et contrôle) afin de garantir un nombre de degré-heure quasiment nul.

Energie de chauffage simulée : 82 MWh/a ou 125 MJ/(m²a)

6.2 Détermination des besoins de refroidissement

De façon analogue TABSIM est utilisé pour déterminer les paramètres de contrôle du refroidissement et les besoins qui en dérivent.

Le critère de la norme SIA 382/1 est utilisé. Le nombre des heures pour lesquelles la température intérieure dépasse 26.5°C est calculé.

Dans la figure 6.2, le nombre d'heures est montré en fonction de la température de départ dans la distribution de refroidissement et de trois intervalles de contrôle du refroidissement (le refroidissement est contrôlé avec la température intérieure). L'énergie annuelle de refroidissement qui en résulte est également indiquée.

Un ensemble de paramètres est satisfaisant si le nombre d'heures pour lesquelles la température intérieure est supérieure à 26.5°C ne dépasse pas 50 h/a. On cherche un ensemble de paramètres pour lesquels la température de départ dans la distribution de refroidissement est la plus élevée possible. Pour la simulation du bâtiment de la douane, les paramètres choisis sont :

- température de départ pour le refroidissement : 22°C
- enclenchement du refroidissement si la température intérieure monte en dessus de : 25°C
- déclenchement du refroidissement si la température intérieure descend en dessous de : 24°C

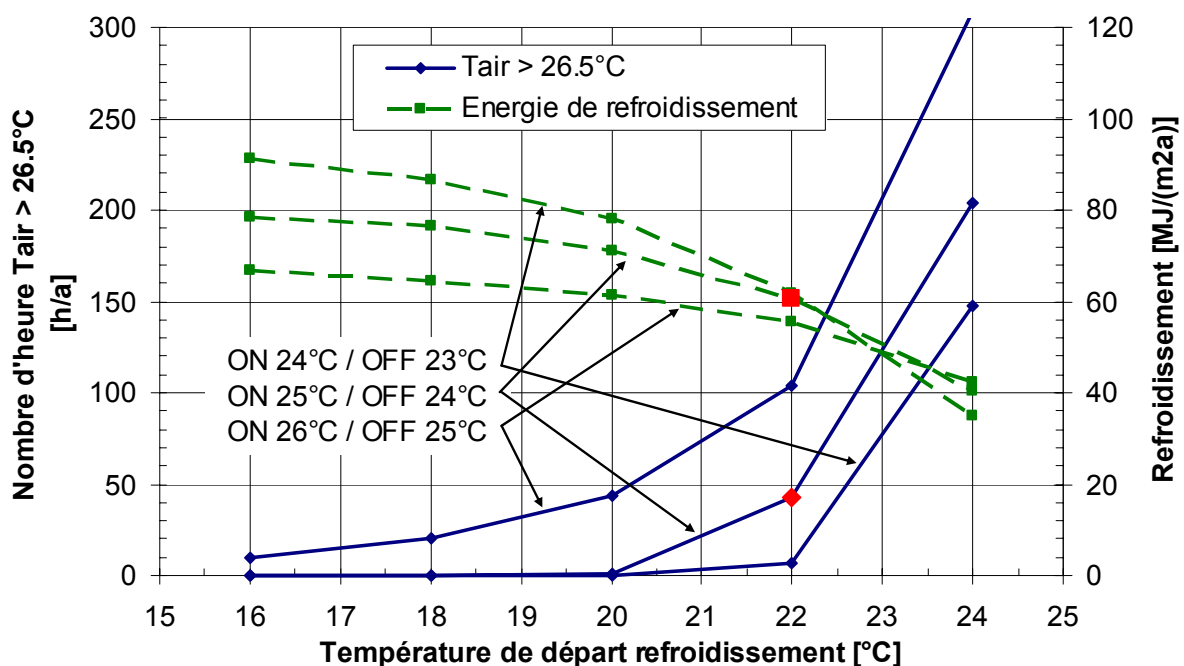


Figure 6.2 Ajustement des paramètres de refroidissement (température de départ de refroidissement et contrôle) afin de garantir un nombre d'heures inférieur à 50 h/a.

Puissance de refroidissement maximum simulée : 49 kW ou 21 W/m

Energie de refroidissement simulée : 40 MWh/a ou 60 MJ/(m²a)

Les températures intérieures montrées dans la figure 4.3 ont été simulées avec les paramètres de chauffage et de refroidissement ajustés dans ce chapitre.

6.3 Dimensionnement des sondes géothermiques

Le système géothermique doit être défini et les paramètres de simulation entrés dans COOLSIM avant de pouvoir exécuter une simulation. Le dimensionnement du système est obtenu par simulations itératives jusqu'à ce que les paramètres de dimensionnement soient correctement ajustés. COOLSIM permet de faire une série de simulation avec un nombre arbitraire de paramètres.

Dans un premier temps les paramètres du système géothermique sont définis. Il s'agit de caractériser la pompe à chaleur, l'échangeur de chaleur dans la distribution de refroidissement, l'interface terrain-bâtiment, les sondes géothermiques et les propriétés thermiques du terrain.

Pompe à chaleur (PAC)

Puissance thermique nominale de la PAC au condenseur : 55 kW

Coefficient de performance nominal (COP_o) de la PAC : 4.0 -

Les conditions de température nominales sont B0W35 :

température d'entrée du fluide caloporteur dans l'évaporateur 0 °C

température de sortie de l'eau du condenseur 35 °C

La puissance nominale d'extraction à l'évaporateur de la PAC est donc de 41 kW. Les performances thermiques de la PAC sont calculées en fonction des niveaux de température dans l'évaporateur et le condenseur. Une pénalité de 0.5 est prise sur le COP pour prendre en compte les effets transitoires d'enclenchement et de déclenchement de la machine.

Echangeur de chaleur pour le geocooling

Un échangeur de chaleur à contre-courant sépare physiquement le circuit de la distribution de refroidissement avec celui des sondes géothermiques. Il permet également de contrôler la température de départ dans la distribution de froid (22°C) en évitant de partir avec une température trop basse.

Facteur d'échange UA de l'échangeur de chaleur : 30 kW/K

Le transfert d'une puissance thermique de 50 kW crée une perte de température de 1.7 K dans l'échangeur de chaleur.

Interface terrain-bâtiment

Les sondes géothermiques sont placées sous le bâtiment. Une cave non chauffée est simulée entre les zones chauffées et refroidies du bâtiment et le terrain. La température de la cave résulte des pertes thermiques du bâtiment vers la cave, d'un taux de renouvellement d'air minimum avec l'air extérieur et des transferts thermiques avec le terrain au travers de la dalle de fondation du bâtiment.

Pertes spécifiques entre les zones chauffées et la cave : 129 W/K

(cette valeur doit correspondre à celle qui est définie dans la définition thermique du bâtiment)

Taux de renouvellement d'air avec l'extérieur : 0.2 h⁻¹

Epaisseur de la dalle de fondation du bâtiment : 0.5 m

Longueur des raccords horizontaux entre les sondes : N x 8 m

(un espacement de 8 m est supposé entre les sondes. N est leur nombre total)

Sondes géothermiques

Les caractéristiques des sondes géothermiques sont définies comme suit :

Nombre de sonde géothermiques : N -

(le nombre n'est pas encore défini)

Profondeur ou longueur active d'une sonde géothermique : 100 m

Diamètre de perforation d'une sonde géothermique : 0.13 m

Résistance thermique d'une sonde géothermique (R_b) : 0.13 K/(W/m)

Résistance thermique interne d'une sonde géothermiques (R_a) : 0.4 K/(W/m)

Distance entre les sondes géothermiques : 8 m

Propriétés thermiques du terrain

Un terrain uniforme est pris en compte, même si COOLSI M est capable de prendre jusqu'à trois couches de terrain horizontales avec des propriétés thermiques différentes.

Conductivité thermique du terrain : 2.0 W/(mK)

Capacité thermique volumique du terrain : 2.2 MJ/(m³K)

Température du terrain naturelle vers la surface : 12 °C

Gradient de température géothermique : 25 K/km

L'installation géothermique et le bâtiment sont simulés 7 fois avec COOLSI M en faisant varier la longueur totale des sondes géothermiques entre 1'000 et 3'000 m. De façon à prendre en compte les effets thermiques à long terme dans le terrain, une vingtaine d'années sont simulées. Une simulation prend environ 20 minutes sur un PC avec processeur pentium M de 1.7 GHz.

Dans la figure 6.3, les critères hivernal et estival pour le dimensionnement des sondes sont montrés en fonction de la puissance nominale extraite par mètre de sonde. La température minimum du fluide qui circule dans les sondes est la valeur minimum sur les 20 premières années de simulation. Il en va de même pour le nombre des heures annuelles. La plus défavorable des 20 premières est montrée. Pour le cas simulé, il s'agit de la première année de simulation, étant donné que l'énergie annuelle extraite est supérieure à l'énergie injectée

par geocooling, ce qui induit un léger abaissement de la température du terrain dans le volume délimité par les sondes.

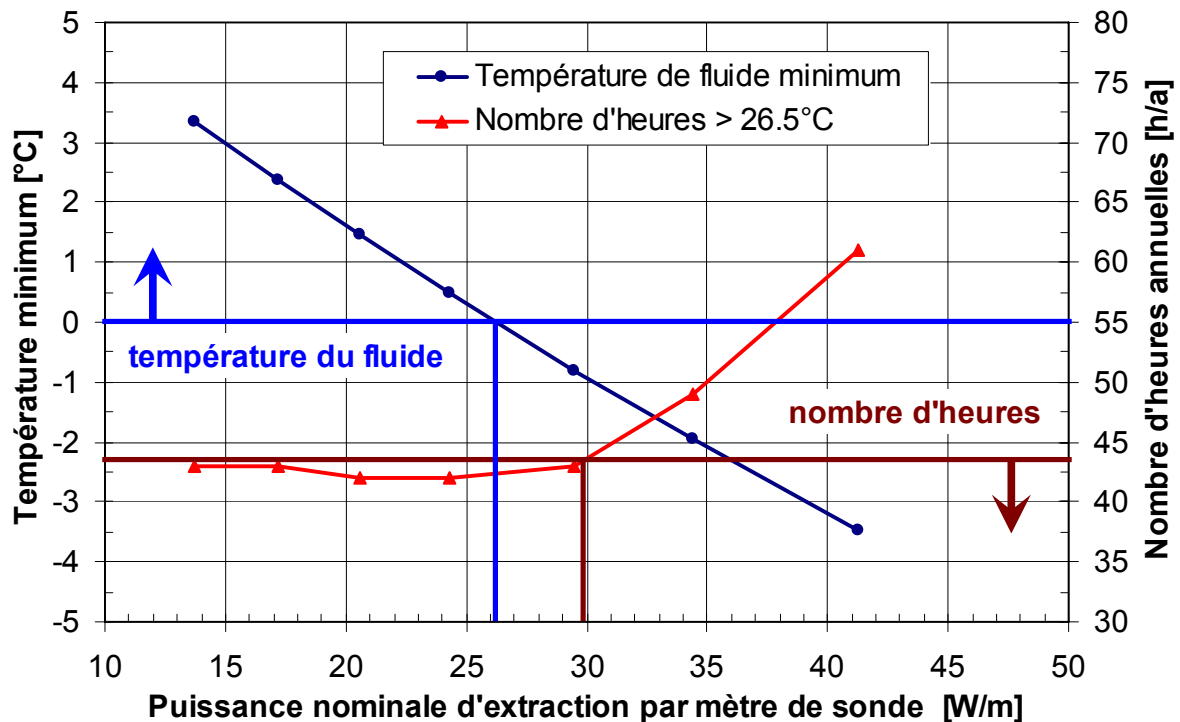


Figure 6.3 Critères hivernal et estival pour le dimensionnement de la longueur des sondes montrés en fonction de la puissance nominale extraite par mètre de sonde.

Le critère hivernal, qui fixe une température de retour du fluide dans les sondes toujours supérieure à 0°C, exige un dimensionnement à 26 W/m. La longueur totale des sondes requises est donc de 1'600 m pour l'hiver.

Le critère estival requiert que le nombre d'heures pour lequel la température intérieure du bâtiment dépasse 26.5°C n'excède pas celui qui a été établi lors de la détermination des besoins de refroidissement. Le critère estival est encore respecté avec un dimensionnement à 30 W/m. La longueur totale des sondes requise est donc de 1'400 m pour le geocooling.

Dans ce cas, et grâce à un geocooling à « haute température », le dimensionnement hivernal permet également de satisfaire le dimensionnement estival. Un dimensionnement possible est donc donné par :

- nombre de sondes géothermiques : 16 –
- longueur d'une sonde géothermique : 100 m
- espacement entre les sondes : 8 m

6.4 Performances thermiques de l'installation géothermique

Les performances thermiques du système géothermique simulé avec le dimensionnement obtenu dans la section précédente sont montrées dans les figures 6.4 à 6.6.

Bâtiment

Building energy indexes

mean operation year

Heating

Building annual heating demand	129	MJ/(m ² y)	Energy reference area 2'360 m ²
	84'400	kWh/y	
Heat pump operation time	1'440	h/y	
Maximum heat pump thermal power	72	kW	30 W/m ²
Mean heat pump thermal power	59	kW	25 W/m ²

Cooling

Building annual cooling demand	59	MJ/(m ² y)	
	38'500	kWh/y	
Geocooling operation time	1'110	h/y	
Maximum geocooling thermal power	49	kW	21 W/m ²
Mean geocooling thermal power	35	kW	15 W/m ²

Building air temperature

Operative indoor air temperature below 20°C during building occupation			
hours per year	0	h/y	
degree-hours per year	0	Kh/y	
heating period fraction	0	%	
Operative indoor air temperature over 26°C during building occupation			
hours per year	63	h/y	
degree-hours per year	15	Kh/y	
cooling period fraction	5	%	
Indoor air temperature over 26.5°C during building occupation for the last simulated year			
hours per year	31	h/y (max. 100 h/y according to SIA 382/1)	

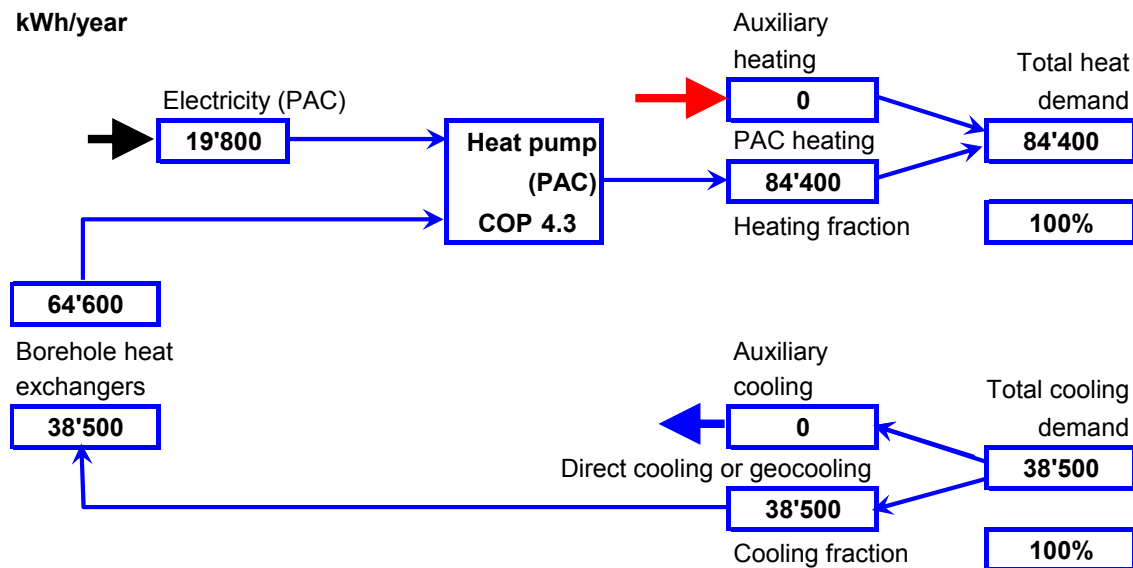
Figure 6.4 Energies annuelles, puissances de pointe et moyennes, et critères pour la satisfaction des exigences thermiques.

La puissance maximum de la pompe à chaleur atteint 72 kW. Cette valeur est plus élevée que la puissance nominale (55 kW) en raison de températures de travail plus favorables que celles des conditions nominales (S0W35). Les températures de départ et de retour de l'eau qui circule dans les dalles actives ne dépassent pas respectivement 27°C et 25°C (cf. figure A3.6 de l'annexe 3). La température de retour des dalles actives est également celle de retour dans le condenseur de la pompe chaleur. La température de sortie de ce dernier, avec une différence de température entrée – sortie de 10 K, atteint 35°C au maximum.

Installation géothermique

System heat balance

kWh/year



Heating

Building annual heating demand

129 MJ/(m²y)

Energy reference area

2'360 m²

Maximum heat extraction rate per meter borehole

36 W/m

Mean heat extraction rate per meter borehole

28 W/m

Extraction duration

1'440 h/y

Annual extracted energy per meter borehole

40 kWh/m/year

Cooling

Building annual cooling demand

59 MJ/(m²y)

Maximum heat injection rate per meter borehole

31 W/m

Mean heat injection rate per meter borehole

22 W/m

Injection duration

1'110 h/y

Annual injected energy per meter borehole

24 kWh/m/year

Ground heat balance

Ratio injected over extracted energy

60%

Figure 6.5 Bilan énergétique moyen de l'installation géothermique sur les 20 premières années et clefs de dimensionnement du système. La longueur totale des sondes géothermiques est de 1'600 mètres.

On peut noter que la puissance nominale d'extraction spécifique est de 26 W/m. Comme la puissance d'extraction moyenne est légèrement supérieure à la puissance d'extraction nominale, la puissance moyenne d'extraction spécifique est un peu plus élevée avec une valeur de 28 W/m. La puissance maximum d'extraction spécifique, quant à elle, est sensiblement plus élevée (36 W/m), mais elle est ponctuelle et sans relevance pour un dimensionnement. Pour tous les dimensionnements réalisés dans cette étude, la clef d'extraction spécifique est donnée relativement à la puissance d'extraction nominale.

La puissance moyenne d'injection spécifique est favorable pour du geocooling (22 W/m). Elle confirme l'effet bénéfique de pouvoir refroidir un bâtiment avec une température de départ élevée (22°C).

Le ratio entre l'énergie annuelle de refroidissement et l'énergie annuelle de chauffage est de 0.46. Il en résulte un bilan d'énergie injecté – extrait sur les sondes de 60% (i.e. 60% de l'énergie extraite annuellement est réinjectée par geocooling).

Dans la figure 6.6, les températures mensuelles maximum et minimum du fluide circulant dans les sondes sont montrées pour les 20 premières années de fonctionnement du système.

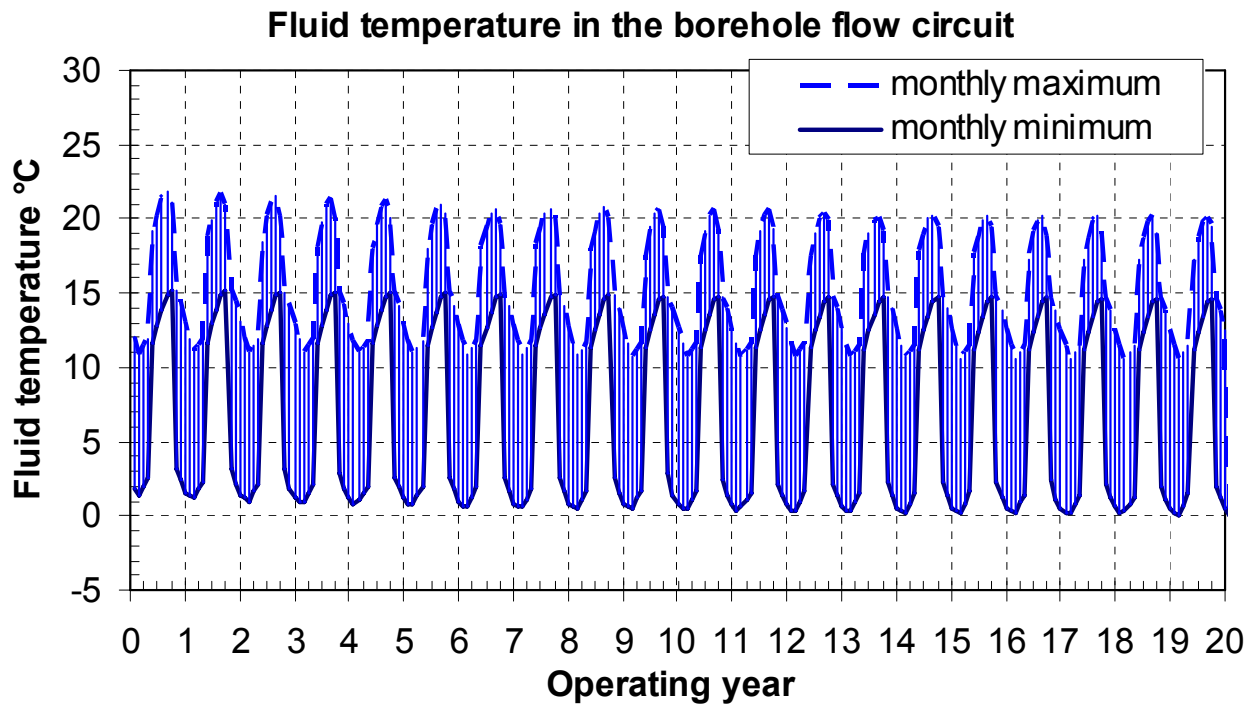


Figure 6.6 Températures mensuelles maximum et minimum du fluide circulant dans les sondes pour les 20 premières années de fonctionnement du système.

7. Sensibilité aux principaux paramètres de dimensionnement

Dans ce chapitre, la sensibilité du dimensionnement à la conductivité thermique du terrain, à l'espacement entre les sondes, à la taille de l'échangeur de chaleur pour le geocooling, à la profondeur des sondes et à la température initiale du terrain est évaluée.

7.1 Sensibilité à la conductivité thermique du terrain

La conductivité thermique du terrain est variée de 1.5 W/(mK) à 4 W/(mK) avec un pas de 0.5 W/(mK).

Dans la figure 7.1, le critère hivernal est montré pour chaque valeur de conductivité thermique du terrain simulée en fonction de la puissance nominale extraite par mètre de sonde. La clef de dimensionnement hivernale augmente très fortement (de 22 W/m à 39 W/m) avec l'augmentation de la conductivité thermique. Ceci confirme que la conductivité thermique du terrain est un des paramètres fondamentaux pour le dimensionnement d'un champ de sondes géothermiques.

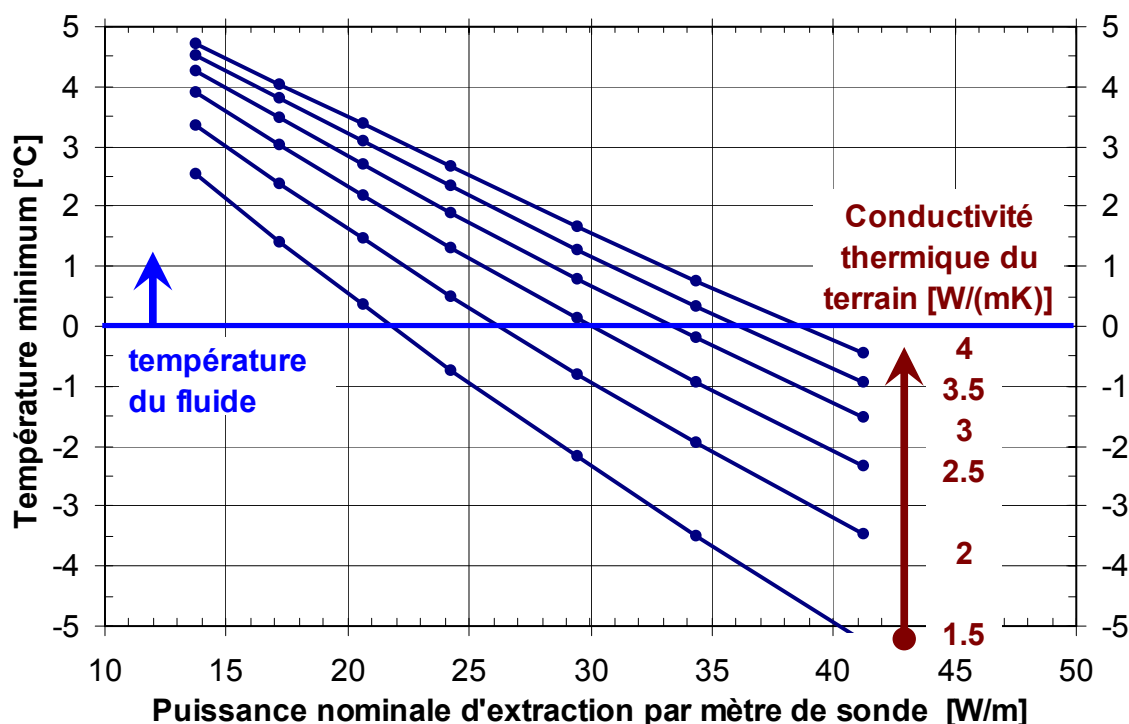


Figure 7.1 Critère hivernal pour le dimensionnement de la longueur des sondes montré en fonction de la puissance nominale extraite par mètre de sonde et pour les différentes valeurs de conductivité thermique du terrain simulées.

Le critère estival est montré dans la figure 7.2. Il est reporté en fonction de la puissance moyenne injectée par mètre de sonde.

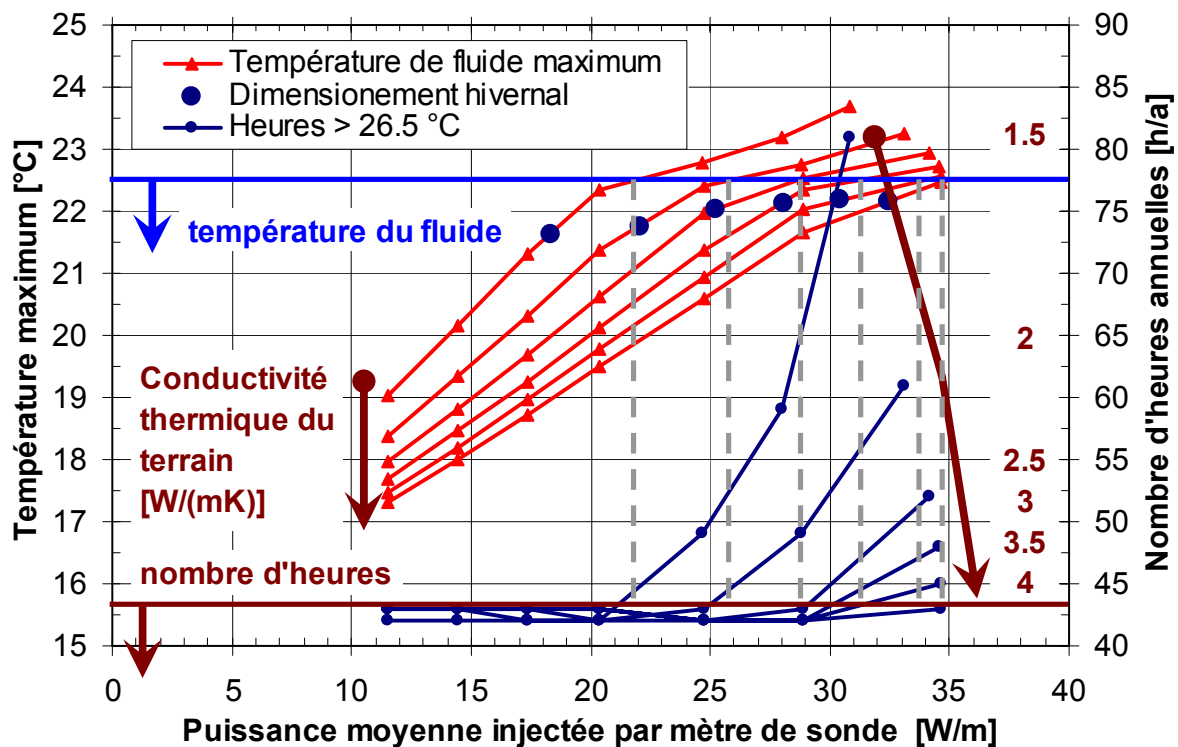


Figure 7.2 Critère estival pour le dimensionnement de la longueur des sondes montré en fonction de la puissance moyenne injectée par mètre de sonde et pour les différentes valeurs de conductivité thermique du terrain simulées.

La clef de dimensionnement estivale augmente également avec une conductivité thermique du terrain plus élevée. La variation de 1.5 à 4 W/(mK) de cette dernière fait augmenter la clef de 22 à 35 W/m. Il s'agit ici de la puissance moyenne injectée par mètre de sonde. Ces valeurs sont particulièrement élevées et témoignent du bénéfice de pouvoir rafraîchir le bâtiment avec une température de départ élevée (22°C).

On peut remarquer une correspondance entre la clef de dimensionnement estivale et la température maximum simulée dans le circuit des sondes. Le critère estival (i.e. la satisfaction des besoins de refroidissement par geocooling) est respecté si la température du fluide ne dépasse pas 22.5°C.

Les points bleus sur les courbes des températures maximums montrent le dimensionnement hivernal (i.e. qui permet d'assurer une température positive dans le circuit des sondes). Ils sont tous sous la barre des 22.5°C, ce qui signifie que le dimensionnement hivernal est également valable pour le dimensionnement estival dans ce cas.

Avec le cas simulé, un refroidissement avec une température de départ de 22°C permet une température maximum dans les sondes de 22.5°C. Par analogie, si le refroidissement doit être fait avec une température de départ de 20°C, il devrait correspondre une température maximum de 20.5°C dans les sondes. En procédant ainsi, on peut, sur la base de toutes les simulations exécutées, extrapoler le dimensionnement estival en fonction de la température de départ requise dans la distribution de refroidissement.

La figure 7.3 permet de déterminer graphiquement les clefs de dimensionnement hivernales et estivales pour le cas de la douane en fonction de la conductivité thermique du terrain, et

pour différentes températures de départ dans la distribution de refroidissement. Les clefs de dimensionnement sont données en fonction de la puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. définie aux conditions B0W35), utilisée comme facteur d'échelle.

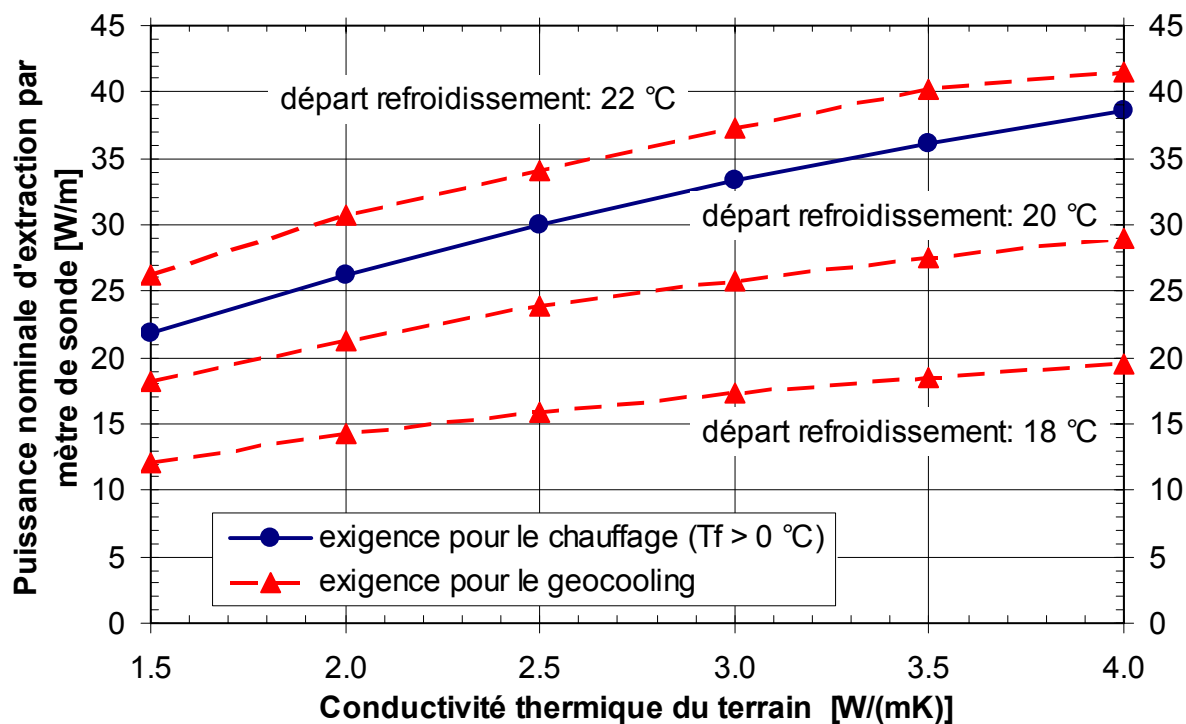


Figure 7.3 Clefs de dimensionnement hivernales et estivales pour le cas de la douane en fonction de la conductivité thermique du terrain. Les clefs de dimensionnement pour le geocooling sont données pour diverses de températures de départ dans la distribution de refroidissement. La puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. aux conditions B0W35) est choisie comme facteur d'échelle aussi bien pour les clefs de chauffage que de refroidissement.

La figure 7.3 permet de montrer que le dimensionnement hivernal suffit pour le dimensionnement estival (geocooling) si le bâtiment peut être refroidi avec une température de départ de 22°C. Pour des températures plus basses, la longueur des sondes doit être augmentée. L'augmentation devient très importante pour une température de départ de 18°C (presqu'un facteur 2). Il est donc très important d'avoir une différence de température suffisante entre la température initiale du terrain et la température de départ dans la distribution de refroidissement.

A titre de rappel la demande annuelle d'énergie de chauffage (84 MWh/a) est deux fois plus élevée que la demande annuelle de refroidissement (39 MWh/a). La simulation du système montre que l'énergie annuelle injectée dans le terrain par geocooling correspond à 60% de l'énergie annuelle extraite du terrain avec la pompe à chaleur. Il s'ensuit un léger abaissement des températures du terrain au cours des années qui se répercute sur la température du fluide dans les sondes (cf. figure 6.6). Le dimensionnement estival se fait donc sur la première année de fonctionnement. Cela signifie que si la totalité des besoins de

refroidissement par geo cooling peut être couverte la première année, elle le sera à fortiori pour les années suivantes.

7.2 Sensibilité à l'espacement entre les sondes

L'espacement entre les sondes est varié de 6 à 14 m comme suit : 6, 8, 10 et 14m.

Dans la figure 7.4, le critère hivernal est montré pour chaque valeur d'espacement entre les sondes et pour une conductivité thermique du terrain de 1.5 et 3.5 W/(mK). Il est reporté en fonction de la puissance nominale extraite par mètre de sonde.

Comme attendu, la clef de dimensionnement hivernale augmente avec un espacement plus grand. Toutefois la variation est relativement peu sensible à l'espacement (variation de 3 à 4 W/m). Ceci s'explique par le fait que 60% de l'énergie annuellement prélevée est réinjectée dans le terrain, ce qui ne conduit pas à un déséquilibre excessif du bilan annuel sur les sondes. En effet, la conséquence négative d'un déséquilibre excessif peut être atténuée par un espacement plus grand entre les sondes.

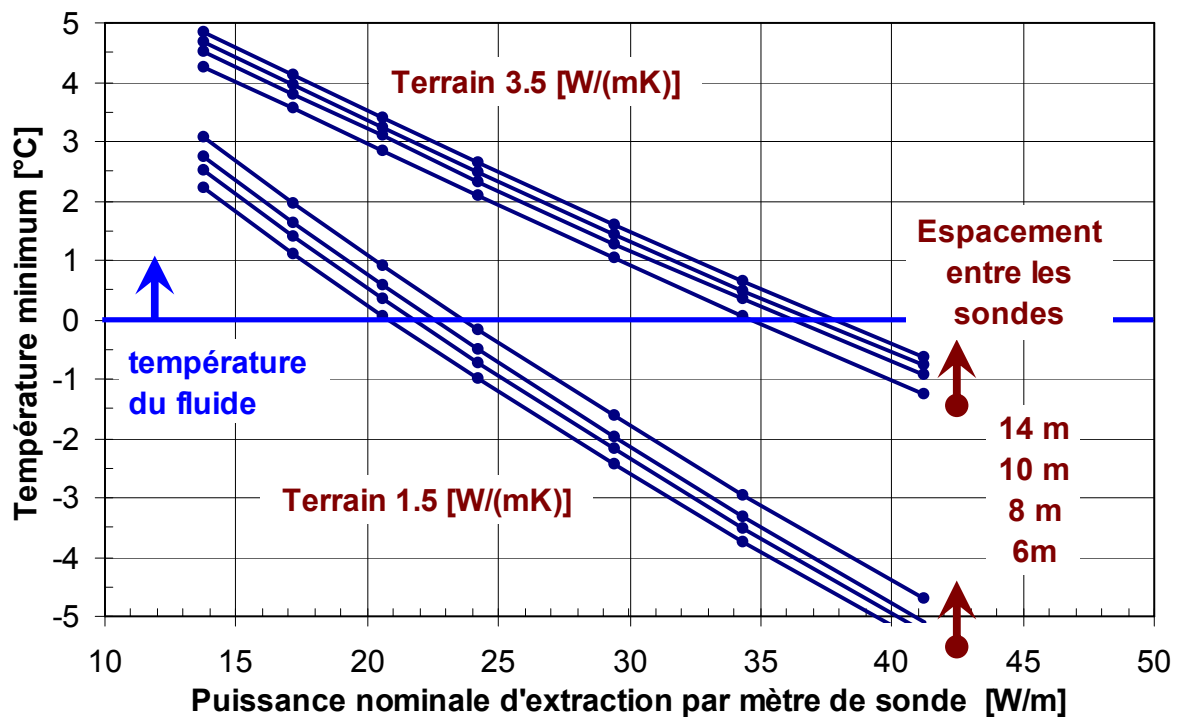


Figure 7.4 Critère hivernal pour le dimensionnement de la longueur des sondes montré en fonction de divers espacements entre les sondes et pour deux valeurs de conductivité thermique du terrain. La puissance nominale extraite par mètre de sonde est définie avec la puissance frigorifique de la PAC aux conditions B0W35.

Le critère estival est montré dans la figure 7.5. Il est reporté en fonction de la puissance moyenne injectée par mètre de sonde.

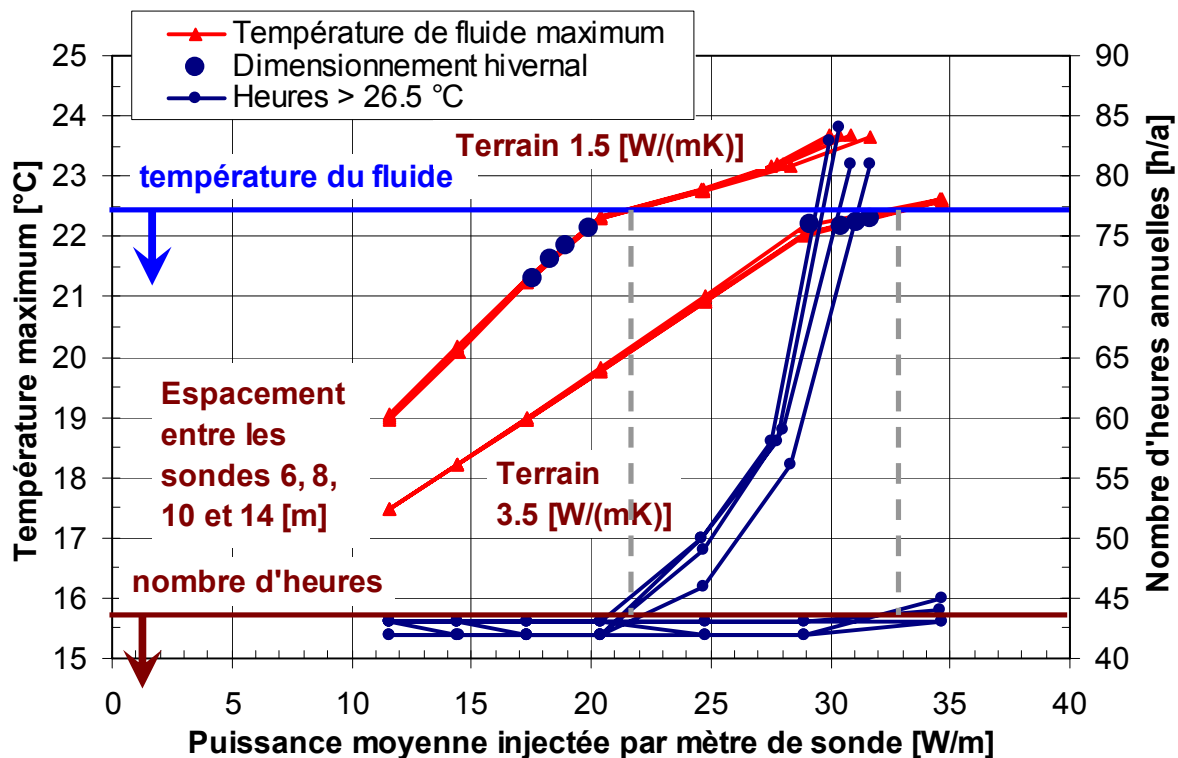


Figure 7.5 Critère estival pour le dimensionnement de la longueur de sondes pour divers espacements entre les sondes et pour deux valeurs de conductivité thermique du terrain. La puissance moyenne d'injection est déterminée par l'énergie et la durée de fonctionnement annuel en geocooling.

Dans ce cas la clef de dimensionnement estivale ne dépend pas de l'espacement entre les sondes. Ceci s'explique par le fait que pour des espacements supérieurs à environ 5 mètres, les influences thermiques entre les sondes se manifestent après plusieurs années. Comme le dimensionnement estival se fait sur la première année, l'influence est donc quasiment nulle.

Comme précédemment, on peut remarquer une correspondance entre la clef de dimensionnement estivale et la température maximum simulée dans le circuit des sondes. Le critère estival (i.e. la satisfaction des besoins de refroidissement par geocooling) est respecté si la température du fluide ne dépasse pas 22.5°C.

Les points bleus sur les courbes des températures maximums montrent le dimensionnement hivernal (i.e. qui permet d'assurer une température positive dans le circuit des sondes). Ils sont tous sous la barre des 22.5°C, ce qui signifie que le dimensionnement hivernal est également valable pour le dimensionnement estival dans ce cas.

La figure 7.6 permet de déterminer graphiquement les clefs de dimensionnement hivernales et estivales pour le cas de la douane en fonction de l'espacement entre les sondes et pour deux valeurs de conductivité thermique. Les clefs de dimensionnement sont données en fonction de la puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. définie aux conditions B0W35), utilisée comme facteur d'échelle. Comme mentionné précédemment, un espacement plus grand permet d'atténuer les influences thermiques à long terme entre les

sondes. La clef de dimensionnement hivernale, qui dépend dans ce cas des effets à long terme, est améliorée.

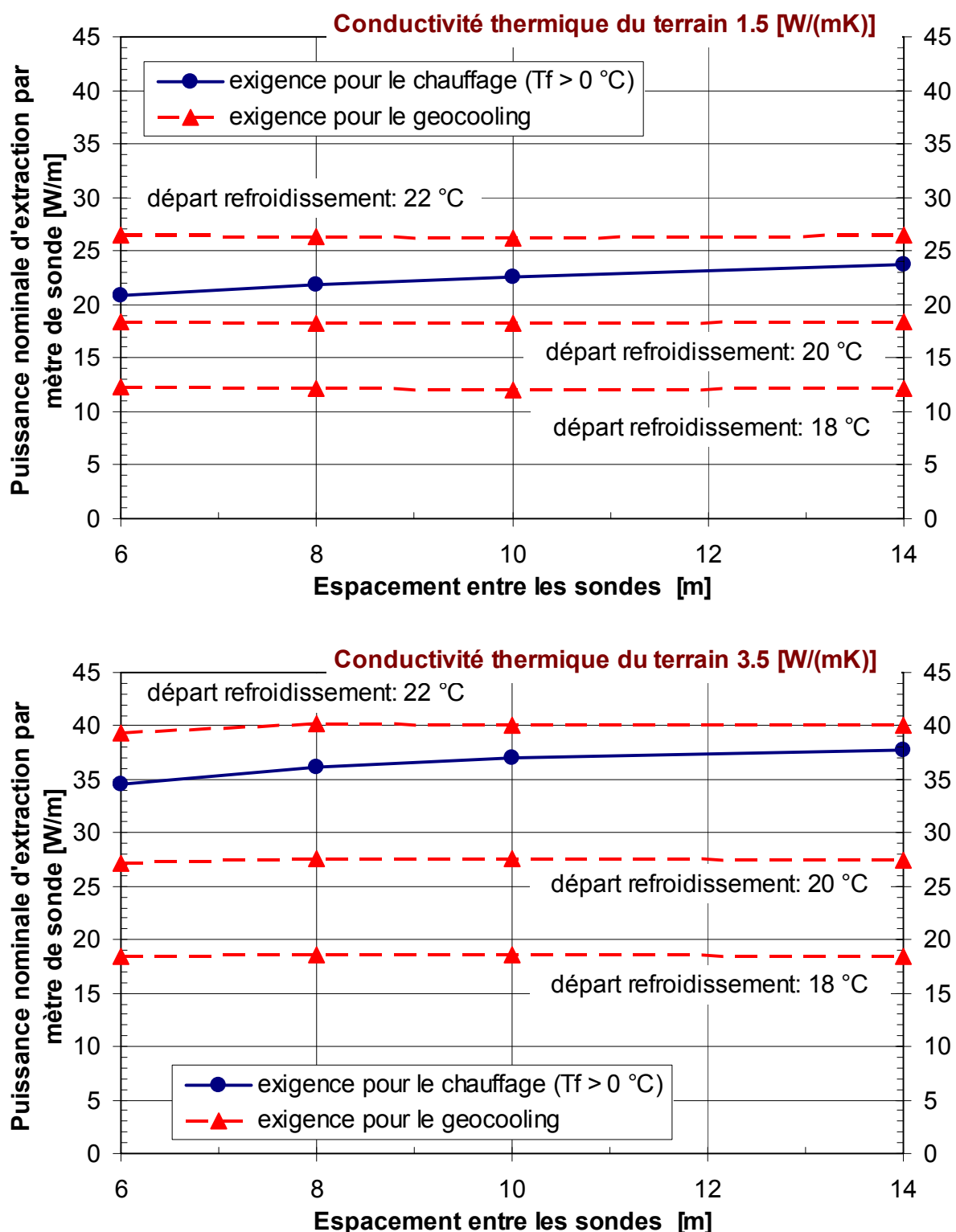


Figure 7.6 Clefs de dimensionnement hivernales et estivales pour le cas de la douane en fonction de l'espacement entre les sondes et de deux valeurs de la conductivité thermique du terrain. Les clefs de dimensionnement pour le geocooling sont données pour diverses températures de départ dans la distribution de refroidissement. La puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. au x

conditions B0W35) est choisie comme facteur d'échelle aussi bien pour les clefs de chauffage que de refroidissement.

7.3 Sensibilité à la taille de l'échangeur de chaleur pour le geocooling

La taille de l'échangeur de chaleur à contre-courant entre le circuit de distribution de refroidissement dans le bâtiment et le circuit des sondes géothermiques est variée. Dans les simulations, un facteur d'échange UA de 30 kW/K est défini. Dans cette section, le facteur d'échange UA est varié de 10 à 30 kW/K avec un pas de 10 kW/K. La puissance maximum simulée de geocooling est de 49 kW (cf. figure 6.4). Avec un facteur d'échange UA de 10 kW/K, une perte de température de pratiquement 5 K est créée par le transfert de cette puissance.

Comme attendu, le critère hivernal n'est pas influencé par la taille de l'échangeur pour le geocooling.

Le critère estival, quant à lui, est montré dans la figure 7.7. Il est reporté en fonction de la puissance moyenne injectée par mètre de sonde.

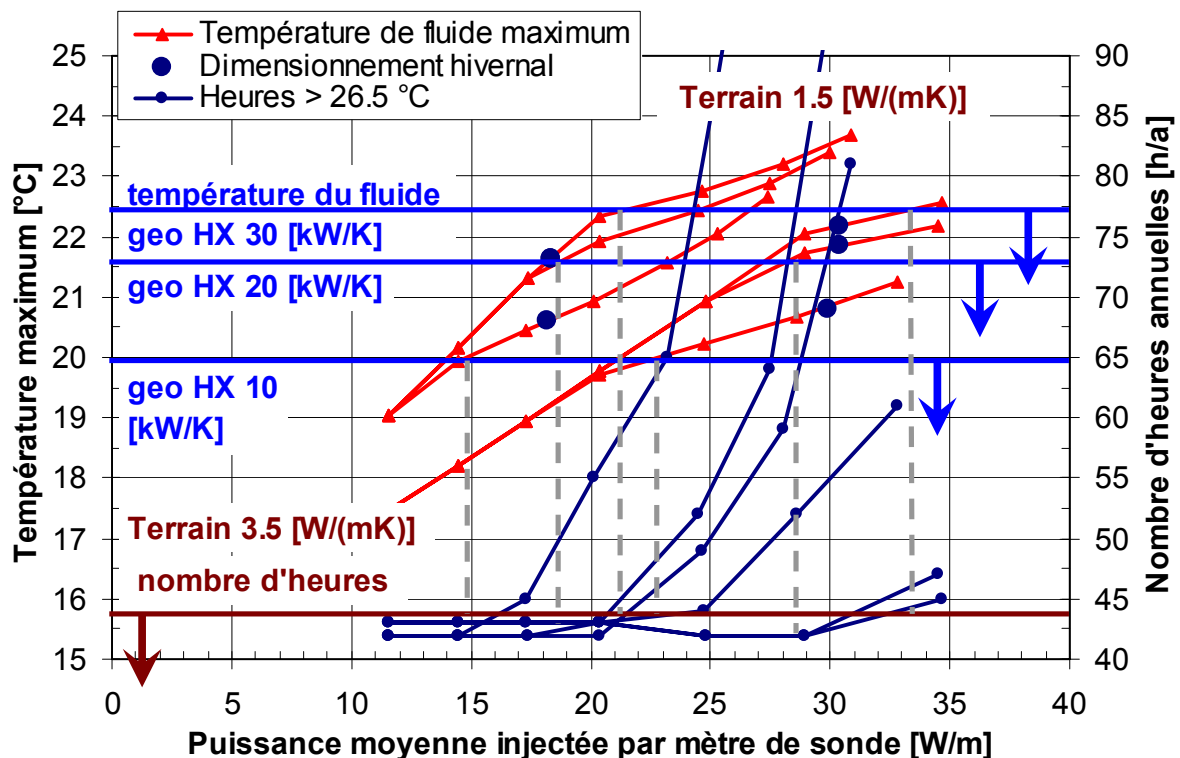


Figure 7.7 Critère estival pour le dimensionnement de la longueur de sondes pour divers espacements entre les sondes et pour deux valeurs de conductivité thermique du terrain. La puissance moyenne d'injection est déterminée par l'énergie et la durée de fonctionnement annuelle en geocooling.

En cherchant comme précédemment une corrélation entre la satisfaction du critère estival et la température maximum du fluide dans le circuit des sondes, on observe qu'un échangeur de chaleur de taille plus petite pour le geocooling revient à imposer une température maximum permise dans le circuit des sondes plus basse. L'effet sur le dimensionnement du système peut être évalué avec la figure 7.3, en appliquant la différence de 0.5 K entre la

température maximum permise du fluide dans le circuit des sondes et la température de départ équivalente qui en résulterait dans la distribution de refroidissement.

La figure 7.7 souligne l'importance de ne pas sous-dimensionner l'échangeur de chaleur pour le geocooling. Bien au contraire, la perte de température doit être la plus faible possible (de l'ordre de 1 à 2 K), ce qui signifie un surdimensionnement de l'échangeur.

7.4 Sensibilité à la profondeur des sondes géothermiques

La profondeur des sondes géothermiques est variée de 100 à 250 m avec un pas de 50 m.

Dans la figure 7.8, le critère hivernal est montré pour chaque valeur de profondeur des sondes et pour une conductivité thermique du terrain de 1.5 et 3.5 W/(mK). Il est reporté en fonction de la puissance nominale extraite par mètre de sonde.

Comme attendu, la clef de dimensionnement hivernale augmente avec une profondeur plus grande étant donné que la température du terrain augmente avec la profondeur. Dans les simulations, l'augmentation de la température du terrain est définie par le gradient géothermique qui a été fixé à 25 K/km. Il s'agit de relativiser les résultats obtenus pour les deux valeurs de conductivités thermiques, puisque une conductivité thermique plus élevée, pour un flux géothermique donné, conduit à un gradient géothermique plus faible.

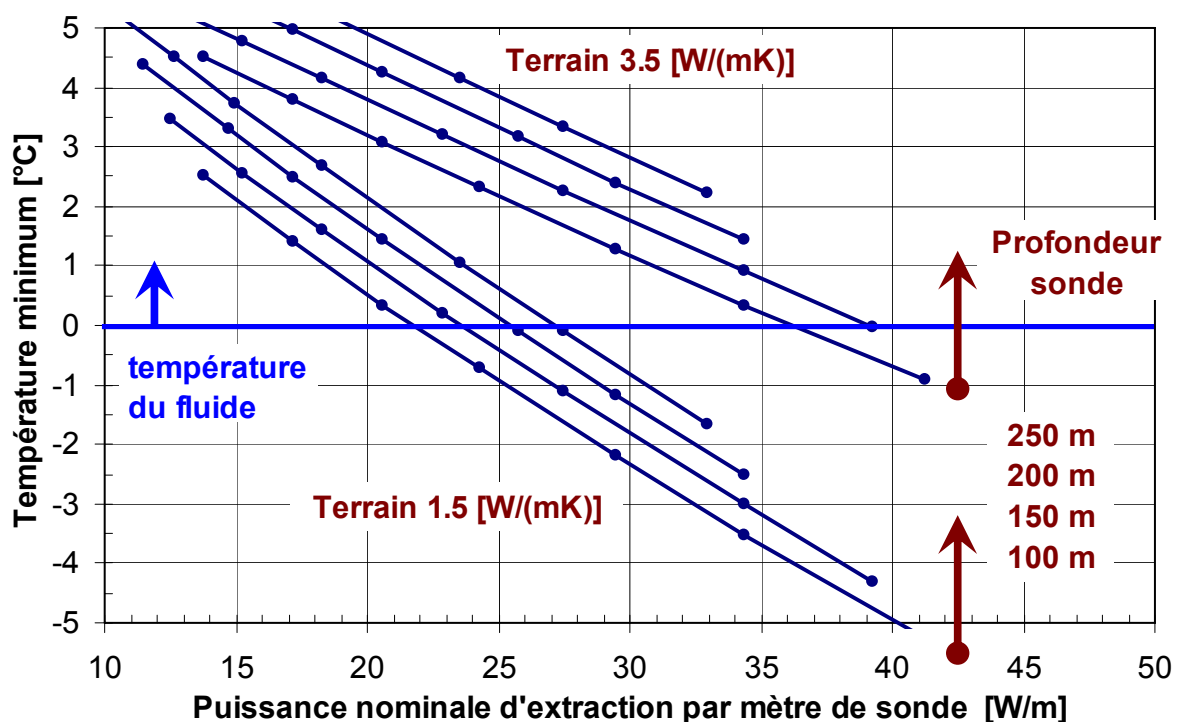


Figure 7.8 Critère hivernal pour le dimensionnement de la longueur des sondes montré en fonction de diverses profondeurs de sonde et pour deux valeurs de conductivité thermique du terrain. La puissance nominale extraite par mètre de sonde est définie avec la puissance frigorifique de la PAC aux conditions B0W35.

Le critère estival est montré dans la figure 7.9. Il est reporté en fonction de la puissance moyenne injectée par mètre de sonde.

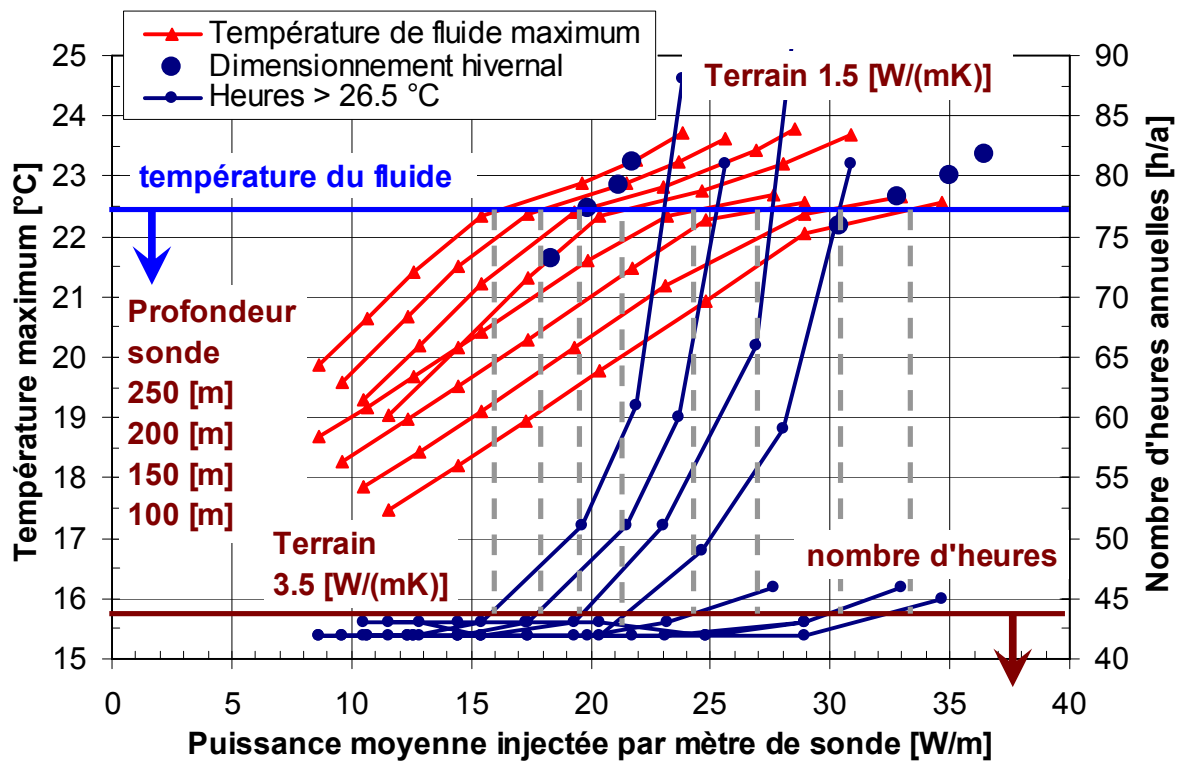


Figure 7.9 Critère estival pour le dimensionnement de la longueur des sondes pour diverses profondeurs de sonde et pour deux valeurs de conductivité thermique du terrain. La puissance moyenne d'injection est déterminée par l'énergie et la durée de fonctionnement annuel en geocooling.

La clef de dimensionnement estival diminue avec des profondeurs de sonde plus grande, en raison de l'augmentation de la température moyenne du terrain. À noter que le dimensionnement estival est fait sur la première année de fonctionnement, et ne prend pas en compte le léger abaissement des températures du terrain.

Comme précédemment, le critère estival (i.e. la satisfaction des besoins de refroidissement par geocooling) est respecté si la température du fluide ne dépasse pas 22.5°C.

Les points bleus sur les courbes des températures maximums montrent le dimensionnement hivernal (i.e. qui permet d'assurer une température positive dans le circuit des sondes). Ils sont tous sous la barre des 22.5°C pour une profondeur des sondes qui ne dépasse pas 150m. Pour des profondeurs plus grandes, le dimensionnement estival conditionne la longueur totale des sondes.

La figure 7.10 permet de déterminer graphiquement les clefs de dimensionnement hivernales et estivales en fonction de la profondeur des sondes et pour deux valeurs de conductivité thermique. Les clefs de dimensionnement sont données en fonction de la puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. définie aux conditions B0W35), utilisée comme facteur d'échelle. Pour le cas de la douane, la profondeur optimale se situe à environ 150 m. Si la température nécessaire pour le geocooling est inférieure, alors une profondeur plus faible devra être privilégiée.

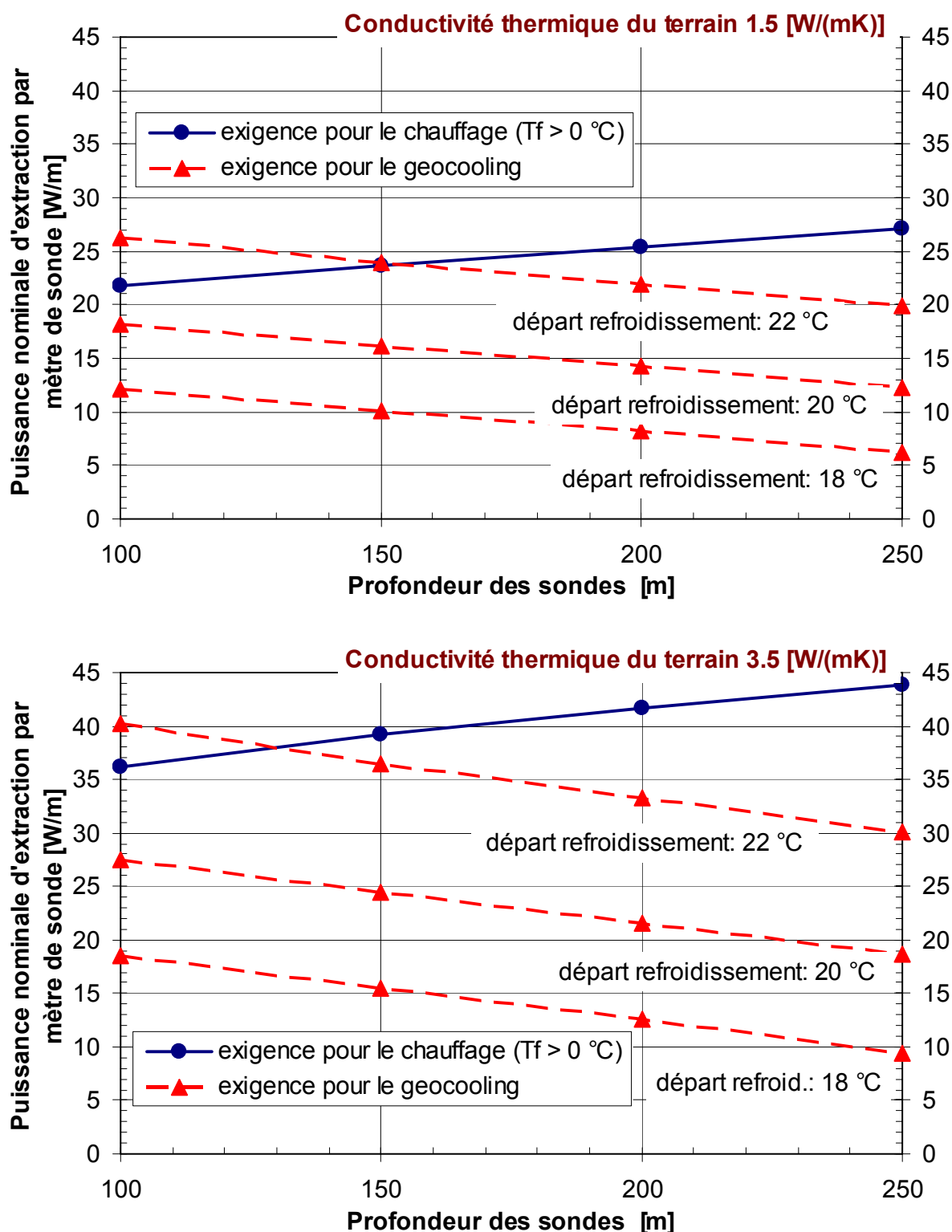


Figure 7.10 Clefs de dimensionnement hivernales et estivales pour le cas de la douane en fonction de la profondeur des sondes et de deux valeurs de la conductivité thermique du terrain. Les clefs de dimensionnement pour le geocooling sont données pour diverses températures de départ dans la distribution de refroidissement. La puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. aux

conditions B0W35) est choisie comme facteur d'échelle aussi bien pour les clefs de chauffage que de refroidissement.

7.5 Sensibilité à la température initiale du terrain

La température initiale du terrain vers la surface est variée de 10 à 14°C avec un pas de 2K. Le gradient géothermique est laissé invariant à 25 K/km, ce qui fait que la couche de terrain traversée par les sondes (100m) a une température moyenne de respectivement 11.25, 13.25 et 14.25°C.

Dans la figure 7.11, le critère hivernal est montré pour chaque valeur de température de terrain et pour une conductivité thermique de ce dernier de 1.5 et 3.5 W/(mK). Il est reporté en fonction de la puissance nominale extraite par mètre de sonde.

Comme attendu, la clef de dimensionnement hivernale augmente avec une température initiale du terrain plus élevée.

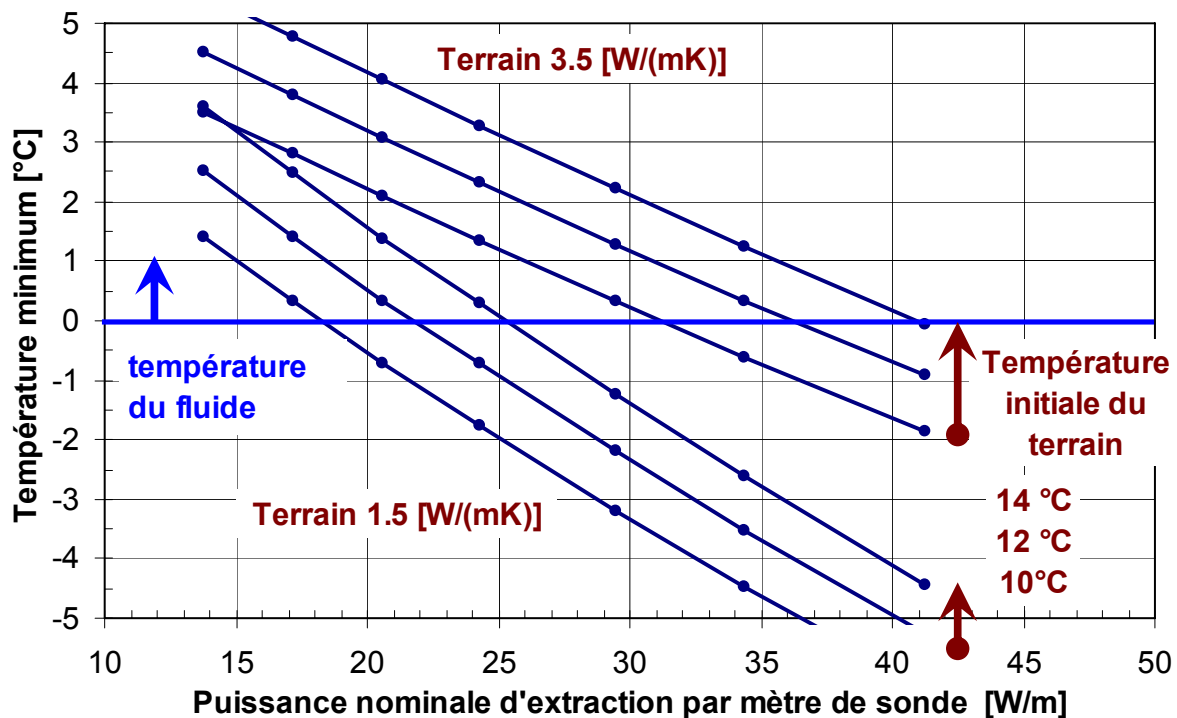


Figure 7.11 Critère hivernal pour le dimensionnement de la longueur des sondes montré en fonction de diverses températures initiales du terrain et pour deux valeurs de conductivité thermique du terrain. La puissance nominale extraite par mètre de sonde est définie avec la puissance frigorifique de la PAC aux conditions B0W35.

Le critère estival est montré dans la figure 7.12. Il est reporté en fonction de la puissance moyenne injectée par mètre de sonde.

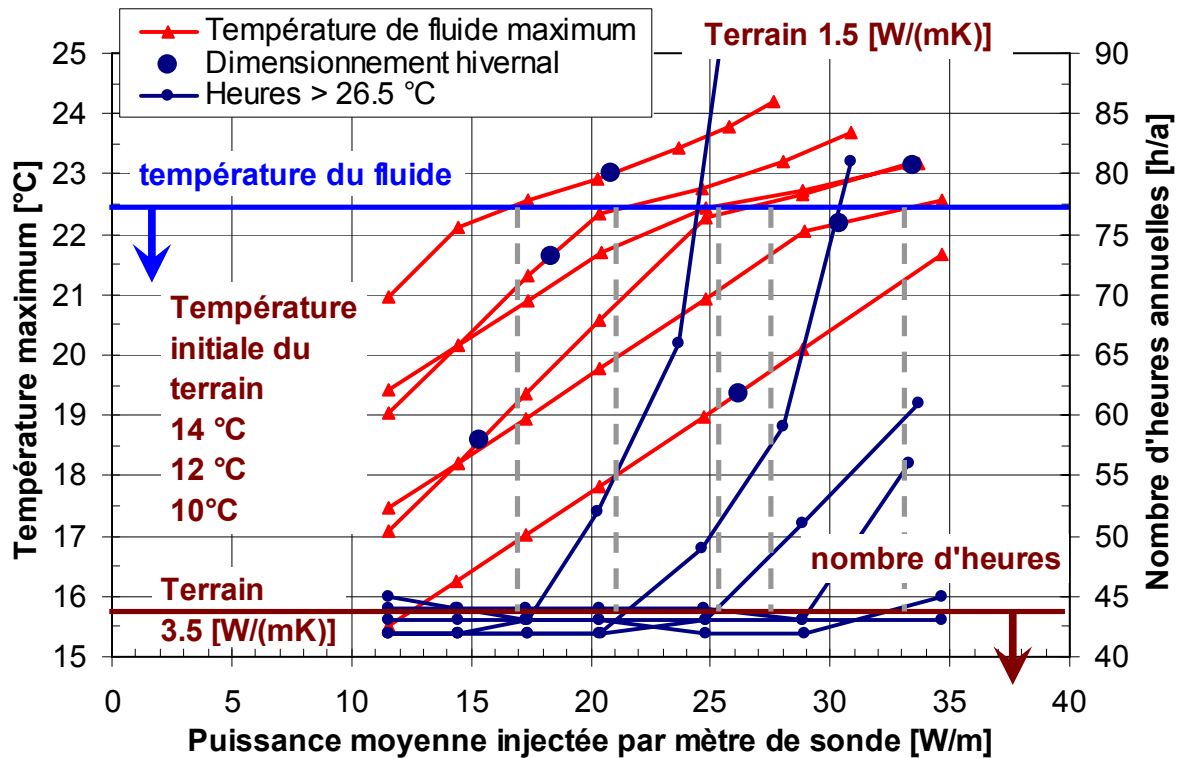


Figure 7.12 Critère estival pour le dimensionnement de la longueur des sondes pour diverses températures initiales du terrain et pour deux valeurs de conductivité thermique du terrain. La puissance moyenne d'injection est déterminée par l'énergie et la durée de fonctionnement annuelle en geocooling.

Comme attendu, la clef de dimensionnement estivale diminue avec l'augmentation de la température initiale du terrain.

Le critère estival (i.e. la satisfaction des besoins de refroidissement par geocooling) est respecté si la température du fluide ne dépasse pas 22.5°C.

Les points bleus sur les courbes des températures maximums montrent le dimensionnement hivernal (i.e. qui permet d'assurer une température positive dans le circuit des sondes). Ils sont sous la barre des 22.5°C pour une température initiale du terrain inférieure à 12°C vers la surface. Pour une température initiale du terrain plus élevée, le dimensionnement estival conditionne la longueur totale des sondes.

La figure 7.13 permet de déterminer graphiquement les clefs de dimensionnement hivernales et estivales en fonction de la température initiale du terrain et pour deux valeurs de conductivité thermique. Les clefs de dimensionnement sont données en fonction de la puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. définie aux conditions B0W35), utilisée comme facteur d'échelle. Une température du terrain plus basse favorise le geocooling au détriment du chauffage. En d'autre terme, une température initiale du terrain plus basse peut être compensée par une profondeur de sonde plus grande, de façon à obtenir la profondeur optimale pour le champ de sondes.

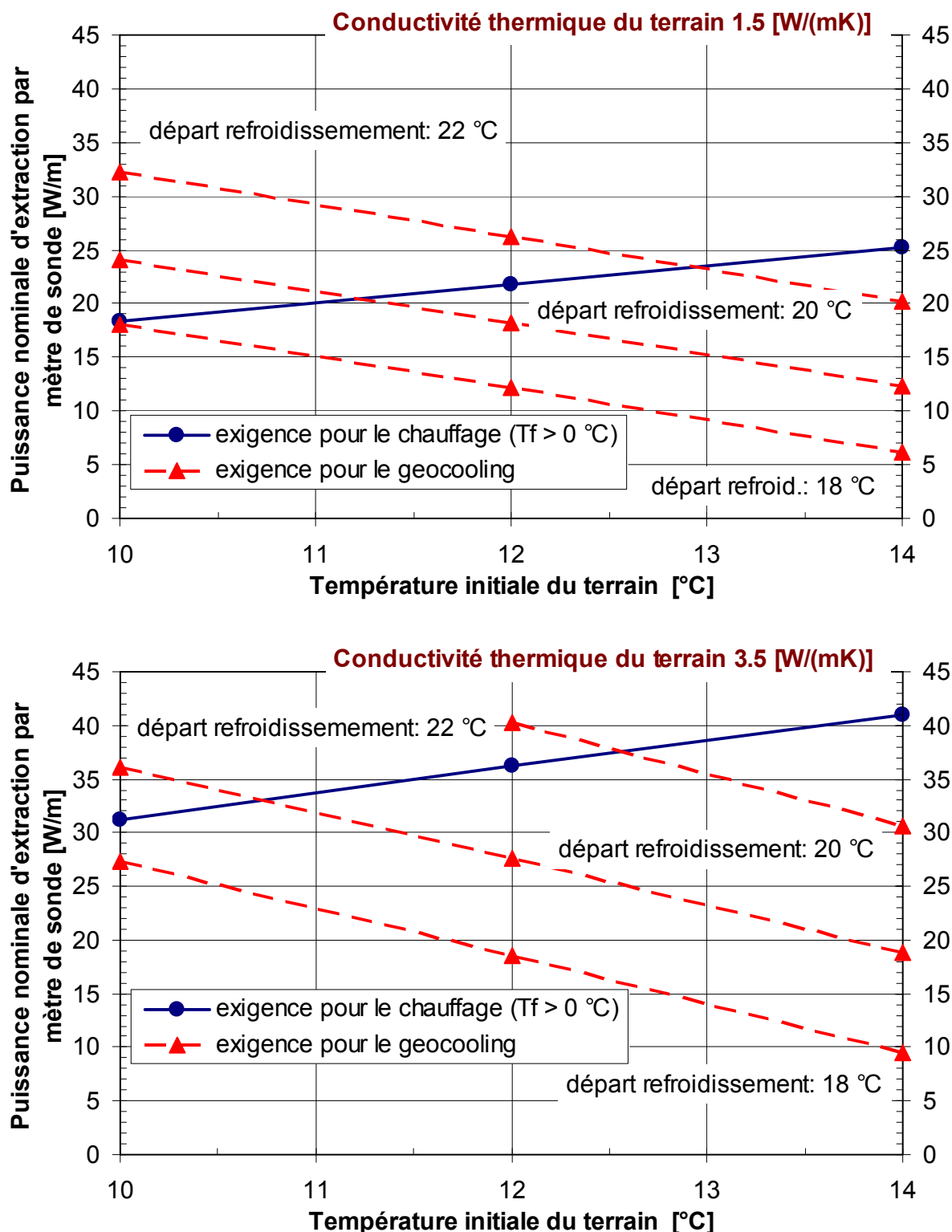


Figure 7.13 Clefs de dimensionnement hivernales et estivales pour le cas de la douane en fonction de la profondeur des sondes et de deux valeurs de la conductivité thermique du terrain. Les clefs de dimensionnement pour le geocooling sont données pour diverses températures de départ dans la distribution de refroidissement. La puissance nominale d'extraction de la PAC (i.e. aux conditions B0W35) est choisie comme facteur d'échelle aussi bien pour les clefs de chauffage que de refroidissement.

8. Règles simplifiées de dimensionnement

Le bâtiment de la douane de Brog eda – Chiasso, étant un bâtiment administratif Minergie® doté de dalles actives pour la distribution des énergies de chauffage et de refroidissement, se prête particulièrement bien au rafraîchissement par geocooling.

La méthodologie suivie a permis de dimensionner une installation géothermique avec un champ de sondes géothermiques sous le bâtiment. L'analyse de sensibilité permet d'estimer la profondeur optimale des sondes à 150 mètres pour ce cas.

Les clefs de dimensionnement données dans ce chapitre se rapportent au bâtiment de la douane et aux conditions géologiques simulées. Afin de lier les clefs de dimensionnement à l'objet étudié, les principales caractéristiques du bâtiment et de la géologie locale sont énoncées avec les clefs dans la table 8.1.

Type de bâtiment	administratif
Surface de référence énergétique (SRE)	2'360 m ²
Type de système	monovalent (chauffage et refroidissement)
Distribution de l'énergie thermique	dalles actives
Energie de chauffage	84 MWh/a ou 129 MJ/(m ² a)
Puissance thermique nominale PAC (B0W35)	55 kW ou 23 W/m ²
Coefficient de performance COP (B0W35)	4.0
Température de départ maximum	27°C
Coefficient de performance annuel	4.3
Energie de refroidissement	39 MWh/a ou 59 MJ/(m ² a)
Puissance moyenne de geocooling	35 kW ou 15 W/m ²
Température de départ geocooling	22°C
Conductivité thermique du terrain	2 W/(mK)
Température initiale du terrain	12°C + 25 K/km
Nombre de sondes géothermiques	10 -
Profondeur des sondes	150 m
Clefs de dimensionnement :	
Puissance spécifique extraite ¹⁾ 28	W/m
Energie spécifique extraite	43 kWh/(m a)
Puissance spécifique injectée ²⁾ 23	W/m
Energie spécifique injectée	26 kWh/(m a)
Ratio injecté sur extrait	0.6

¹⁾ relativement à la puissance nominale d'extraction de la PAC (aux conditions B0W35). La puissance d'extraction moyenne est en fait plus élevée en raison de conditions de travail plus favorables

²⁾ relativement à la puissance moyenne en geocooling

Table 8.1 Caractéristiques de l'objet étudié et clefs de dimensionnement pour le geocooling.

9. Aspects économiques

Une évaluation économique sommaire de l'installation géothermique est faite en considérant le coût annuel de l'investissement et de l'énergie électrique. Les résultats montrés dans la table 9.1 sont calculés avec les hypothèses suivantes :

- coût d'une pompe à chaleur (sol-eau) :	1'000 CHF/kW
- coût des sondes géothermiques :	100 CHF/m
- coût de l'électricité : 0.15	CHF/kWh
- coefficient de performance annuel PAC :	4.3
- taux d'intérêt pour le calcul de l'annuité :	3%
- durée de vie PAC :	25 ans
- durée de vie sondes géothermiques :	50 ans

Coût estimé de la PAC (55 kW)	55 kCHF
Coût estimé des sondes géothermiques (1'500 m)	150 kCHF
Coût annuel de l'investissement	9 kCHF
Coût annuel de l'énergie électrique	3 kCHF
Energie annuelle de chaud et de froid	123 MWh
Coût de l'énergie thermique	0.1 CHF/kWh
Coût annuel par mètre carré de SRE	5 CHF/m ²

Table 9.1 Caractéristiques de l'objet étudié et clés de dimensionnement pour le geocooling.

Le coût annuel de l'énergie thermique, malgré l'investissement important, est plutôt bas, d'autant plus qu'il comprend également la production de refroidissement. Par mètre carré de surface de référence énergétique (SRE), le coût annuel pour chauffer et refroidir est estimé à 5 CHF/m². Ce coût correspond, pour une surface de 200 m², à 1'000 CHF par an, soit moins de 100 CHF par mois, ce qui est un coût tout à fait contenu pour une maison de cette taille.

10. Conclusions

Le nouveau bâtiment de la douane de Brogeda-Chiasso a été construit pour satisfaire le standard Minergie®. Les faibles besoins de chauffage et de refroidissement rendent possible l'émission d'énergie thermique par un système de dalles actives (dénommé T ABS en allemand). Ce sont des conditions idéales pour l'intégration d'un système géothermique basé sur le geocooling. Le bâtiment a donc été utilisé comme objet de référence pour une étude de cas centrée sur le geocooling.

Le modèle de simulation dynamique développé pour simuler le bâtiment, l'émission d'énergie thermique, l'installation géothermique et leurs interactions thermiques a permis d'évaluer la faisabilité technique d'un système basé sur le geocooling appliqué au bâtiment et d'établir son dimensionnement. Une étude de sensibilité a permis d'évaluer et de montrer l'influence des principaux paramètres sur le dimensionnement du système. Il est important d'avoir une différence de température suffisante entre la température initiale du terrain et la température de départ dans la distribution de refroidissement, et donc de pouvoir refroidir le bâtiment avec la plus haute température possible. La simulation du refroidissement du bâtiment avec les dalles actives a montré qu'il est possible de fixer une température élevée (22 °C) au départ de la distribution de refroidissement, ce qui permet d'utiliser au mieux le potentiel de geocooling offert par les sondes.

Comme attendu la conductivité thermique est le paramètre géologique qui a la plus grande influence sur la longueur totale des sondes géothermiques. Un autre paramètre important est la température initiale du terrain. Une température initiale plus élevée permet de réduire la longueur des sondes pour le chauffage mais l'effet est inverse pour le geocooling. La température initiale peut être quelque peu réglée avec la profondeur. Une profondeur de sonde plus importante, en raison de l'augmentation de la température du terrain, permet d'augmenter la température initiale moyenne du terrain. Avec le bâtiment simulé de la douane, une profondeur optimale de 150 m est trouvée.

L'étude de ce cas a montré que pour un terrain dont la conductivité thermique a une valeur de 2 W/(mK), on peut faire une première estimation de la longueur totale nécessaire des sondes en se basant sur 30 W/m pour le chauffage et 20 W/m pour le refroidissement par geocooling. Ceci avec la condition que les besoins de chauffage et de refroidissement ont été réduits aux maximum, i.e. avec une enveloppe du bâtiment qui satisfasse aux exigences Minergie® et une capacité thermique interne qui soit importante pour amortir les variations de température estivales et donc limiter la puissance thermique maximum à évacuer. Dans ces conditions un système géothermique peut être conçu avec succès et présenter un avantage économique relativement aux autres options énergétiques.

L'outil de simulation COOLSIM développé dans cette étude permet d'étudier des systèmes basés sur le geocooling pour tout type de bâtiment équipé de dalles actives ou de chauffage/refroidissement par le sol et pour tout type de climat. Il sera extensivement utilisé pour une étude similaire et plus vaste dont l'objectif est de faire un manuel sur le geocooling.

11. Remerciements

L'Office Fédéral de l'Energie est remercié pour son soutien financier sans lequel cette étude n'aurait pas pu être effectuée. Enfin, toutes les personnes impliquées d'une manière ou d'une autre dans ce travail sont également remerciées.

12. Références

- Klein S. A. et al. (2007) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 16.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Pahud D. et Travaglini G. (2000) Etude d'une maison solaire active avec stockage en dalles au Tessin. Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Berne, Suisse.
- Pahud D. (2007) PILESIM2: Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Energy Piles or multiple Borehole Heat Exchangers. User Manual. ISAAC – DACD – SUPSI, Switzerland.
- Pahud D. (2007) BRIDGESIM : Simulation Tool for the System Design of Bridge Heating for Ice Prevention with Solar Heat Stored in a Seasonal Ground Duct Store. User Manual. ISAAC – DACD – SUPSI, Switzerland.
- SIA 382/1 (2007) Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen, Zürich, Schweiz.

Allegato 1

Nuovo edificio della dogana commerciale di Chiasso-Brogeda

Indice

A1.1.	Lo stabile amministrativo della dogana commerciale	A1.1
A1.1.1.	Introduzione	A1.1
A1.1.2.	Caratteristiche dell'edificio	A1.2
A1.1.2.1.	Edificio e spazi	A1.3
A1.1.2.2.	Facciata	A1.7
A1.1.2.3.	Coperture	A1.8
A1.1.2.4.	Pavimenti	A1.9
A1.1.2.5.	Protezione solare	A1.10
A1.1.2.6.	Ponti termici	A1.11
A1.1.2.7.	Inerzia termica	A1.11
A1.1.3.	Caratteristiche degli impianti tecnici	A1.12
A1.1.3.1.	Impianto di riscaldamento	A1.12
A1.1.3.2.	Produzione di acqua calda sanitaria	A1.12
A1.1.3.3.	Climatizzazione	A1.13

A1.1. Lo stabile amministrativo della dogana commerciale

A1.1.1. Introduzione

Lo stabile amministrativo della dogana commerciale è situato vicino al confine di stato, nel quartiere di Chiasso - Brogeda. L'edificio ha una funzione e logistica all'interno degli stabilimenti doganali di proprietà della Confederazione Svizzera.

Lo stabile si inserisce all'interno della città di Chiasso, in uno dei punti più trafficati, vista la vicinanza del valico doganale Svizzera - Italia. Oltre a soddisfare le esigenze logistiche della dogana, lo stabile rientra nei criteri Minergie®, lasciando completa libertà d'espressione a livello architettonico. Trattandosi di una zona particolarmente trafficata ed esposta, sono state curate in dettaglio le problematiche legate al rumore, all'inquinamento e al surriscaldamento estivo.



Figura A1.1 : Localizzazione dell'edificio Chiasso - Brogeda.

Lo sviluppo dell'edificio durante le fasi di progettazione è un esempio di interdisciplinarietà tra architetti e progettisti, con l'obiettivo di soddisfare la committenza – l'Ufficio federale delle costruzioni e della logistica (UFCL) – e conseguire la migliore soluzione sotto tutti i punti di vista.

A1.1.2. Caratteristiche dell'edificio

L'edificio è caratterizzato da una forma piuttosto compatta ma allungata, con una facciata prevalentemente leggera, sostanzialmente in vetro. Lo stabile è composto dal piano interrato, in cui trovano spazio tre locali tecnici, dal piano terreno, destinato a guardaroba, locali di deposito e archivi, dal primo piano con gli sportelli per le operazioni doganali, dal secondo e terzo piano con uffici e dal quarto piano con sale riunioni e ristoro. Sulla copertura infine è presente un ulteriore locale tecnico.



Figura A1.2 : Facciata Sud-Ovest.



Figura A1.3 : Facciata Nord-Est.

A1.1.2.1. Edificio e spazi

L'edificio è caratterizzato da facciate uniformi lungo tutti e quattro gli orientamenti. Il blocco rappresentato dal locale tecnico sul tetto va a completare i volumi dell'edificio.

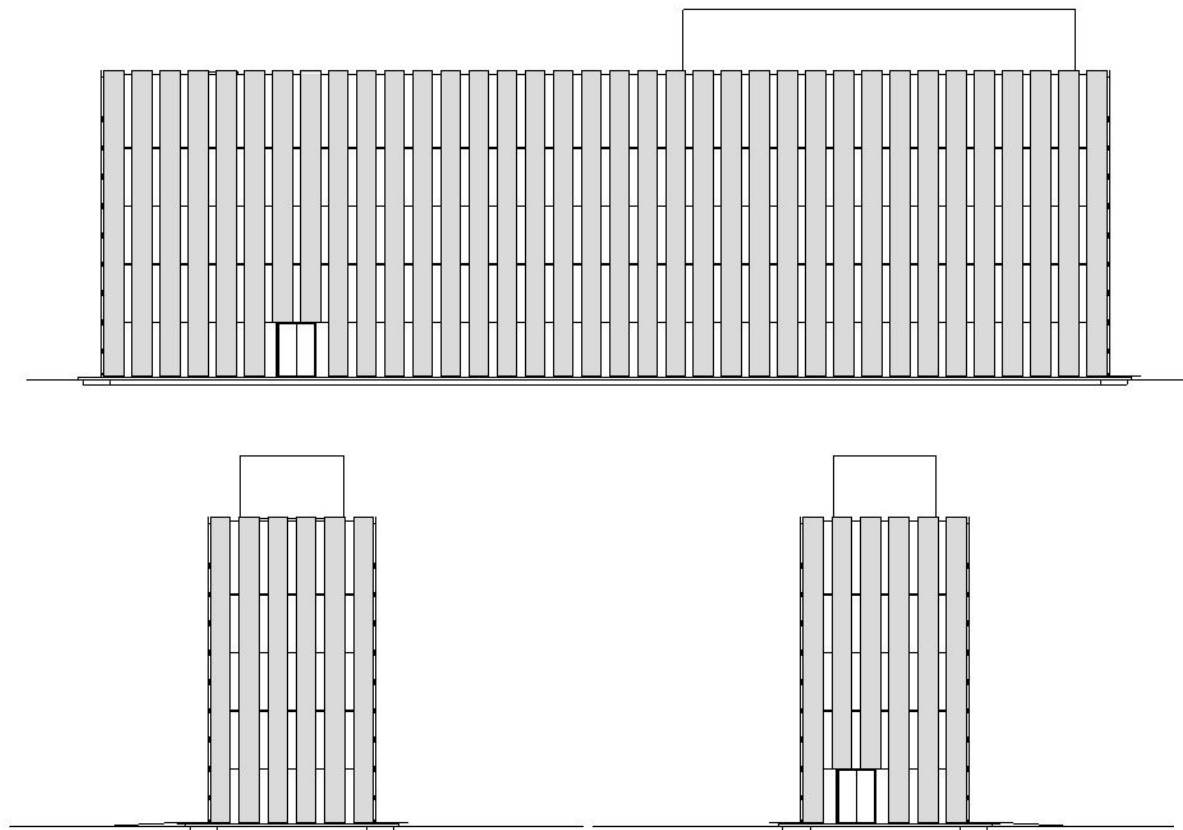


Figura A1.4 : Facciate Sud-Ovest, Nord-Ovest e Sud-Est.

Il piano cantina è di superficie molto ridotta rispetto al resto dell'edificio.

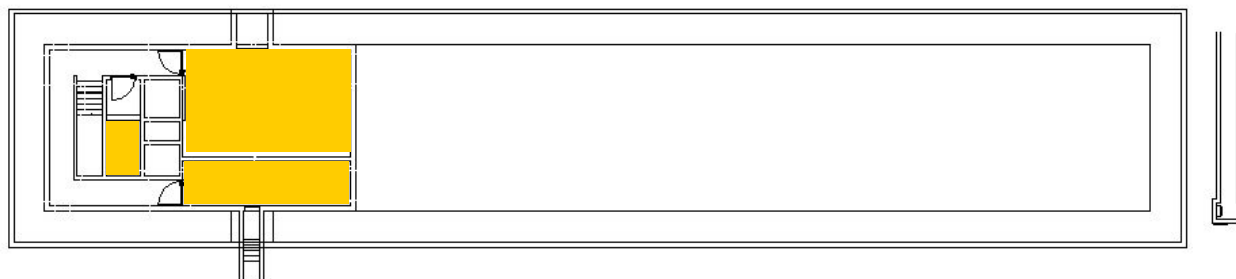


Figura A1.5 : Pianta piano cantina.

I due locali sulla destra sono locali server. I server coprono le esigenze per tutti gli stabilimenti doganali a Chiasso-Brogeda.

Il locale più piccolo sulla sinistra è riservato per la produzione di acqua calda sanitaria.

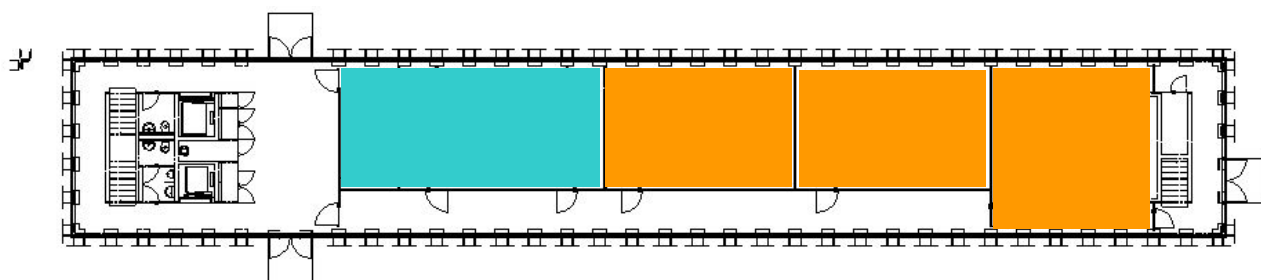


Figura A1.6 : Pianta piano terreno.

I tre locali sulla destra in arancione sono destinati a deposito, mentre i locali in azzurro sono l'infermeria e il guardaroba. Le zone non colorate sono i locali di disimpegno e i vani scala.

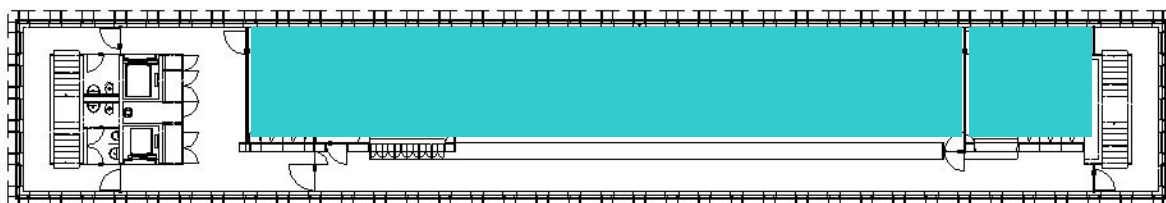


Figura A1.7 : Pianta primo piano.

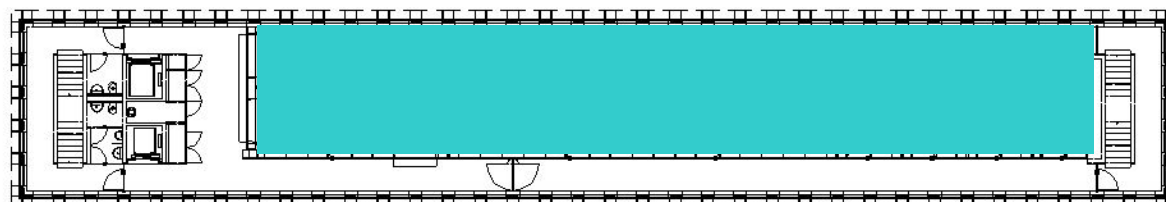


Figura A1.8 : Pianta secondo piano.

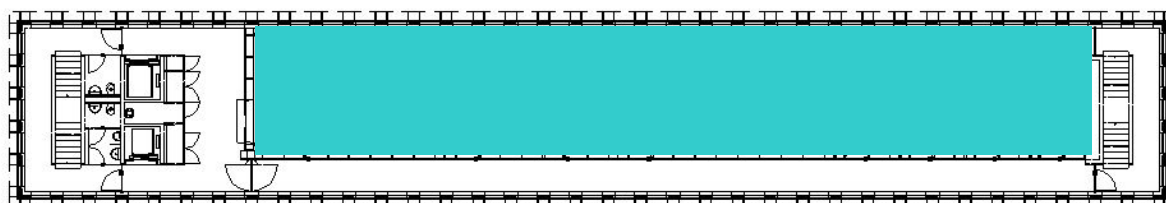


Figura A1.9 : Pianta terzo piano.

Al primo, secondo e terzo piano la destinazione dei locali è simile. La zona azzurra infatti è destinata agli uffici mentre le zone non colorate sono i locali di disimpegno e i vani scala. L'unica particolarità è rappresentata dal primo piano, dove gli uffici dell'importazione sono aperti sul corridoio (disimpegno).

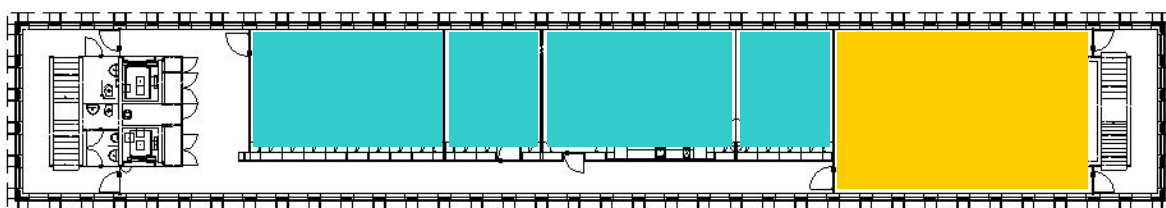


Figura A1.10 : Pianta quarto piano.

Anche la destinazione del quarto piano non differisce molto: i primi due locali sulla sinistra (colore azzurro) sono delle sale riunioni; i secondi due (colore azzurro) sono dei locali ristoro per fumatori e non. L'ultimo locale sulla destra (colore arancione) è una sala conferenza. Le zone non colorate sono i locali di disimpegno e i vani scala.

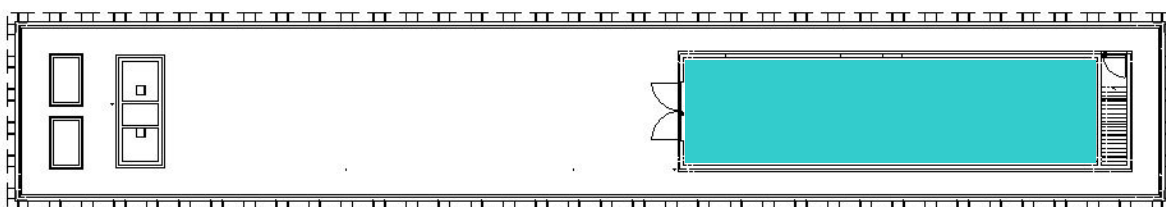


Figura A1.11 : Pianta quinto piano (piano tetto).

Al quinto piano è presente solo il locale tecnico sulla destra.

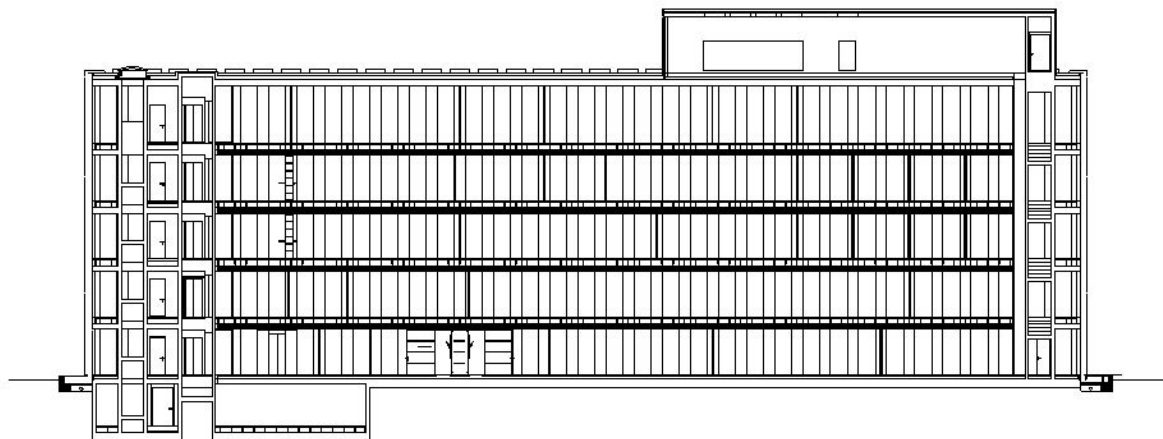


Figura A1.12 : Sezione dell'edificio.

Nella sezione dell'intero stabile si possono intravedere i pavimenti tecnici a ogni piano, destinati agli impianti come pure i vani verticali a ridosso dei vani scala alle estremità dello stabile.

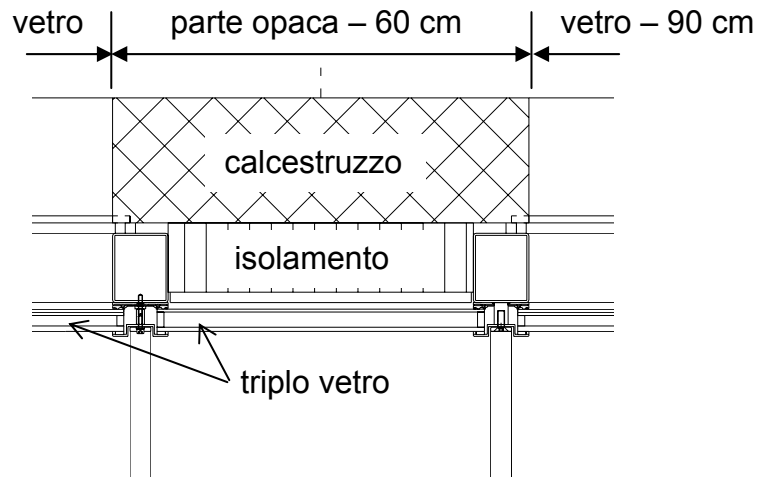
Le dimensioni dello stabile possono essere riassunte nella tabella seguente.

Superficie di riferimento energetico	SRE ₀	2'188	m ²
	SRE	2'363	m ²
Volume	netto riscaldato	5'671 m ³	
Facciata Sud-Est	superficie totale	138	m ²
	superficie aperture finestre	73	m ²
Facciata Sud-Ovest	superficie totale facciata	884	m ²
	superficie aperture finestre	510	m ²
Facciata Nord-Ovest	superficie totale facciata	138	m ²
	superficie aperture finestre	73	m ²
Facciata Nord-Est	superficie totale facciata	884	m ²
	superficie aperture finestre	510	m ²
Tetto	superficie verso non riscaldato	108	m ²
	superficie verso esterno	328	m ²
Pavimento	superficie verso non riscaldato	124	m ²
	superficie verso terreno	314	m ²

Tabella A1.1: Dati relativi a volumi e superfici.

A1.1.2.2. Facciata

Il dettaglio costruttivo particolare della facciata, ha spinto i progettisti ad approfondire le verifiche riguardanti la trasmittanza U, anche alla luce dell'importante sviluppo di oltre 2'500 m. Il calcolo eseguito da uno studio d'ingegneria per la metalcostruzione e costruzione di facciate ha permesso di stabilire le seguenti stratigrafie di parete:



1. parte opaca **$U = 1,03 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**

Composta da:

telai delle finestre ($U \cong 1,80 \text{ W/(m}^2\text{K)}$),
ponte termico laterale e coefficiente di trasmissione lineare del bordo dei vetri,
parte in calcestruzzo con 18 cm di spessore per 60 cm di lunghezza,
isolamento termico tra il calcestruzzo e vetro tipo Foamglas con 12 - 14 cm di spessore
(conducibilità termica $\lambda = 0.050 \text{ W/(mK)}$).

2. parte traslucida (vetro) **$U = 0.60 \text{ W/(m}^2\text{K)}$**
coefficiente g = 0.35 (globale)

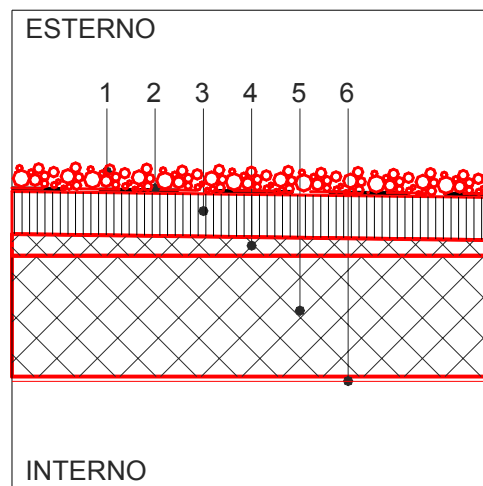
Composta da:

triplo vetro con lastra esterna, spessore 6 mm,
intercapedine da 16 mm con gas Argon,
lastra intermedia spessore 6 mm,
intercapedine da 16 mm con gas Argon,
lastra interna stratificata con pellicola basso emissiva.

A1.1.2.3. Coperture

Tetto verso esterno

1. 5 cm ghiaia rotonda lavata 16/32 mm
2. Impermeabilizzazione
3. **20 cm isolamento termico** (vetro cellulare)
4. Betoncino di pendenza, min. 1,5%
5. 30 cm soletta in calcestruzzo armato
6. Intonaco interno

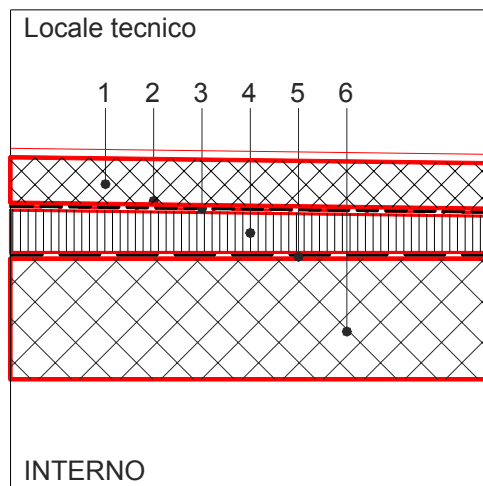


Tetto verso esterno

$$U = 0.19 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Tetto verso locali non riscaldati

1. 16 cm betoncino armato flottante
2. Strato di separazione e slittamento
3. Impermeabilizzazione
4. **4 cm isolamento termico** (vetro cellulare)
5. Lisciatura
6. 30 cm soletta in calcestruzzo armato



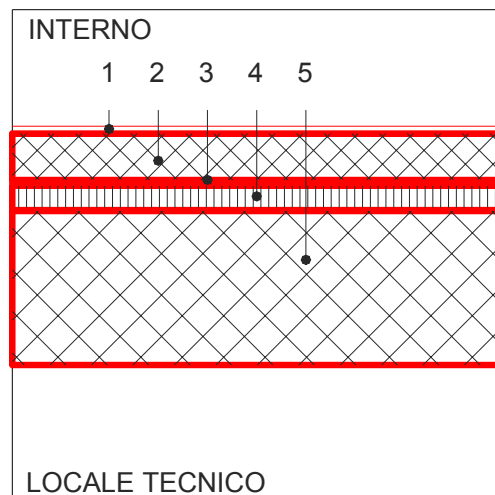
Tetto verso esterno

$$U = 0.53 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

A1.1.2.4. Pavimenti

Pavimento verso locale tecnico

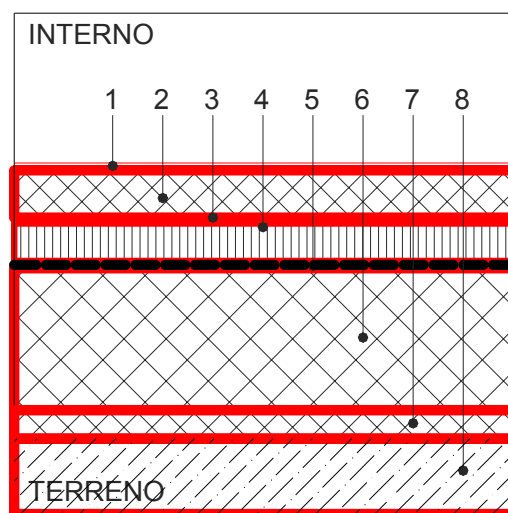
1. Rivestimento
2. 6.2 cm betoncino armato flottante
3. Impermeabilizzazione
4. **12 cm isolamento termico** (vetro cellulare)
5. 30 cm soletta in calcestruzzo armato



Pavimento verso locale tecnico $U = 0.29 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Pavimento verso terreno

1. Rivestimento
2. 6.2 cm betoncino armato flottante
3. Strato di separazione
4. **12 cm isolamento termico** (vetro cellulare)
5. Impermeabilizzazione
6. 30 cm soletta in calcestruzzo armato
7. Magrone
8. Terreno



Pavimento verso terreno $U = 0.30 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

A1.1.2.5. Protezione solare

Come protezione solare esterna è stata scelta la soluzione con elementi in vetro se rigrafato fissi. Queste protezioni solari sono utili a proteggere la facciata durante i mesi estivi.

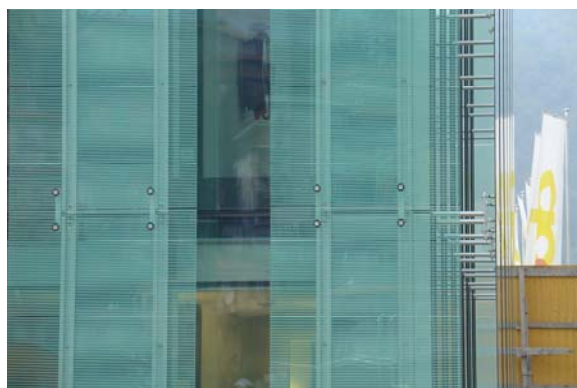
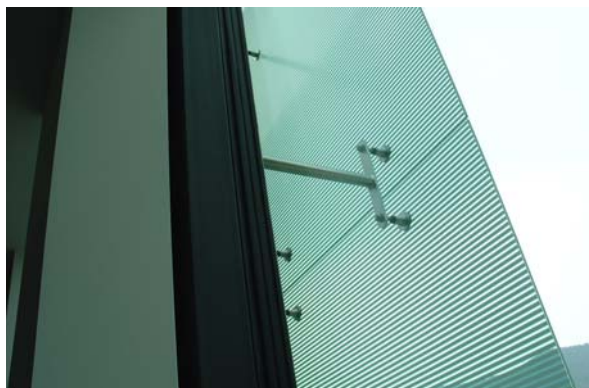


Figura A1.13 : Schermatura vista dall'interno. Figura A1.14 : Schermatura vista dall'esterno.

Il fattore di ombreggiatura della protezione solar e fissa data dai vetri serigrafati e stèrni è stato determinato in seguito a un rilievo effettuato dal Laboratorio tecnico sperimentale della SUPSI. Dai risultati ottenuti, con siderando che il vetro ha un valore g pari al 35%, con un fattore di ombreggiatura $F_s \cong 0,68$ si ha un valore medio di riduzione dei guadagni solari pari a 0.24.



Figura A1.15 : Schermatura vista dall'esterno lungo tutta la facciata.



Figura A1.16 : Tenda a rullo chiara interna.

La protezione solare interna è garantita con tende a rullo chiare, pensate per la schermatura durante i mesi invernali.

A1.1.2.6. Ponti termici

Grazie all'isolamento termico a cappotto della facciata (vedere dettaglio della facciata), i ponti termici risultano circoscritti a tre punti critici: il collegamento della parete esterna con il tetto (gronda), il raccordo del tetto con la parete del locale tecnico e il collegamento della parete esterna con il pavimento del piano terreno (zoccolo). Il ponte termico dato dall'inserimento dei serramenti nella parete esterna è già stato computato nella valutazione della trasmittanza U della parete stessa.

Si hanno quindi i seguenti valori per i ponti termici:

Ponte termico gronda (sviluppo 123 m)	$\psi = 0.30 \text{ W/(mK)}$
Ponte termico zoccolo (sviluppo 115 m)	$\psi = 0.30 \text{ W/(mK)}$
Ponte termico raccordo tetto-locale tecnico (sviluppo 50 m)	$\psi = 0.44 \text{ W/(mK)}$

A1.1.2.7. Inerzia termica

La costruzione è costituita da un'importante massa interna in calcestruzzo armato (solette divisorie e parte delle pareti esterne) e da elementi leggeri in facciata.

L'edificio può quindi essere considerato massivo, con una massa specifica utile all'accumulo termico $> 350 \text{ kg/m}^2$ (vedere SIA V 382/3).

A1.1.3. Caratteristiche degli impianti tecnici

A1.1.3.1. Impianto di riscaldamento

Come visto in precedenza, l'edificio è ben isolato e il fabbisogno di energia per il riscaldamento di conseguenza risulta essere molto ridotto. La potenza necessaria al riscaldamento dello stabile è garantita da una pompa di calore (PdC) aria-acqua, abbinata ad un accumulatore tecnico e a un'erogazione / emissione del calore a bassa temperatura mediante il sistema a solette termoattive (TABS®).



Figura A1.17 : PdC aria-acqua sul tetto. Figura A1.18 : Collettori TABS®.

In appoggio alle solette termoattive, un impianto di climatizzazione permette di riscaldare con l'aria (in aggiunta alla garanzia di un ricambio dell'aria a scopo igienico). In alcune zone sono previsti dei ventilconvettori, anch'essi allacciati al sistema di riscaldamento.

A1.1.3.2. Produzione di acqua calda sanitaria



La produzione di acqua calda sanitaria è garantita da una pompa di calore aria-acqua, posata nel locale tecnico del piano cantina. La PdC sfrutta la temperatura dell'aria del locale tecnico, in parte riscaldata con l'aria calda aspirata dal locale server adiacente.

Figura A1.19 : PdC aria-acqua al piano cantina.

A1.1.3.3. Climatizzazione

Come anticipato, l'edificio rientra nello standard Minergie®. Per garantire ricambi d'aria utili al mantenimento di una qualità dell'aria interna adeguata viene impiegato l'impianto di climatizzazione. Per garantire un risparmio di energia, l'impianto è munito di un sistema di recupero del calore mediante uno scambiatore rotativo e un sistema di ricircolo.

Trattandosi di uno stabile amministrativo, anche la quantità di carichi interni dovuti all'illuminazione, alle persone e agli apparecchi è importante. E in determinati periodi dell'anno, soprattutto in estate, è necessario raffreddare gli ambienti.

L'esigenza di raffreddamento è coperta in parte con l'impianto di climatizzazione, ma soprattutto grazie alle TABS® che possono raffreddare o riscaldare la massa dell'edificio. Al quarto piano, dove sono presenti le sale riunioni, le TABS® e l'impianto di climatizzazione possono non bastare a coprire le punte di carico. Per questo motivo sono stati inseriti anche dei ventilconvettori.

Come per il riscaldamento, è presente un accumulatore tecnico anche per il raffreddamento. Per produrre il freddo (TABS® e impianto di climatizzazione) viene impiegata la pompa di calore reversibile.

Nelle fasi di mezza stagione, la pompa di calore può funzionare in modalità acqua-acqua, e quindi fornire energia per il riscaldamento o togliendo la località che esigono un raffreddamento.



Figura A1.20 : Impianto di climatizzazione sul tetto.

Figura A1.21 : Dettaglio impianto di climatizzazione.



Allegato 2

Calcolo del bilancio energetico del nuovo edificio della dogana commerciale di Chiasso-Brogeda

Indice

A2.1.	Bilancio energetico dell'edificio	A2.1
A2.1.1.	Variabili meteorologiche	A2.1
A2.1.2.	Ombreggiamento delle facciate	A2.2
A2.1.3.	Guadagni interni	A2.5
A2.1.4.	Ventilazione	A2.7
A2.1.5.	Bilancio energetico	A2.7
A2.1.6.	Capacità termica interna	A2.11
A2.2.	Riferimenti A2.11	

A2.1. Bilancio energetico dell'edificio

A2.1.1. Variabili meteorologiche

Le valutazioni energetiche dell'edifi cio in esame sono state condotte utilizzando il codice di calcolo TR NSYS 16.1 (2007). Per l'elaborazione dei dat i climatici sono stati ut ilizzati i seguenti componenti di TRNSYS 16.1:

- Data Reader (TYPE 9);
- Solar Radiation Processor (TYPE 16);
- Sky Temperature Processor (TYPE 69).

Un insieme di EQUATIONS sono state defin ite per il calcolo delle ombre su ogni facciata dell'edificio.

Il file climatico per Chiasso è sta to generato con MET EONORM 5 (2004). Tale file, corrispondente ai valori orari di un anno tipo, viene letto dal TYPE Data Reader. I valori orari sono ordinati per righe (8760 righe), ciascuna delle quali comprende 10 valori nel seguente ordine:

- ora dell'anno, iniziando con l'ora 1 per i valori della prima ora dell'anno [h];
- irraggiamento globale orizzontale [W/m^2];
- irraggiamento diffuso orizzontale [W/m^2];
- irraggiamento globale nel piano orizzontale con orizzonte [W/m^2];
- irraggiamento diffuso nel piano orizzontale con orizzonte [W/m^2];
- irraggiamento diretto normale con orizzonte [W/m^2];
- temperatura dell'aria esterna [$^{\circ}C$];
- umidità relativa [%];
- punto di rugiada [$^{\circ}C$];
- grado di nuvolosità [-].

Il sito è caratterizzato dalle seguenti coordinate geografiche (Chiasso):

- latitudine di 45.5° ;
- longitudine di 9° Est;
- altitudine di 240 m.

I valori mensili della tempera dell'aria esterna e dell'irraggiamento globale orizzontale relativi a tale località sono elencati nella tabella A2.1.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic	Anno	
Ta [°C]	0.9	2.4	7.5		10.6	14.8	18.2	21.7	20.7	16.8	11.6	5.6	2.0	11.1
HG [kWh]	41	54	91	102	134	160	179	160	112		65	42	35	1'173

Tabella A2.1 : Valori mensili della temperatura dell'aria esterna e dell'irraggiamento globale orizzontale per Chiasso.

Parametri:

a = lunghezza finestra

b = lunghezza apertura tra vetri serigrafati

c = distanza tra facciata e vetri serigrafati

τ_v = coefficiente g dei vetri della parte vetrata dei vetri serigrafati

F_v = quota parte vetrata dei vetri serigrafati

γ_F = azimut facciata

Grandezze calcolate nelle equazioni:

$\gamma_{1,2,3,4}$ per le 4 facciate

F_{dir} = fattore di riduzione dell'irraggiamento diretto per le 4 facciate

F = fattore di riduzione dell'irraggiamento totale per le 4 facciate

Output:

I_{totc} = irraggiamento totale corretto considerando l'ombreggiamento

I_{dirc} = irraggiamento diretto corretto considerando l'ombreggiamento

$I_{diffc} = I_{totc} - I_{dirc}$ = irraggiamento diffuso corretto considerando l'ombreggiamento

Per γ_s tra γ_1 e γ_2

$\tan(\gamma) = y/c \Rightarrow \gamma = \arctan(y/c)$

dove $\gamma = -(\gamma_s - \gamma_F) = \gamma_F - \gamma_s$

$y = c \tan(\gamma) = c \tan(\gamma_F - \gamma_s)$

$x = b + (a-b)/2 - y$

$x = (a+b)/2 - c \tan(\gamma_F - \gamma_s)$

Per γ_s tra γ_3 e γ_4

$\tan(\gamma') = y'/c \Rightarrow \gamma' = \arctan(y'/c)$

dove $\gamma' = \gamma_s - \gamma_F$

$y' = c \tan(\gamma') = c \tan(\gamma_s - \gamma_F)$

$x' = b + (a-b)/2 - y'$

$x' = (a+b)/2 - c \tan(\gamma_s - \gamma_F)$

Riassumendo:

se $\gamma_s < \gamma_1$ allora $F_{dir} = 0$

se $\gamma_1 < \gamma_s < \gamma_2$ allora $F_{dir} = (a+b)/2a - c/a \tan(\gamma_F - \gamma_s)$

se $\gamma_2 < \gamma_s < \gamma_3$ allora $F_{dir} = b/a$

se $\gamma_3 < \gamma_s < \gamma_4$ allora $F_{dir} = (a+b)/2a - c/a \tan(\gamma_s - \gamma_F)$

se $\gamma_s > \gamma_4$ allora $F_{dir} = 0$

Gli angoli $\gamma_{1,2,3,4}$ sono diversi per ogni facciata ($4 \times 4 = 16$ angoli in totale) a causa dell'azimut che cambia di facciata in facciata:

$\gamma_1 = \gamma_F - \arctan(a+b/2c)$

$\gamma_2 = \gamma_F - \arctan(a+b/2c)$

$\gamma_4 = \gamma_F + \arctan(a+b/2c)$

$\gamma_3 = \gamma_F + \arctan(a+b/2c)$

L'irraggiamento diretto corretto (I_{dirc}) che considera l'ombreggiamento è:

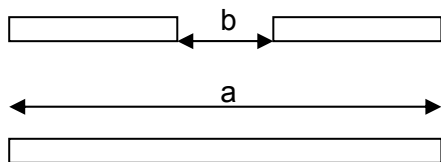
$I_{dirc} = F_{dir} I_{dir}$ (distinto per ogni facciata)

Irraggiamento diffuso:

L'irraggiamento diffuso corretto (I_{diffc}) che considera l'ombreggiamento vale:

$$I_{diffc} = \frac{b}{a} I_{diff} + \left(\frac{a-b}{a}\right) \tau_v F_v I_{tot} \quad (\text{distinto per ogni facciata})$$

Viene considerata la parte di irraggiamento diffuso rapportata alla lunghezza della finestra (a) che passa attraverso l'apertura b (primo termine dell'equazione) e quella che passa attraverso la parte vetrata del vetro serigrafato esterno (secondo termine dell'equazione)



Irraggiamento globale:

L'irraggiamento globale corretto (I_{totc}) che considera l'ombreggiamento vale:

$$I_{totc} = F I_{tot} = I_{dir} F_{dir} + \frac{b}{a} I_{diff} + \left(\frac{a-b}{a}\right) \tau_v F_v I_{tot} \quad (\text{distinto per ogni facciata})$$

F = fattore di riduzione dell'irraggiamento globale

$$F = (I_{dir} F_{dir} + \frac{b}{a} I_{diff} + \left(\frac{a-b}{a}\right) \tau_v F_v I_{tot}) / (I_{tot} + 10 \cdot 10^{-10}) \quad (\text{distinto per ogni facciata})$$

Il termine di $10E(-10)$ è introdotto unicamente per evitare la divisione per 0 quando $I_{tot} = 0$.

Per il caso dell'edificio della dogana, i valori di irraggiamento globale nelle facciate e dei fattori medi mensili di riduzione dell'irraggiamento globale sono elencati nella tabella A2.2.

Facciata Sud-Ovest azimut : 28°	Sud-Est azimut : -62°	Nord-Est azimut : -152°	Nord-Ovest azimut : 118°
[kWh/m ²]	H _{global} F _{medio} [-]	H _{global} F _{medio} [-]	H _{global} F _{medio} [-]
Gennaio	65 0.64	41 0.58	15 0.56
Febbraio	63 0.65	41 0.60	22 0.55
Marzo	76 0.63	64 0.63	38 0.55
Aprile	64 0.61	65 0.65	44 0.59
Maggio	71 0.60	78 0.64	62 0.61
Giugno	78 0.57	89 0.63	71 0.60
Luglio	92 0.57	100 0.63	79 0.59
Agosto	100 0.59	94 0.63	70 0.57
Settembre	91 0.62	76 0.63	47 0.53
Ottobre	63 0.63	49 0.63	27 0.56
Novembre	61 0.64	42 0.60	15 0.56
Dicembre	55 0.65	34 0.58	13 0.57
Anno	879 0.61	772 0.63	403 0.55

Tabella A2.2 : Valori mensili de ll'irraggiamento globale nelle facciate dell'edificio e dei fattori di riduzione dell'irraggiamento globale.

Le due facciate principale dell'edificio sono le facciate Sud-Ovest e Nord-Est.

A2.1.3. Guadagni interni

I guadagni interni sono definiti in modo che i carichi dovuti alle persone e a luci e apparecchiature corrispondano a quelli definiti nella norma SIA 380/1.

Nei grafici A2.2 e A2.3 sono mostrati i profili giornalieri dei guadagni interni per i giorni lavorativi e per il weekend. I guadagni sono definiti per metro quadrato di superficie di riferimento energetico senza correzione di altezza (SREo).

In termini di media annuale, i guadagni interni corrispondono a 1 W/m² per le persone e 2.6 W/m² per luci e apparecchiature. Sulla base del profilo giornaliero definito per la settimana, i guadagni interni possono raggiungere 14.4 W/m².

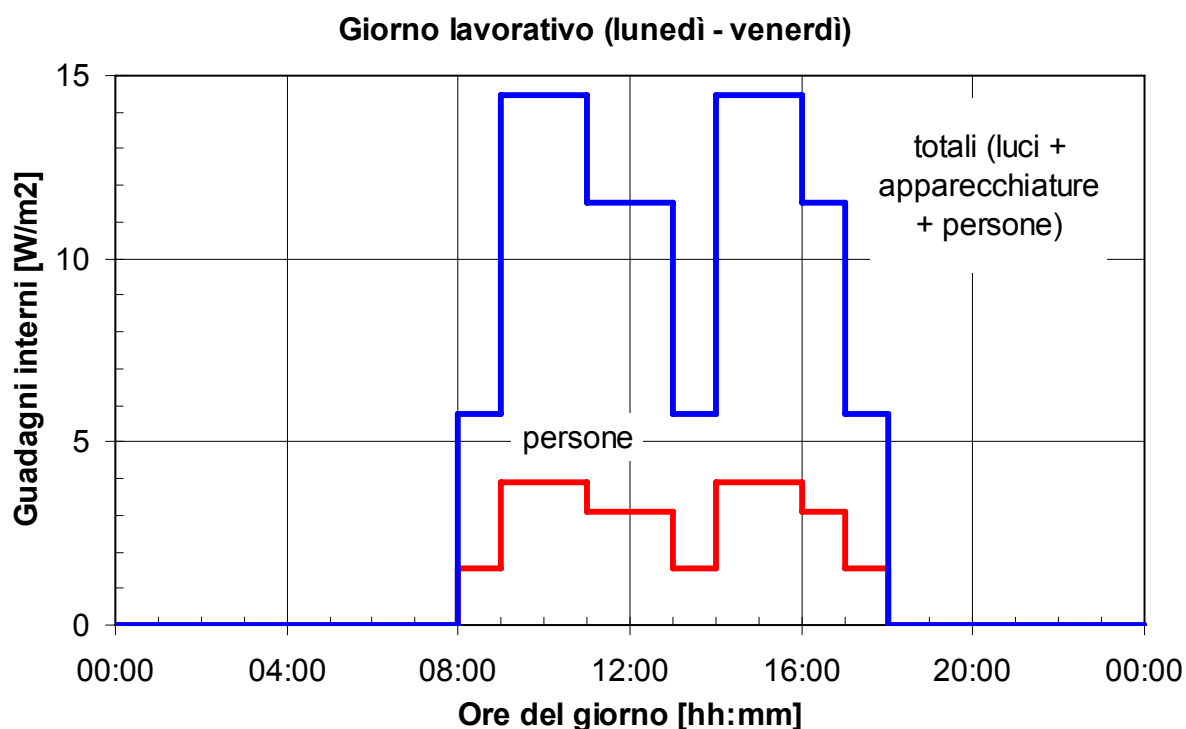


Figura A2.2 : profilo dei guadagni interni per un giorno lavorativo (lunedì – venerdì). La superficie di riferimento è SREo.

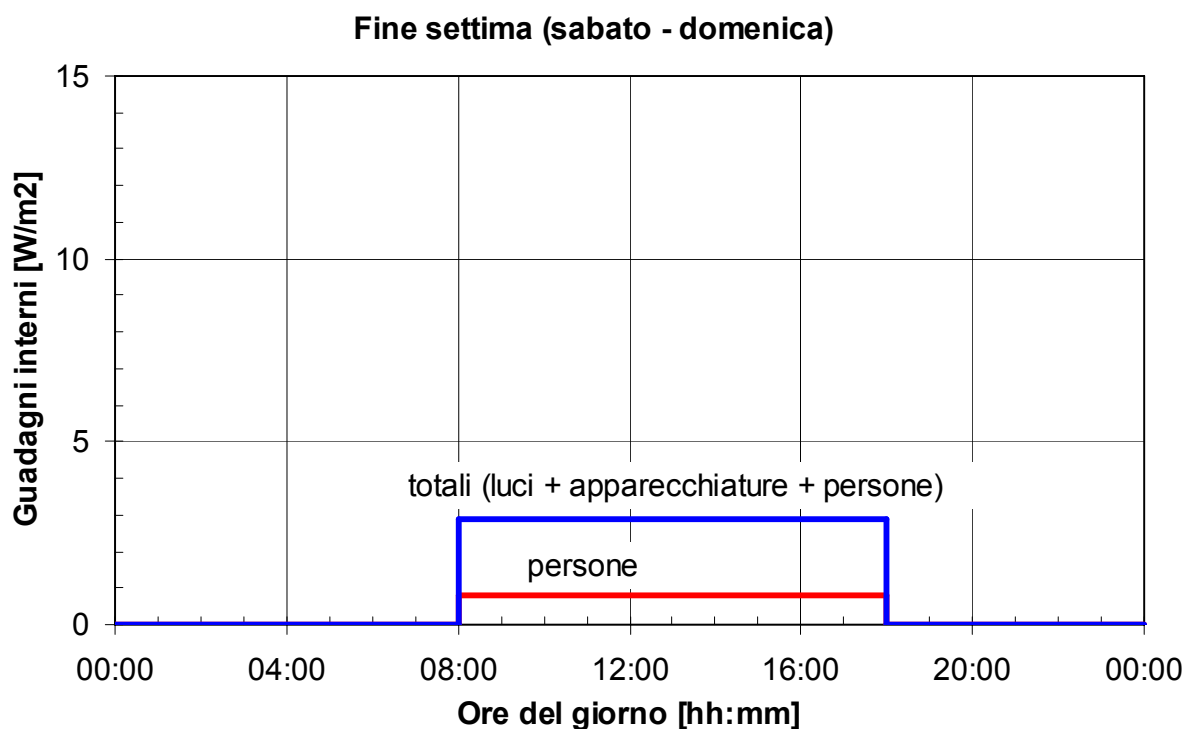


Figura A2.3 : profilo dei guadagni interni per il fine settimana (sabato – domenica). La superficie di riferimento è SREo.

A2.1.4. Ventilazione

Il ricambio d'aria è definito sulla base di due componenti:

- ricambio d'aria dovuto alle infiltrazioni. Si assume un ricambio costante pari a $0.1 \text{ [h}^{-1}\text{]}$;
- ricambio d'aria vero e proprio, dato dall'impianto di ventilazione meccanica. Si assume un ricambio costante pari a $0.5 \text{ [h}^{-1}\text{]}$ dalle 8:00 alle 18:00 per tutti i giorni dell'anno. Per ovvie ragioni di efficienza energetica, si assume un recupero di calore mediante uno scambiatore aria-aria caratterizzato da un'efficienza pari all'80%.

Inoltre, durante l'estate, se le condizioni lo permettono, si assume un raffrescamento notturno dalle 22:00 alle 6:00 con un ricambio d'aria di $2 \text{ [h}^{-1}\text{]}$.

Sulla base delle precedenti assunzioni, si ha un ricambio d'aria medio durante il periodo di riscaldamento corrispondente a $0.31 \text{ [h}^{-1}\text{]}$, con $0.1 \text{ [h}^{-1}\text{]}$ per le infiltrazioni e $0.21 \text{ [h}^{-1}\text{]}$ per la ventilazione meccanica.

La norma SIA 380/1 fissa un valore pari a $0.7 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, al quale corrisponde un tasso di ricambio dell'aria di $0.27 \text{ [h}^{-1}\text{]}$ ($\text{SREo} = 2'190 \text{ m}^2$ e volume riscaldato netto di $5'670 \text{ m}^3$). Il ricambio di aria dell'edificio simulato è quindi leggermente più grande che quello fissato dalla norma SIA 380/1.

A2.1.5. Bilancio energetico

Il bilancio energetico dell'edificio è stato valutato mediante simulazioni in regime dinamico fissando le esigenze per il riscaldamento e il raffreddamento come segue:

- temperatura minima dell'aria interna sempre superiore a 20°C ;
- temperatura massima dell'aria interna sempre inferiore a 26°C .

L'andamento per un anno delle potenze di riscaldamento e raffreddamento dell'edificio sono mostrate in figura A2.4.

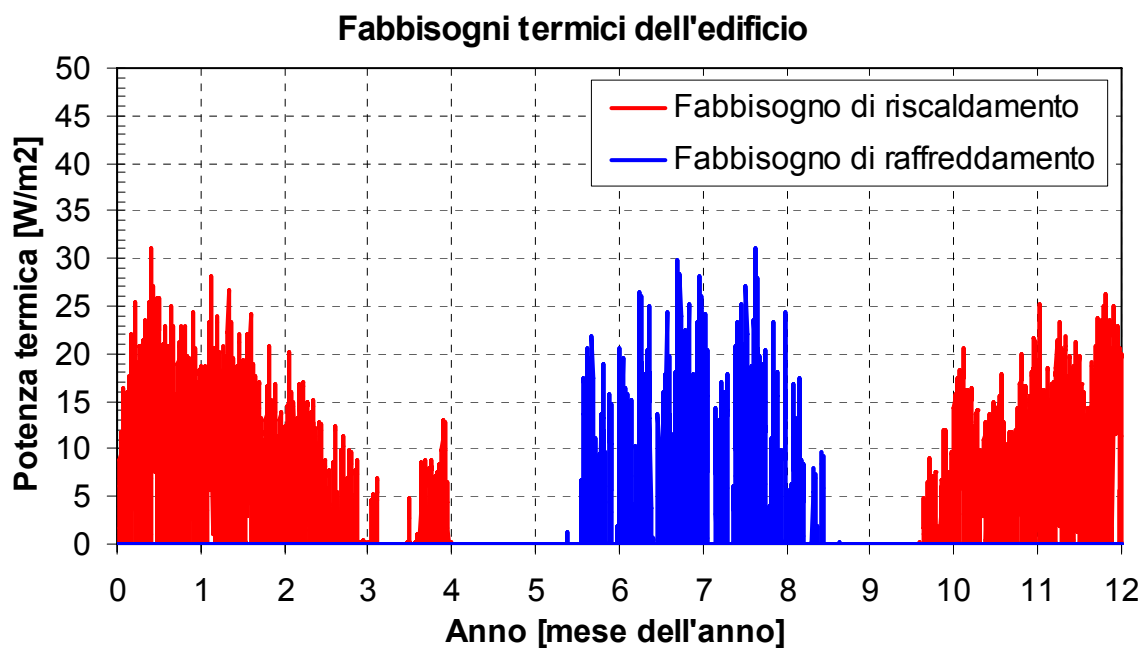


Figura A2.4 : fabbisogni termici simulati per garantire una temperatura interna compresa tra 20 e 26°C. La superficie di riferimento è SREo.

I guadagni solari rappresentano un contributo molto importante ai fini del bilancio energetico di un edificio con estese superfici vetrate. La simulazione dei guadagni solari è mostrata nella figura A2.5 per l'anno intero e il mese di luglio.

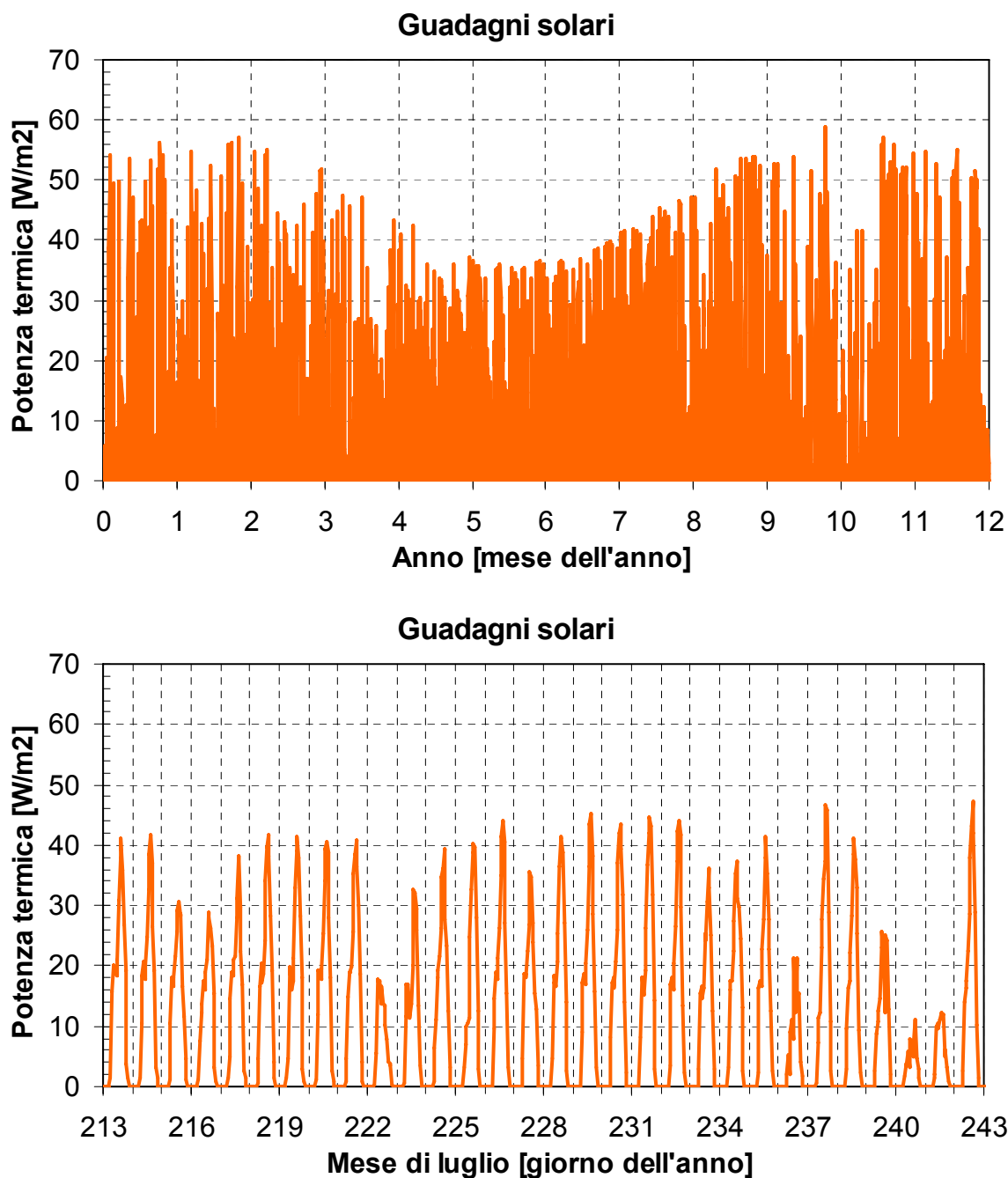


Figura A2.5 : guadagni solari simulati per un anno intero e zoom su il mese di luglio. La superficie di riferimento è SREo.

Sulla base delle simulazioni fatte, il fabbisogno di raffreddamento massimo risulta essere pari a circa 30 W/m^2 , nonostante il fatto che i guadagni solari, d'estate, possano assumere valori fino a 50 W/m^2 . Ciò è principalmente dovuto all'inerzia termica dell'edificio che permette di smorzare le punte dei carichi termici.

Nella figura A2.6, sono rappresentati i guadagni solari relativi ad un giorno estivo sereno, il 26 luglio.

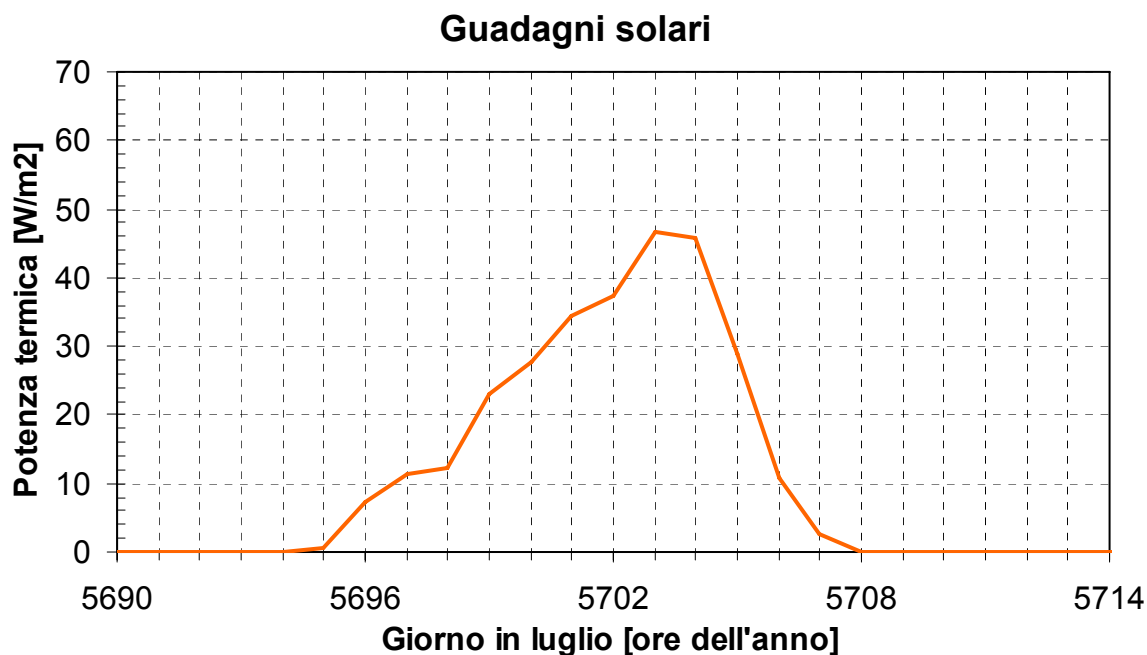


Figura A2.6 : guadagni solari simulati per un anno intero e zoom su il mese di luglio. La superficie di riferimento è SREo.

Nella tabella A2.3, sono elencati i valori mensili dei fabbisogni termici, dei guadagni interni e solari e delle perdite di ventilazione. La superficie di riferimento è questa volta la SRE.

Referenza	Fabbisogni termici		Guadagni termici		Perdite per ventilazione	
SRE : 2'360 [m ²] [MJ/m ²]	riscal- damento [MJ/m ²]	raffred- damento [MJ/m ²]	interni [MJ/m ²]	solari [MJ/m ²]	infiltrazioni [MJ/m ²]	impianto ventilazione [MJ/m ²]
Gennaio	27 0		9 15		4	2
Febbraio	22 0		8 16		4	1
Marzo	9 0		9	21	3 1	
Aprile	2 0		9	19	2 1	
Maggio	0 0		9	24	4 2	
Giugno	0 2		9	25	9 2	
Luglio	0 10		9 28		10 1	
Agosto	0	8	9 27		11 1	
Settembre	0 1		9	24	9 2	
Ottobre	2 0		9	17	2 2	
Novembre	17 0		9 15		3	1
Dicembre	27 0		9 14		4	2
Anno	106	21 106	245 65		18	

Tabella A2.3 : Valori mensili dei fabbisogni termici, dei guadagni termici e delle perdite di ventilazione dell'edificio simulato per mantenere la temperatura dell'aria interna tra i 20 e i 26°C.

Le perdite termiche per ventilazione e dovute alle infiltrazioni comprendono anche le perdite corrispondenti alle ore di raffreddamento notturno dell'edificio. Si può osservare che le perdite maggiori ricorrono da giugno a settembre.

Le perdite termiche per ventilazione, dovute dall'impianto di aerazione meccanica, sono molto contenute, grazie al recupero di calore mediante scambiatore aria-aria con efficienza pari all'80%.

A2.1.6. Capacità termica interna

La capacità termica dell'edificio è simulata con le solite interne e le pareti massicce all'interno dell'involucro dell'edificio.

Tuttavia, nel modello di simulazione dell'edificio della dogana, una capacità termica istantanea deve anche essere definita per zona. Inizialmente quest'ultima è stata fissata a ca. 25 kJ/(m²K). Nelle variazioni giornaliere della temperatura interna fino a 4 – 4.5 K.

La temperatura interna al primo piano è stata rilevata durante tutto l'estate 2008. Le variazioni che ne risultano non eccedono 2 K. Lascia pensare che l'effetto della massa è molto più importante che simulato. Tuttavia dipende anche del sistema di ventilazione che, nel caso reale, porta anche energia.

Nel modello di simulazione, la capacità interna istantanea è stata aumentata a 100 kJ/(m²K). Questo valore è realistico per un edificio massiccio. Le variazioni di temperatura giornaliere sono quindi scesi a 3 – 3.5 K.

A2.2. Riferimenti

Klein S. A. et al. (2007) **TRNSYS. A Transient System Simulation Program**. Version 16.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.

Remund J. and Kunz S. (2004) **Meteonorm Version 5.1. Global meteorological database for applied climatology**. www.meteonorm.com

Annex 3

The COOLSIM simulation tool

Table of content

A3.1.	The COOLSIM Simulation Tool	A3.1
A3.1.1.	Introduction	A3.1
A3.1.2.	COOLSIM System Border	A3.1
A3.1.3.	TABSIM System Border	A3.2
A3.1.4.	COOLSIM System Simulation Tool	A3.2
A3.1.5.	Input Data to COOLSIM	A3.2
A3.1.6.	How to Run COOLSIM	A3.18
A3.1.7.	Output Data from COOLSIM	A3.21
A3.1.8.	Output Results with COOLSIM	A3.30
A3.2.	Input parameters for the building	A3.37
A3.2.1.	Introduction	A3.37
A3.2.2.	Input variables	A3.37
A3.2.3.	Output variables	A3.38
A3.3.	References	A3.38

A3.1. The COOLSIM Simulation Tool

A3.1.1. Introduction

The COOLSIM simulation tool is devised for the simulation of office buildings heated with a heat pump coupled to a borehole field or energy piles, and cooled with these latter by geocooling. No hot water is covered by the system. The energy concept involves a heat pump directly coupled to active concrete plates or floor heating, which are also used for cooling. No cooling and dehumidification is simulated in the building ventilation system.

The COOLSIM simulation tool has been developed on the basis of the PILESIM2 simulation tool (PAHUD, 2007).

A3.1.2. COOLSIM System Border

The delimitation of the simulated system is shown by the system border in figure A3.1.

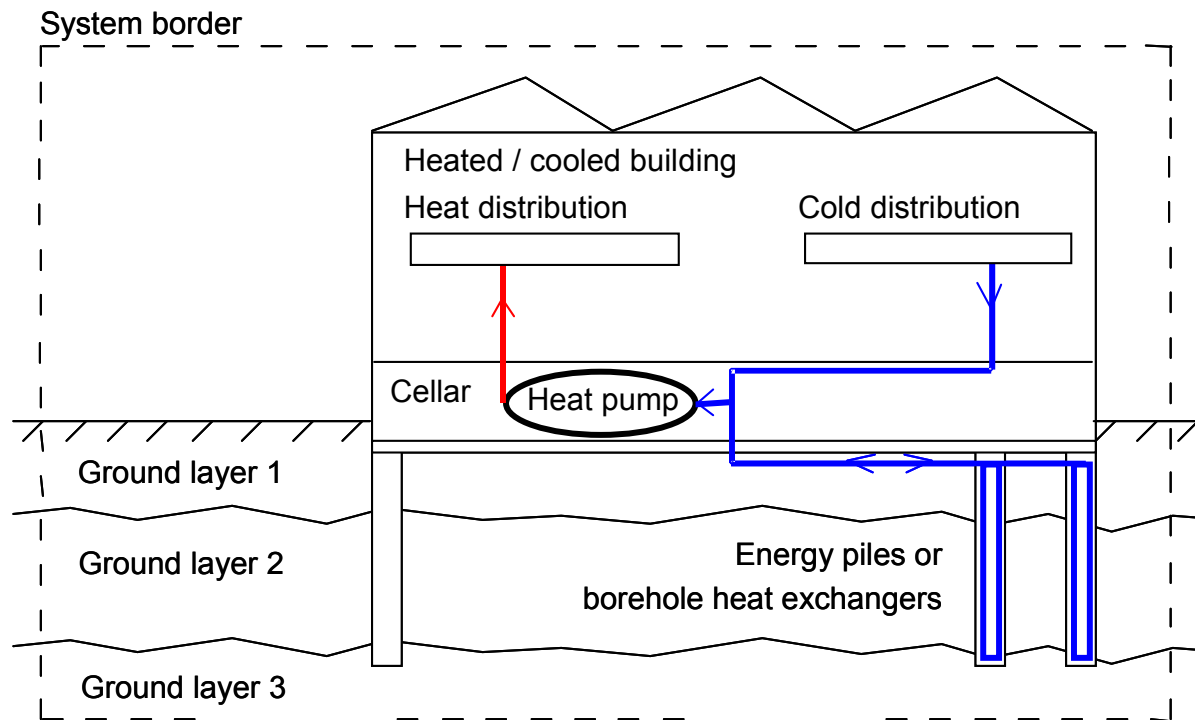


Figure A3.1 System simulated by the COOLSIM tool.

A3.1.3. TABSIM System Border

In a first step, the determination of the heating and cooling requirements of the building is performed with the TABSIM interface. The geothermal system is excluded from the simulation. The delimitation of the system part simulated with TABSIM is shown in figure A3.2.

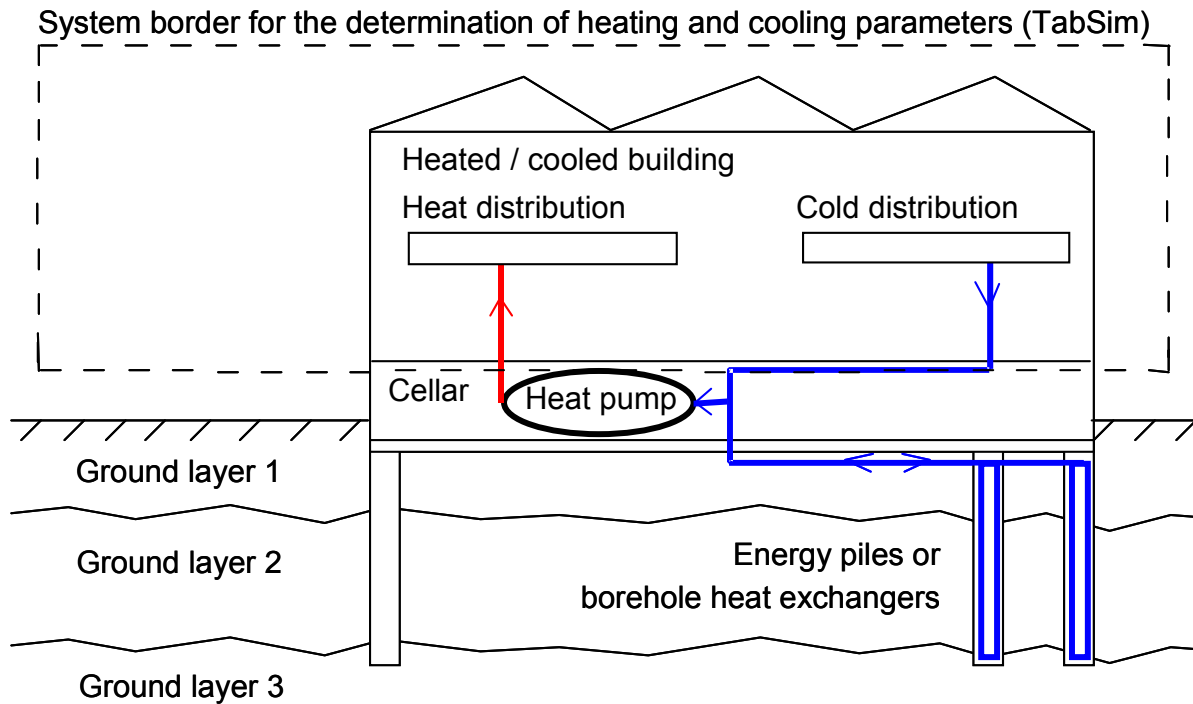


Figure A3.2 System part simulated by the TABSIM tool.

A3.1.4. COOLSIM System Simulation Tool

The use of COOLSIM requires to define first the heating and cooling requirements of the building. Heating power and cooling temperature have to be adjusted together with set point temperatures and controls, so that thermal comfort is ensured with minimum energy requirements. The tool TABSIM has been devised for this purpose. It is a simplified version of COOLSIM. The input data to TABSIM are the same as those for COOLSIM, except for the non necessary components, such as the geothermal system. In the next section, input data to COOLSIM are listed and defined.

A3.1.5. Input Data to COOLSIM

The input data to COOLSIM concern all the information that can be varied by the user. In particular, the input data define the size and characteristics of the different parts of the system and the driving conditions which will condition the operation of the system. In this chapter, each parameter required to COOLSIM is described and explained.

The input data are grouped in 6 blocks:

- Simulation and location
- Building
- Heating and cooling
- Interface ground-building
- Ground heat exchanger
- Ground characteristics

The TABSIM tool, used to determine the building control, heating and cooling requirements, only requires the input data of the three blocks “Simulation and location”, “Building” and “Heating and cooling”.

COOLSIM and TABSIM are TRNSYS applications. The input parameter values may either be given in the “primary units”, which correspond to the unit assumed by TRNSYS, or in the “secondary units”, which are more convenient units for the user. For example, the primary unit of thermal conductivity is $[kJ/(h \cdot m \cdot K)]$, whereas the secondary unit is $[W/(mK)]$. All the units given in the following sections for the input parameters correspond to the “secondary units”. When COOLSIM or TABSIM is used, it is highly recommended to set the units on “secondary”. This is done by selecting *Secondary Units* in the menu *TRNSYS* of the TRNSYS application.

Simulation and location:

The entries are grouped in three blocks:

Simulation parameters:

Month for simulation start: the simulation starts the first day of the chosen month.

Length of simulation: duration of the simulation period. The maximum duration is limited to 50 years.

Time interval for output results: quantities can be calculated on a monthly basis or a yearly basis. They are integrated heat rates or average values. See chapter A3.6 for a complete description of the output results.

Print hourly values for last year: this parameter determines if the hourly values of some selected quantities are written (yes) or not (no) for the last operational year (see chapter A3.6 for more details).

Online plotter:

Check the box to plot thermal powers and fluid temperatures of the ground heat system during simulation.

Location parameters:

Meteorological data for location: choose from the list the location of the project. This choice determines the weather data file that will be used for the simulation. If you would like to add more locations, you have to create a weather file with Meteoronorm and update the file LocationList.txt in the Weather subdirectory. Please follow the indications given in this file.

Latitude, longitude and altitude of location: choose from the list the same location of the previous one used for the meteorological data. This choice sets the latitude, longitude and altitude of the location.

Building:

The entries are grouped in two blocks:

Building parameters:

Data file for building description: choose from the list the building name to be simulated. This choice determines the building data file that defines the building thermal parameters. If you would like to add more buildings, you have to define them with TRNBuild of the TRNSYS package and update the file BuildingList.txt in the Building subdirectory. Please follow the indications given in this file.

Surface values for building data file: choose from the list the same building name as the previous one. This choice sets various surface areas. They are:

- SRE: heated/cooled reference area of building (zone 1 and 2) [m²]
- Stabs3: area of the fictive zone 3 used for the simulation of TABS3 [m²]
- Stabs4: area of the fictive zone 4 used for the simulation of TABS4 [m²]
- Stabs5: area of the fictive zone 5 used for the simulation of TABS5 [m²]
- Stabs6: area of the fictive zone 6 used for the simulation of TABS6 [m²]

The total area of the TABS in the building is given by the sum of the areas of the 4 fictive zones. The latter are stored in the file BuildingList.txt and must correspond to the building description file. Please follow the indications given in this file for any modification.

Azimuth of south- west façade [AzimSudWest]: azimuth of the south-west façade [°]. Should be comprised between 0° and 90°. All the 4 façades are supposed to be at right angle, forming thus a rectangular shape.

Scaling factor for internal heat gains [ScaleGainInt]: scaling factor for internal heat gains [-]. The daily and weekly profile of the internal heat gains are defined in the building definition file. This scaling factor enables to amplify them with a constant factor.

Air change rate for night cooling [ACRnight]: air change rate for nocturnal ventilation when the building is cooled during Summer. A typical value is an air change rate of 2 [h⁻¹].

Nominal air change rate of mechanical system ventilation [ACRmechanic]: nominal air change rate of the mechanical system ventilation [h⁻¹]. The mechanical system ventilation is operating according to daily and weekly schedules. When the ventilation system is operating, this parameter defines the ventilation air change rate.

Efficiency of the mechanical system heat recovery units [AirHXEfficiency]: nominal efficiency of the mechanical system heat recovery units [-]. The heat recovery units of the mechanical ventilation system are simulated with a constant heat exchanger efficiency. A typical value is an efficiency of 0.8 [-]

Specific flow rate in TABS [FlowSpecTABS]: specific flow rate in tabs [(kg/h)/m²]. It is the total flow rate through the TABS divided by the total area of the concrete active plates; (it is the area of all the internal concrete plates equipped with pipes).

Thermal resistance fluid-concrete in TABS [RTABS]: thermal resistance between the fluid circulating in the pipes and the concrete in the plane of the pipes [K/(W/m²)].

$$RTABS = \ell \left(\frac{1}{\pi \lambda_f Nu} + \frac{1}{2 \pi \lambda_p} \ln \left(\frac{\delta}{\delta_{pi}} \right) + \frac{1}{2 \pi \lambda} \ln \left(\frac{\ell}{\delta \pi} \right) \right) \quad (A3.1)$$

With :

ℓ : distance between pipes in the concrete plates (typical distance = 0.15 [m]) (TABS);
 λ_f : thermal conductivity of the fluid circulating in the pipes (water = 0.6 [W/mK]);
 Nu : Nusselt number for the convective heat transfer between fluid and inner pipe wall. It depends on the fluid flow regime (laminar, $Nu = 4.36$ [-]);
 λ_p : thermal conductivity of the pipe material (plastic pipe in polyethylene: 0.4 [W/mK]);
 λ : concrete plate thermal conductivity (concrete : 1.8 [W/mK]);
 δ : external pipe diameter (typical diameter = 0.02 [m]);
 δ_{pi} : internal pipe diameter (typical diameter = 0.016 [m]);
 $RTABS$: thermal resistance between the fluid temperature and mean concrete temperature in the pipe plane ($RTABS$ is calculated to 0.043 [K/(W/m²)] with above parameters);

The validity of equation (A3.1) is guaranteed if the following two conditions are met :

$$d_i / \ell > 0.3, \quad i = 1 \text{ and } 2 \quad (A3.2)$$

$$\delta / \ell < 0.2 \quad (A3.3)$$

$d_1 + d_2$: concrete plate thickness [m] ;
 d_1 : thickness of concrete plate layer lying over the pipe plane [m] ;
 d_2 : thickness of concrete plate layer lying under the pipe plane [m] .

Building control parameters:

Daily temperature limit for Winter [TlimitWinter]: daily outdoor air temperature limit under which heat recovery on the ventilation system is performed [°C]. The running mean outdoor air temperature, defined according to the standard DIN EN 15251, is chosen for the daily outdoor air temperature. It has no direct influence on the heating control of the building.

Daily temperature limit for Summer [TlimitSummer]: daily outdoor air temperature limit over which cooling is allowed [°C]. The running mean outdoor air temperature, defined according to the standard DIN EN 15251, is chosen for the daily outdoor air temperature. This temperature condition has to be met to enable the cooling control of the building and nocturnal cooling with the ventilation system. It is used to determine the duration of the cooling period. The remaining time of the year is the winter use duration. In any case cooling is only allowed if no heating requirement is requested. In practice heating and cooling conflict never happens as it is requested that the indoor air temperature limit to switch off cooling (TSetCoolingLow) is larger than that to switch off heating (TSetHeatingHigh).

Set point temperature to switch on heating [TSetHeatingLow]: indoor air temperature limit under which heating is switched on [°C].

Set point temperature to switch off heating [TSetHeatingHigh]: indoor air temperature limit over which heating is switched off [°C]. This temperature limit has to be larger than TSetHeatingLow, used to switch on heating.

Set point temperature to switch on cooling [TSetCoolingHigh]: indoor air temperature limit over which cooling is switched on [°C].

Set point temperature to switch off cooling [TSetCoolingLow]: indoor air temperature limit under which cooling is switched off [°C]. This temperature limit has to be smaller than TSetCoolingHigh, used to switch on cooling.

Heating and cooling:

The entries are grouped in various blocks:

Heat pump power and efficiency:

Design thermal power of the heat pump [PHeatDesign]: design (or nominal) thermal power delivered at the condenser of the heat pump (PAC). It is the heating power delivered by the heat pump at nominal temperature conditions in evaporator and condenser [kW].

Design performance coefficient [COPo]: the design performance coefficient is the performance coefficient of the heat pump when the inlet fluid temperature in the evaporator and the outlet fluid temperature from the condenser are at their design values [-]. The design performance coefficient is expressed by relation (A3.4):

$$COPo = P_{HeatDesign} / P_{el} \quad (A3.4)$$

PHeatDesign: design heating power delivered by the heat pump.

Pel: design electric power absorbed by the compressor of the heat pump.

The design electric power of the heat pump is assumed to be constant even when the heat pump performance coefficient is calculated in function of the temperature levels in evaporator and condenser.

Heat pump COP:

Constant or variable COP during simulation: check the box according to the desired choice. With the constant COP choice the performance coefficient is kept constant and set to its design value (COPo). With the variable COP choice the performance coefficient is free to vary according to operating conditions. If the variable COP box is checked, the next parameter block "Heat pump COP dependencies" has to be filled in. Otherwise this block of parameters is not shown.

Heat pump COP dependencies:

The parameters for the heat pump COP dependencies refer to the heat pump model described in chapter 7 of the PILESIM2 user manual (Pahud, 2007). They only have to be entered if the variable COP option has been checked.

Design inlet fluid temperature in evaporator for COPo: design inlet fluid temperature in the evaporator that leads to the design performance coefficient (COPo) of the heat pump [°C].

Design outlet fluid temperature from condenser for COPo: design outlet fluid temperature from the condenser that leads to the design performance coefficient (COPo) of the heat pump [°C].

Temperature difference for COP reduction: parameter ΔT_{COP} for the heat pump model [K].

Temperature difference for COP stagnation: parameter ΔT_{stag} for the heat pump model [K].

Maximum possible COP: maximum value that the heat pump performance coefficient (COP) may have [-].

Penalty on the COP: penalty on the performance coefficient [-]. This value is subtracted from the calculated value, so that transient effects, bad control of the heat pump or something else, can be artificially taken into account. Typical values are comprised between 0 and 0.5.

Heat pump temperature difference:

Design inlet-outlet temperature difference in evaporator (PAC): design temperature drop between inlet and outlet fluid that crosses the heat pump evaporator [K]. Together with the heat power extracted under design conditions, this temperature drop determines the flow rate through the evaporator. This flow rate is also the total flow rate in the flow circuit of the borehole heat exchangers or the energy piles when the heat pump is operating. It is called the heating flow rate. When the operating mode is geocooling, the flow rate through the pile flow circuit is equal to that in the cooling distribution of the building, even if a heat exchanger is physically decoupling hydraulically the two flow circuits.

Design inlet-outlet temperature difference in condenser (PAC): design temperature drop between inlet and outlet fluid that crosses the heat pump condenser [K]. This temperature difference, together with the design thermal power of the heat pump, is determining the fluid flow rate through the heat pump condenser. It is important that the flow rate through the heat distribution system (TABS or else) is not smaller than the flow rate through the heat pump condenser. If it is the case, the flow rate in the distribution system is set to the heat pump condenser flow rate when heating is performed.

Temperature limitation:

Minimum allowed temperature of the heat carrier fluid in the piles/boreholes [TfMin]: minimum tolerated fluid temperature in the boreholes/piles hydraulic circuit [°C]. This value may limit the heat rate that is extracted from the ground, as the simulated inlet fluid temperature in the bores / piles is limited by this value. This constraint limits the size of the heat pump or the total length of the borehole heat exchangers, as a normal system operation should never lead to a fluid temperature below this limit.

Geocooling:

Design forward fluid temperature for cooling [TCoolDesign]: design forward fluid temperature for cooling [°C]. This value is assumed to be constant all through the year. If the outlet fluid temperature from the ground heat exchanger is low enough to guarantee this forward fluid temperature (taking into account the counter flow heat exchanger between the cooling distribution and the ground flow loop), then the cooling requirement is met. The forward fluid temperature in the cooling distribution is fixed to the design one (TCoolDesign). If the resulting temperature lies between the design forward one and the return fluid temperature from the cooling distribution, then only a fraction of the cooling demand is met. If the resulting temperature is larger than the return one from the cooling distribution, geocooling is not possible and stopped. In this case the cooling demand is not satisfied. No backup cooling energy is provided in the building. It will result a larger indoor air temperature and a lesser thermal comfort in the building.

Design heat transfer coefficient of geocooling counterflow heat exchanger [HXUAGEO]: design heat transfer coefficient of the counterflow heat exchanger between the cooling distribution and the ground flow loop [kW/K]. If no heat exchanger is present, this parameter can be fixed to an arbitrary large value (for example 10^{25} kW/K).

Interface ground-building:

The entries are grouped in the following block:

Location of the ground heat exchanger:

Under or outside of the building: check the box according to the desired choice. If the box "energy piles, borehole heat exchangers under the building" is checked, the entries of the block "Interface ground heat exchanger-building" are shown and have to be filled in. In the contrary, if the box "borehole heat exchangers outside of the building" is checked, the entries of the box "Interface building-ground and ground heat exchanger-garage/outside" are shown and have to be filled in.

Interface ground heat exchanger-building:

These entries are shown only if the box "energy piles, bore hole heat exchangers under the building" is checked.

Height of the cellar between rooms and ground [Hfloor]: height of the cellar that lies between the ground and the heated rooms [m]. This parameter is used to estimate the air volume of the cellar for air change losses. The cellar volume is calculated with the cellar floor area (see equation A3.7).

Air change rate in the cellar [ACRcellar]: this air change rate determines the heat losses or gains with the outdoor air [h^{-1}]. For the sake of simplicity, the losses from the cellar to the exterior (outdoor air) are only computed by ventilation losses. Thus the specific heat losses from the cellar to the exterior (U_{ce}) are established with formula A3.A3.

$$U_{ce} (\text{kJ/hK}) = \text{Cellar_floor_area} (\text{m}^2) \times \text{Cellar_height} (\text{m}) \times 1.2 (\text{kJ/m}^3\text{K}) \times \text{Cellar_air_change_rate} (1/\text{h}) \quad (\text{A3.5})$$

$$U_{ce} (\text{W/K}) = U_{ce} (\text{kJ/hK}) \times 1000 (\text{J/kJ}) / 3600 (\text{s/h}) \quad (\text{A3.6})$$

The Cellar_air_change_rate is ACRcellar (label of this parameter), the Cellar_height is Hfloor (label of the previous parameter) and the Cellar_floor_area, supposed to be delimited by the area occupied by the energy piles or boreholes, is calculated with relation A3.7.

$$\text{Cellar_floor_area} = \text{BPILE} \times \text{BPILE} \times \text{PileNumber} \quad (\text{A3.7})$$

BPILE is the average spacing between the piles (see below **Average spacing between the piles**); PileNumber is the total number of energy piles or boreholes.

Heated / cooled zone in contact with the ground:

If the heated or cooled zone (having a room air temperature given by the indoor air temperature simulated for the building), is in close contact with the bore/pile field (no cellar), set parameter ACRcellar to zero:

$$\text{ACRcellar} = 0 [\text{h}^{-1}]$$

The room-cellar specific heat losses should have a large value but must be in any case compatible with the building elements that separate the heated zone from the non heated space in contact with the ground. They are defined in the building definition file (see next parameter for more details).

Total room-cellar specific heat losses of the selected building: total specific heat losses of the building to the cellar that has been selected in block "Building parameters" of section "Building" [W/K].

If, for example, there are two building elements in contact with the cellar, having respectively for U-values and areas: U_1 , S_1 , U_2 and S_2 , the specific heat losses to the cellar are, without air convective heat transfer between the heated building and cellar:

$$U_{cm} (\text{W/K}) = S_1 (\text{m}^2) \times U_1 (\text{W/m}^2\text{K}) + S_2 (\text{m}^2) \times U_2 (\text{W/m}^2\text{K}) \quad (\text{A3.8})$$

With $U_1 = 0.29 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $S_1 = 323 \text{ m}^2$ and $U_2 = 0.296 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $S_2 = 118 \text{ m}^2$, the specific heat losses are:

$$U_{cm} = 128.6 \text{ W/K}$$

Insulation thickness between ground and cellar [Hinsul]: the insulation thickness between the ground and the cellar determines the thickness of the insulation layer that lies between the cellar and the ground [m]. A thermal conductivity of 0.05 W/mK is assumed for the insulation material. The horizontal pipes that connect the heat exchanger piles to the pipe collectors are supposed to lie below the insulation layer.

A different thermal conductivity for the insulation material (for example "New_lambda_insulation" W/mK) can be taken into account by using formula A3.9.

$$H_{insul} = H_{insul_actual} \times 0.05 \text{ (W/mK)} / \text{New_lambda_insulation (W/mK)} \quad (A3.9)$$

Where H_{insul_actual} is the actual thickness of the insulation layer.

Concrete thickness between ground and cellar [Hmagco]: the concrete thickness between the ground and the cellar determines the thickness of the concrete plate that lies between the cellar and the ground [m]. A thermal conductivity of 1.3 W/mK is assumed for this concrete. The horizontal pipes that connect the heat exchanger piles to the pipe collectors are supposed to lie below the concrete plate. A different thermal conductivity for the concrete (for example "New_lambda_concrete" W/mK) can be taken into account by using formula A3.10.

$$H_{magco} = H_{magco_actual} \times 1.3 \text{ (W/mK)} / \text{New_lambda_concrete (W/mK)} \quad (A3.10)$$

Where H_{magco_actual} is the actual thickness of the concrete plate.

Length of the horizontal connecting pipes on ground heat exchanger [LCOEPF]: the length of the horizontal pipes on ground is the effective pipe length that connects the bores or piles to the main pipe collectors [m]. This parameter is used for the determination of the heat transfer that occurs between the fluid in these pipes and the ground in the plane of the pipes. The pipes are supposed to lie below the concrete plate and the insulation layer if any. The calculation assumes a uniform density of horizontal pipes in the interface ground - cellar. In reality this is not the case and a rough approximation is to set this parameter to half of the total horizontal pipe length. The influence of the horizontal pipes on ground is not taken into account if LCOEPF is set to zero. The heat transfer coefficient of the horizontal pipes is calculated with an approximation developed by Koschenz and Dorer (1996). See formulas A3.11 and A3.12.

$$ECARCO \text{ (m)} = \text{Cellar_floor_area (m}^2\text{)} / \text{LCOEPF (m)} \quad (A3.11)$$

ECARCO is the average distance between the horizontal pipes on ground and the Cellar_floor_area is defined by formula A3.7. LCOEPF is the label for the length of the horizontal pipes on ground. The heat transfer coefficient from the fluid in the pipes to the ground in the plane of the pipes, U_{PipeCo} , is given by two thermal resistances in series (see relation A3.12).

$$U_{PipeCo} \text{ (W/m}^2\text{K)} = \frac{1}{ECARCO \left(R_{fluid_pipe} + \frac{1}{2 \pi \lambda_g} \ln \left(\frac{ECARCO}{\pi \phi_{o_pipe}} \right) \right)} \quad (A3.12)$$

R_{fluid_pipe} (K/(W/m)) is the thermal resistance between the fluid and the outer side of the pipe wall. This resistance is arbitrarily fixed to 0.272 K/(W/m). The second term in the

parenthesis of relation A3.12 is the thermal resistance from the outer pipe wall to the average temperature of the ground in the plane of the pipes. The thermal conductivity of the ground in the pipe plane, is denoted λ_g , is fixed to 1.3 W/mK. The outer diameter of the pipe is ϕ_{o_pipe} and fixed to 32mm.

Interface building-ground and ground heat exchanger-garage/outside:

These entries are shown only if the box "borehole heat exchangers outside of the building" is checked.

Air temperature in building cellar [TairCellar]: air temperature in the cellar [°C]. This air temperature is constant and given as input to the building simulation model.

Constant air temperature component of garage [TconstGarage]: constant temperature component assigned to the garage that lies over the borehole heat exchangers [°C]. The air temperature in the garage will result from the heat transfer from this constant temperature and the corresponding heat transfer coefficient UCellBu (see parameter below), heat transfer with the outside air, calculated with a constant air change rate ACRcellar, and heat transfer with the ground (to p side of the ground volume enclosed by the ground heat exchanger).

If no garage is present on top of the ground heat exchanger, UCellBu can be fixed to zero and ACRcellar to an arbitrary large value (see parameter ACRcellar below), so that the garage temperature is equal to the outside air temperature.

Height of the garage above the ground heat exchanger [Hfloor]: height of the garage that lies above the ground heat exchanger [m]. This parameter is used to estimate the air volume of the garage for air change losses. The volume is calculated with the cellar floor area (see equation A3.7).

Air change rate in garage [ACRcellar]: this air change rate determines heat losses or heat gains in the garage with the outdoor air [h⁻¹]. For the sake of simplicity, the losses from the garage to the exterior (outdoor air) are only computed by ventilation losses. The specific heat losses from the garage to the exterior (Uce) are calculated using formula A3.5 and A3.6.

No garage above the ground heat exchanger:

If there is no garage above the ground heat exchanger, the air temperature of the "missing" garage should be equal to that of the outside air. This is possible by setting the parameters ACRcellar and UCellBu (next parameter) to the following values :

$$\begin{aligned} \text{ACRcellar} &= 10^{25} \text{ [h}^{-1}\text{]} \text{ (and the parameter Hfloor has to be greater than 0)} \\ \text{UCellBu} &= 0 \text{ [W/m}^2\text{K]} \end{aligned}$$

Heat transfer coefficient with constant air temperature component of garage [UCellBu]: heat transfer coefficient between the constant temperature component of the garage and its resulting air temperature. The heat transfer is calculated with the specific losses coefficient Ucm. This latter is obtained with formula A3.13.

$$U_{cm} \text{ (W/K)} = \text{Cellar_floor_area (m}^2\text{)} \times U_{CellBu} \text{ (W/m}^2\text{K)} \quad (\text{A3.13})$$

See formula A3.7 for the calculation of Cellar_floor_area.

No garage above the ground heat exchanger:

If there is no garage above the ground heat exchanger, the air temperature of the "missing" garage should be equal to that of the outside air. This is possible by setting the parameters ACRcellar (previous parameter) and UCelBU to the following values :

ACRcellar = $10^{25} \text{ [h}^{-1}\text{]}$ (and the parameter Hfloor has to be greater than 0)
UCelBU = 0 $[\text{W/m}^2\text{K}]$

Insulation thickness between ground and garage [Hinsul]: the insulation thickness between the ground and the garage determines the thickness of the insulation layer that lies between the cellar and the ground. A thermal conductivity of 0.05 W/mK is assumed for the insulation material. The horizontal pipes that connect the bores or piles to the main pipe collectors are supposed to lie below the insulation layer. A different thermal conductivity for the insulation material (for example "New_lambda_insulation" W/mK) can be taken into account by using formula A3.9.

Concrete thickness between ground and garage [Hmagco]: the concrete thickness between ground and garage determines the thickness of the concrete plate that lies between the ground and garage. A thermal conductivity of 1.3 W/mK is assumed for concrete. The horizontal pipes that connect the borehole heat exchangers to the main pipe collectors are supposed to lie below the concrete plate. A different thermal conductivity for concrete (for example "New_lambda_concrete" W/mK) can be taken into account by using formula A3.10.

Length of the horizontal pipes on ground [LCOEPF]: the length of the horizontal pipes on ground is the effective pipe length that connects the borehole heat exchangers to the main pipe collectors. This parameter is used for the determination of the heat transfer that occurs between the fluid in these pipes and the ground in the plane of the pipes. The pipes are supposed to lie below the concrete plate and the insulation layer if any. The calculation assumes a uniform density of horizontal pipes in the interface ground - garage. In reality this is not the case and a rough approximation is to set this parameter to half of the total horizontal pipe length. The influence of the horizontal pipes on ground is not taken into account if LCOEPF is set to zero. The heat transfer coefficient of the horizontal pipes is calculated with formulas A3.11 and A3.12.

Ground heat exchanger:

The entries are grouped in the following block:

Energy piles or borehole heat exchangers:

Up to 6 different pile/bore types can be specified. A pile/bore type is defined by its diameter, thermal resistance and average active pile/bore length. Average values are calculated from these quantities, as only one pile/bore type is simulated.

Diameter of pile/borehole type i ($i = 1$ [dp1], 2, 3, 4, 5 or 6). This parameter determines the diameter of pile/bore type i [m]. The average pile/bore diameter is calculated so that the total volume of piles/bores is preserved (see relation A3.14). It is written in the output parameter file with the extension ".PAR" (parameter label: AvePilDiam).

$$\text{AvePilDiam} = 2 \left(\frac{\sum_{i=1}^6 (d_{pi}/2)^2 H_i N_i}{\sum_{i=1}^6 H_i N_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A3.14})$$

d_{pi} is the pile/bore diameter of type i , H_i the pile/bore active length and N_i the pile/bore number (see below).

Number of piles/boreholes for type i ($i = 1$ [N1], 2, 3, 4, 5 or 6). This parameter determines the number of piles/bores of type i [-]. The total number of energy piles or boreholes is the sum of each pile/bore type number (see A3.15) and is written in the output parameter file with the extension ".PAR" (parameter label: PileNumber).

$$\text{PileNumber} = \sum_{i=1}^6 N_i \quad (\text{A3.15})$$

Average active length of piles/boreholes type i ($i = 1$ [H1], 2, 3, 4, 5 or 6). This parameter determines the average active pile length of pile type i [m]. The active length of a pile is defined by the pile length for which a radial heat transfer with the ground may occur. In other terms, it is the length of the pile that is equipped with pipes. The pile active length is smaller than the total pile length. An average active pile length is calculated for ALL the heat exchanger piles (see formula A3.16). It defines the vertical extension of the ground volume that contains the simulated piles. It is written in the output parameter file with the extension ".PAR" (parameter label: AvePLength).

$$\text{AvePLength} = \frac{\sum_{i=1}^6 N_i H_i}{\sum_{i=1}^6 N_i} \quad (\text{A3.16})$$

Thermal resistance Rb of pile/borehole type i ($i = 1$ [Rb1], 2, 3, 4, 5 or 6). This parameter determines the thermal resistance of pile/bore type i [K/(W/m)]. The thermal resistance of a pile/borehole determines the temperature difference between the fluid and the ground in the immediate vicinity of the pile/borehole under a given heat transfer rate. For example, a thermal resistance value of 0.1 K/(W/m) will induce a temperature difference of 5 K between the fluid temperature and the ground temperature at the pile/bore border, when a heat transfer rate of 50 W/m takes place in steady flux conditions in the pile/bore. For more information on pile thermal resistances, see Fromentin et al., 1997. For borehole thermal resistances, the use of the programme EED (Earth Energy Designer) is recommended (Hellström and Sanner, 1994). In EED, a tool for the calculation of borehole thermal resistances with single, double, triple U-pipe or coaxial pipes is integrated. Other pipe configurations in a borehole or a pile can be treated with the programme MPC (Bennet et al., 1987). Some thermal resistance values are given below.

Energy pile thermal resistances:

0.15 K/(W/m)	hollow prefabricated pile with a double U-pipe, pile diameter: 30 to 50 cm;
0.10 - 0.11 K/(W/m)	pre-cast or cast in place pile, double U-pipe fixed on the metallic reinforcement. Pile diameter: 30 to 150 cm;
0.07 - 0.08 K/(W/m)	pre-cast or cast in place pile, triple U-pipe fixed on the metallic reinforcement. Pile diameter: 30 to 150 cm;
0.06 K/(W/m)	pre-cast or cast in place pile, quadruple U-pipe fixed on the metallic reinforcement. Pile diameter: 30 to 150 cm;

Borehole thermal resistances:

A typical value of 0.1 K/(W/m) is representative for a double U-pipe in a borehole of diameter 10 to 15 cm.

An average pile/bore thermal resistance is calculated for ALL the energy piles/boreholes with the help of formula A3.17. The average pile/bore thermal resistance is calculated relatively to the average pile diameter (AvePilDiam). It is written in the output parameter file with the extension ".PAR" (parameter label: AveRbPile).

$$\sum_{i=1}^6 H_i N_i \frac{1}{\text{AveRbPile}} = \sum_{i=1}^6 \left\{ H_i N_i \frac{1}{\left(R_{bi} + \frac{1}{2 \pi \lambda_{\text{avegr}}} \ln \left(\frac{\text{AvePilDiam}}{d_{pi}} \right) \right)} \right\} \quad (\text{A3.17})$$

λ_{avegr} is the average ground thermal conductivity. This value takes into account the thermal conductivity of each ground layer which is crossed by the average active pile/bore length (AvePLength). It also takes into account the influence of a regional groundwater flow by using the correction factor applied on the thermal conductivity (see section 7.2 of PILESIM2 user manual).

Internal thermal resistance Ra of pile/borehole type i ($i = 1$ [Ra1], 2, 3, 4, 5 or 6). This parameter determines the internal thermal resistance of the piles/boreholes [K/(W/m)]. The internal thermal resistance of a pile/bore determines the internal heat transfers within the pile/bore.

A typical value is comprised between 0.1 - 0.4 K/(W/m) for a double U-pipe in a borehole heat exchanger.

Average spacing between the piles/boreholes [BPILE]: this parameter specifies the effective average spacing of ALL the piles/boreholes in the TWO spatial directions of the ground area that contains the piles/boreholes [m]. This parameter determines the ground volume (GrndVolume) that is ascribed to the piles/boreholes with relation A3.18.

$$\text{GrndVolume} = (\text{BPILE})^2 \times \text{PileNumber} \times \text{AvePLength} \quad (\text{A3.18})$$

See equations A3.15 and A3.16 for the total number of energy piles/boreholes (PileNumber) and the average active pile/bore length (AvePLength). The average spacing between the piles/boreholes is called BPILE. The ground volume used for the simulation is written in the output parameter file with the extension ".PAR" (parameter label: GrndVolume).

The best pile/bore arrangement for increased thermal performances is obtained with a regular spacing between the piles/ boreholes. If the shape of the area occupied by the piles/bores is close to a square, then the average spacing is easy to calculate.

A method to establish this parameter is to draw a line around the ground area that is occupied by the piles/boreholes. A "half average spacing" is maintained between the line and the piles/bores in the periphery. The area drawn by this line is then divided by the total number of energy piles/boreholes, and the average spacing is obtained by taking the square root of this number.

If the energy piles/boreholes are not uniformly placed within this area, it will result in a smaller average spacing. However, the effective average spacing remains greater than the smallest spacing between two energy piles/boreholes.

If the shape of the area that contains the piles/bores is close to a rectangle which is characterised by a large difference between its width and its length, then the average spacing will tend to be greater. As an example, about 200 heat exchanger piles uniformly placed in a rectangular shape of 50.0m x 30m were simulated. The calibration described below resulted in an increase of the average spacing from 9.3 to 10.1 m, thus less than 10%.

A more accurate method is to calibrate the model used in COOLSIM with a model that takes into account the exact position of the piles/bores. It can be done with TRNSBM, the Superposition Borehole Model.

Number of piles/boreholes coupled in series [NSERIE]. This parameter determines the number of piles/bores that are connected in series [-]. As the simulation model simulates a cylinder, a radial interconnection of the piles/bores is taken into account.

Pipe configuration in pile/borehole. The two possible pipe configuration in the pile/bore are:

U-pipe configuration: the pipe installation in the pile/bore is formed by one or more U-pipes placed close to the circumference of the pile/borehole.

Coaxial pipe installation: the pipe installation in the pile/bore is formed by a coaxial pipe.

Pipe number in a cross section of a pile/borehole: average number of pipes in a pile/bore cross section [-]. This number is used to estimate the total volume of fluid that is contained in the energy piles/boreholes. This parameter is only used to take into account the heat capacitive effects of the heat carrier fluid in the piles/boreholes. The total volume of heat carrier fluid contained in the piles is calculated with relation A3.19.

$$\text{Fluid_volume} = \text{NTUB} \times \pi \times (\text{Inner_pipe_radius})^2 \times \text{PileNumber} \times \text{AvePLength} \quad (\text{A3.19})$$

NTUB is the pipe number in a pile/bore cross section; Inner_pipe_radius is defined with the next input parameter (pipe number in a cross section of a pile); PileNumber and AvePLength are respectively the total number and the average active length of the energy piles/boreholes. If Fluid_volume, the volume of heat carrier fluid in the piles/boreholes, is known, then relation A3.19 can be used to calculate the average number of pipes in a pile/bore cross section.

Inner diameter of one pipe: this parameter represents the average inner diameter of the pipes in the energy piles/boreholes [mm]. It is only used to estimate the total volume of fluid that is contained in the energy piles/boreholes with relation A3.19. The total volume of fluid is only used to take into account the heat capacitive effects of the heat carrier fluid in the piles/boreholes.

Fraction of pile/borehole concrete/filling thermal capacity : this parameter defines the fraction of the pile concrete/bore filling material in the active zone of a pile/bore which contributes to heat capacitive effects [%]. The active zone of a pile/bore is the part that is equipped with plastic pipes for the heat transfer with the ground, i.e. the heat exchanger. A typical value of 50% was found to satisfactorily match measured data of a pile system (pile diameter of 30 to 40 cm). A large value may produce an error which aborts the programme when run. An error message is written in the listing file (COOLSIM.LST). Do not forget to read a possible error message near the end of this file if you can not run your case.

If borehole heat exchangers are simulated, the heat capacitive effects are small and a fraction of 0 can be set.

The heat capacitive effects of the pile concrete are calculated with an effective pile diameter and an effective pile thermal resistance (see equation A3.20 and A3.21). They are written in the output parameter file with the extension ".PAR" (the parameter labels are respectively: EffPilDiam and EffRbPil).

$$\text{EffPilDiam} = \text{AvePilDiam} \left(1 - \text{FrCapa} \left(\text{Cconcr}/\text{AveGrndCap}\right)\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A3.20})$$

AvePilDiam is the average pile diameter (see equation A3.14); FrCapa is the fraction of pile thermal capacity taken into account; Cconcr is the volumetric heat capacity of the pile concrete (Cconcr is set to 2'592 kJ/m³K); AveGrndCap is the average volumetric heat capacity of the ground in the zone crossed by the average active pile length.

$$\text{EffRbPile} = \text{AveRbPile} - \frac{1}{2\pi\lambda_{\text{avegr}}} \ln\left(\frac{\text{AvePilDiam}}{\text{EffPilDiam}}\right) \quad (\text{A3.21})$$

AveRbPile is the average pile thermal resistance and λ_{avegr} is the average ground thermal conductivity (see equation A3.17). AvePilDiam and EffPilDiam are respectively the average pile diameter and the effective average pile diameter (see equations A3.14 and A3.20).

Ground characteristics:

The entries are grouped in the following block:

Ground characteristics:

Up to 3 different horizontal ground layers can be specified. A ground layer is defined by its thickness, the thermal conductivity and volumetric heat capacity of the ground and the Darcy velocity of the water contained in the ground layer.

Initial ground temperature [TGRDIN]: this parameter specifies the initial temperature of the ground before the construction of the building [°C]. This temperature should be set to the annual average value of the ground near the surface. A rough estimation is to use the mean annual air temperature at the surface.

Mean temperature gradient in the undisturbed ground [dTGRND]: geothermal temperature gradient present at the project location [K/km]. Assumed to be constant, it defines the temperature increase in the ground with depth.

Thermal conductivity of ground layer i [LGi] ($i = 1, 2$ and 3): this parameter sets the thermal conductivity of ground layer i [W/(mK)]. For water saturated soils that requires the use of foundation piles, a typical value of 2 W/mK can be assumed. More information on

ground thermal conductivity can be found for example in Fromentin et al., 1997 or Hellström and Sanner, 1994.

Volumetric thermal capacity of layer i [CGi] ($i = 1, 2$ and 3): this parameter sets the volumetric thermal capacity of ground layer i [MJ/(m³K)]. For water saturated soils that requires the use of foundation piles, typical values lie between 2 and 3 MJ/m³K. More information on ground volumetric thermal capacity can be found for example in Fromentin et al., 1997 or Hellström and Sanner, 1994.

Thickness of ground layer i ($i = 1, 2$ and 3): this parameter sets the thickness of ground layer i [m]. The first ground layer must be larger than 0.3m, which is the layer 0, in which lie the horizontal pipes that connect the bores or piles to the heat pump. The thickness of ground layer 3, which is the lowest ground layer, is supposed to extend downwards as far as necessary by the thermal calculations.

Darcy velocity of ground water in layer i [DAi] ($i = 1, 2$ and 3): this parameter sets the Darcy velocity of the ground water in the ground layer i [m/day]. This parameter determines the forced convection in the ground layer i due to a horizontal regional ground water flow. A zero value means no forced convection. The Darcy velocity (in m/s) can be obtained by the product of the ground layer permeability (in m/s) times the horizontal hydraulic gradient of the regional ground water flow (in m/m). More information on ground permeability can be found for example in Fromentin et al., 1997.

NB: only a direct thermal interaction with the piles/bores is computed. In other terms, if the ground layer i lies below the bottom of the piles/bores, the effect of a regional ground water flow will not be computed. If only the upper part of ground layer i is crossed by the energy piles/boreholes, the effect will be computed in the upper part only. The thermal influence will be then propagated upwards and downwards by pure heat conduction.

NB: the full influence of a ground water flow is only calculated if the following two parameters switches are "ON".

Simulate forced convection on global process: this parameter determines if the global effect of the forced convection is taken into account (see below).

YES: global effect of forced convection taken into account;
NO: global effect of forced convection not taken into account.

Simulate forced convection on local process: this parameter determines if the local effect of the forced convection is taken into account (see below).

YES: local effect of forced convection taken into account;
NO: local effect of forced convection not taken into account.

The effect of forced convection is treated as the superposition of two effects:

the global process:

a heat balance of the heat transfer by forced convection is performed on the boundary of the ground volume that is ascribed to the energy piles/ boreholes. The heat quantity transferred by forced convection to or from the ground volume is treated as a global temperature change of the ground temperature in the volume. The global process takes into account long term effects, which, in particular, determine the magnitude of a natural thermal recharge of the ground by a regional ground water flow.

the local process:

for the case of pure heat conduction, a temperature gradient takes place around the energy piles/boreholes when they are used to transfer heat with the ground. As a result, the heat transfer is limited by the presence of a local temperature difference between the piles/bores and the mean ground temperature. If ground water flows across the piles/bores, the temperature field will be shifted. For a sufficiently large flow, the local temperature difference will be decreased and the heat transfer between the piles/bores and the ground improved. The local process takes into account the improvement of this heat transfer.

A3.1.6. How to Run COOLSIM

Once the data are defined as desired, it is recommended to save the data before a simulation is started. The input data are saved in the file COOLSIM.TRD. It is done in the *File / Save* menu of the TRNSED programme. A simulation is started in the menu *TRNSYS / Calculate*. A series of simulations can also be defined and then simulated. The user is advised to read the help provided with the TRNSED programme. It is found in the menu *Help / TRNSED Help*, and then look for the topic *Parametrics Menu*.

When a series of simulations is performed, a *New Table* is created in the menu *Parametrics*. An existing table can be opened in the menu *Windows* and selection *Table*. All the parameters that can be varied are listed. The user selects the desired parameter to be varied and defines the ranges of variations. The units of the parameters must correspond to the primary units. In table A3.1 are listed all the parameters that can be varied, together with their primary units and the conversion factor from secondary units.

Parameter	Short description	Primary unit	= sec. unit x factor
ACRCELLAR	Air change rate in cellar or garage	h^{-1}	$= \text{h}^{-1}$
ACRMECHANIC	Nominal air change rate of mechanical system ventilation	h^{-1}	$= \text{h}^{-1}$
ACRNIGHT	Air change rate for night cooling	h^{-1}	$= \text{h}^{-1}$
AIRHXEFFICIENCY	Efficiency of the mechanical system heat recovery units	- =	-
AZIMSUDWEST	Azimuth of south-west façade	°	$= ^\circ$
BPILE	Average spacing between the piles or boreholes	m =	m
CG1	Volumetric heat capacity of ground layer 1	$\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K}) =$	$\text{MJ}/(\text{m}^3\text{K}) \times 1000$
CG2	Volumetric heat capacity of ground layer 2	$\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K}) =$	$\text{MJ}/(\text{m}^3\text{K}) \times 1000$
CG3	Volumetric heat capacity of ground layer 3	$\text{kJ}/(\text{m}^3\text{K}) =$	$\text{MJ}/(\text{m}^3\text{K}) \times 1000$
COPo	Design performance coefficient	-	$= -$

Table A3.1 List of the parameters that can be varied in a multiple simulation

Parameter Short	description	Primary unit	= sec. unit x factor
DA1	Darcy velocity of ground water in layer 1	m/s	= m/day x (1/86'400)
DA2	Darcy velocity of ground water in layer 2	m/s	= m/day x (1/86'400)
DA3	Darcy velocity of ground water in layer 3	m/s	= m/day x (1/86'400)
DP1	Diameter of pile or borehole type 1	m	= m
DTGRND	Mean temperature gradient in the undisturbed ground	K/m	= K/km x (1/1'000)
FLWSPECTABS	Fluid flow rate per square meter of heated or cooled concrete plate (TABS)	(kg/h)/m ²	= (kg/h)/m ²
H1	Average active length of pile or borehole type 1	m =	m
HFLOOR	Height of garage or cellar between rooms and ground	m =	m
HG11	Thickness of ground layer 1	m	= m
HG2	Thickness of ground layer 2	m	= m
HG3	Thickness of ground layer 3	m	= m
HINSUL	Insulation thickness between ground and cellar	m =	m
HMAGCO	Concrete thickness between ground and cellar or garage	m =	m
HXUAGEO	Design heat transfer coefficient of geocooling counterflow heat exchanger	kJ/(hK)	= kW/K x 3'600
LCOEPF	Length of the horizontal pipes on top of energy piles or borehole heat exchangers	m	= m
LG1	Thermal conductivity of ground layer 1	kJ/(h m K)	= W/(mK) x 3.6
LG2	Thermal conductivity of ground layer 2	kJ/(h m K)	= W/(mK) x 3.6
LG3	Thermal conductivity of ground layer 3	kJ/(h m K)	= W/(mK) x 3.6
N1	Number of piles or boreholes for type 1	- =	-
NSERIE	Number of piles or boreholes coupled in series	- =	-
PHEATDESIGN	Design thermal power of the heat pump	kJ/h	= kW x 3'600

Table A3.1 List of the parameters that can be varied in a multiple simulation (continued)

Parameter	Short description	Primary unit	= sec. unit x factor
RA1	Internal thermal resistance Ra of pile or borehole type 1	K/(kJ/hm)	= K/(W/m) x (1/3.6)
RB1	Thermal resistance Rb of pile or borehole type 1	K/(kJ/hm)	= K/(W/m) x (1/3.6)
RTABS	Thermal resistance fluid-concrete in activated concrete plates (TABS)	K/(W/m ²) =	K/(W/m ²)
SCALEGAININT	Scaling factor for internal heat gains	- =	-
TAIRCELLAR	Air temperature in building cellar	°C	= °C
TCONSTGARAGE	Constant air temperature component of garage	°C =	°C
TCOOLDESIGN	Design forward fluid temperature for cooling	°C =	°C
TFMIN	Minimum allowed fluid temperature in the pile or borehole flow circuit	°C =	°C
TGRDIN	Mean undisturbed ground temperature at the surface	°C =	°C
TLIMITSOMMER	Daily temperature limit for Sommer	°C =	°C
TLIMITWINTER	Daily temperature limit for Winter	°C	= °C
TSETCOOLINGHIGH	Set point temperature to switch on cooling	°C =	°C
TSETCOOLINGLOW	Set point temperature to switch off cooling	°C =	°C
TSETHEATINGHIGH	Set point temperature to switch off heating	°C =	°C
TSETHEATINGLOW	Set point temperature to switch on heating	°C =	°C
UCELBU	Heat transfer coefficient with constant air temperature component	kJ/(h m ² K)	= W/(m ² K) x 3.6

Table A3.1 List of the parameters that can be varied in a multiple simulation (continued)

If a parametric study is performed with the borehole parameters (RB1, RA1, N1, H1), it is best to define only one type of BHE.

A multiple simulation is started once a parameter table has been created, using the command *Run Table* in the *TRNSYS* menu.

A3.1.7. Output Data from COOLSIM

The output data from COOLSIM are written in 15 different files. Three files contain the input information given to COOLSIM and possible error messages, and 12 files contain the calculated quantities by COOLSIM. Assuming that the file containing the input data is called COOLSIM.TRD, the following files are written:

- COOLSIM.LST (listing file)
- DST.DAT (input data related to TRNVDSTP)
- COOLSIM.PAR (calculated parameters)
- COOLSIM.EXT (output data, maximum and minimum thermal powers and temperatures)
- COOLSIM.OU1 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU2 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU3 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU4 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU5 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU6 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU7 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU8 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.OU9 (output data, mean temperatures, integrated quantities)
- COOLSIM.PL1 (output data, evolution of selected variables)
- COOLSIM.PL2 (output data, evolution of selected variables)

When a simulation is completed, the file COOLSIM.LST can be viewed in the *Windows* menu of the TRNSED programme, and the files COOLSIM.OUi in the *Windows / Other files* menu. A plot can be made with the file COOLSIM.PLi and viewed in the *Plot* menu.

The Listing File COOLSIM.LST

This is the listing file written by TRNSYS. All the information contained in COOLSIM.TRD is written in the listing file, together with some information related to the simulation itself (simulation duration, total number of call for each component, warning message if any, etc.). It should be noted that if an error makes a simulation to abort, the corresponding error message is written at the end of the listing file. It is recommended to read this file every time a simulation is terminated with an error.

The File DST.DAT

This file is written by the TRNVDSTP component which simulates the borehole heat exchanger field. It contains all the parameters used by this component, together with information on the fields used for the simulation of the heat transport in the ground.

The Output File COOLSIM.PAR

This file contains some of the mean parameter values which are calculated and used for the simulation. They are:

PileNumber	[-] : total number of energy piles/boreholes (cf. equation A3.15).
AvePLength	[m] : average active pile length of the energy piles/boreholes (cf. equation A3.16).
GrndVolume	[m ³] : ground volume ascribed to the energy piles/boreholes (cf. equation A3.18).
AvePiLDiam	[m] : average pile/borehole diameter (cf. equation A3.14).
EffPiLDiam	[m] : effective pile/borehole diameter for heat capacitive effects (cf. equation A3.20).
AveRbPile	[K/(W/m)]: average pile/borehole thermal resistance (cf. equation A3.17).
EffRbPile	[K/(W/m)]: effective pile/borehole thermal resistance for heat capacitive effects (cf. equation A3.21).
FlowRate	[kg/h]: total flow rate through the pile/bore circuit when heating (i.e. when the heat pump is on. See the description of parameter "design inlet-outlet temperature difference in evaporator (PAC)", in section A3.5.3).
AveEfGrndL	[W/mK]: effective mean thermal conductivity in the ground volume GrndVolume (the effective value includes the effect of forced convection on the local problem, see comment for λ_{avegr} in equation A3.17).
AveGrndCap	[kJ/m ³ K]: mean volumetric heat capacity in the ground volume GrndVolume (see comment for equation A3.20).

The Output File COOLSIM.EXT

Maximum or minimum values of some selected quantities are calculated on a regular time interval (month or year).

MaxHeatDem	[kW]: maximum hourly heat demand of the system during the month or the year.
MaxExtPile	[kW]: maximum hourly heat power extracted from the piles/bores during the month or the year.
MaxColdDem	[kW]: maximum hourly cold demand of the system during the month or the year.
MaxInjPile	[kW]: maximum hourly heat power injected through the piles/bores during the month or the year.
TinPileMin	[degree C]: minimum inlet fluid temperature in the piles/bores during the month or the year.
TinPileMax	[degree C]: maximum inlet fluid temperature in the piles/bores during the month or the year.

The Output File COOLSIM.OU1

Integrated or average quantities of various quantities are calculated on a regular time interval (month or year). They are produced with the help of 6 simulation summary type components and written in 6 different files. The results of the first simulation summary are written in the file COOLSIM.OU1. The labels of each calculated quantity are for the first the simulation summary:

TairExt [°C]: mean outdoor air temperature.

Tsky [°C]: mean sky temperature.

HHor [kWh/m²]: mean global solar radiation on horizontal plane.

HSEast [kWh/m²]: mean global solar radiation in south-east vertical façade.

HNWest [kWh/m²]: mean global solar radiation in north-west vertical façade.

HSWest [kWh/m²]: mean global solar radiation in south-west vertical façade.

HNEast [kWh/m²]: mean global solar radiation in north-east vertical façade.

The Output File COOLSIM.OU2

SQheat [MJ/m²]: sum of sensible heating demand for heated zones (zone 1 and 2).

SQcool [MJ/m²]: sum of sensible cooling demand for cooled zones (zone 1 and 2).

SQUA [MJ/m²]: sum of static transmission losses (UA*dT) of heated/cooled zones (zone 1 and 2).

SQVENT [MJ/m²]: sum of sensible ventilation gains of heated/cooled zones (zone 1 and 2).

SQINF [MJ/m²]: sum of sensible infiltration gains of heated/cooled zones (zone 1 and 2).

SQGCONV [MJ/m²]: sum of internal convective gains of heated/cooled zones (zone 1 and 2).

SQGRAD [MJ/m²]: sum of internal radiative gains of heated/cooled zones (zone 1 and 2).

SQSOLT [MJ/m²]: sum of shortwave solar radiation transmitted through windows of heated/cooled zones (zone 1 and 2).

SQSEC [MJ/m²]: sum of secondary heat flux of all windows of heated/cooled zones (zone 1 and 2).

The Output File COOLSIM.OU3

uso_AULA_INV [h]: cumulated occupation time of the building during the winter period, defined when cooling is not allowed (see parameter TlimitSommer in section A3.5.2).

ore_meno_20_AULA [h]: cumulated time when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is below 20°C during the building occupation time and winter period.

rat_ore_meno_20_AULA [-]: ratio of time when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is below 20°C during winter period and building occupation time. It is the ratio ore_meno_20_AULA/uso_AULA_INV.

gr_ore_meno_20_AULA [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is below 20°C during winter period and building occupation time.

uso_AULA_EST [h]: cumulated occupation time of the building during the summer period, defined when cooling is allowed (see parameter TlimitSommer in section A3.5.2).

ore_piu_26_AULA [h]: cumulated time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over 26°C during the building occupation time and winter period.

rat_ore_piu_26_AULA [-]: ratio of time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over 26°C during summer period and building occupation time. It is the ratio ore_piu_26_AULA/uso_AULA_EST.

gr_ore_piu_26_AULA [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over 26°C during summer period and building occupation time.

OpTempAULA [°C]: mean operative indoor air temperature of the “aula” zone.

The Output File COOLSIM.OU4

uso_AULA_EST [h]: cumulated occupation time of the building during the summer period, defined when cooling is allowed (see parameter TlimitSommer in section A3.5.2).

ore_piu_cat1 [h]: cumulated time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over the top limit value for category 1 (according to standard DIN EN 15251) during summer period and building occupation time.

ore_piu_cat2 [h]: cumulated time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over the top limit value for category 2 (according to standard DIN EN 15251) during summer period and building occupation time.

ore_piu_cat3 [h]: cumulated time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over the top limit value for category 3 (according to standard DIN EN 15251) during summer period and building occupation time.

rat_ore_meno_cat1 [-]: ratio of time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is below the top limit value for category 1 (according to standard DIN EN 15251) during summer period and building occupation time.

rat_ore_piu_cat1 [-]: ratio of time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over the top limit value for category 1 (according to standard DIN EN 15251) during summer period and building occupation time.

rat_ore_piu_cat2 [-]: ratio of time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over the top limit value for category 2 (according to standard DIN EN 15251) during summer period and building occupation time.

rat_ore_piu_cat3 [-]: ratio of time when the operative indoor air temperature of the “aula” zone is over the top limit value for category 3 (according to standard DIN EN 15251) during summer period and building occupation time.

HoursHeat [h]: duration in hours of heating operation. It is calculated as the time integration of the heating control signal.

HoursCool [h]: duration in hours of cooling operation. It is calculated as the time integration of the cooling control signal. If no geocooling energy can be delivered due to too warm ground temperatures, the cooling requirement of

the building can not be satisfied and the cooling control signal will stay on, thus leading to a longer cooling operation duration.

The Output File COOLSIM.OU5

gr_ore_piu_cat1 [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is over the top limit value for category 1 (according to standard DIN EN 1525 1) during summer period and building occupation time.

gr_ore_piu_cat2 [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is over the top limit value for category 2 (according to standard DIN EN 1525 1) during summer period and building occupation time.

gr_ore_piu_cat3 [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is over the top limit value for category 3 (according to standard DIN EN 1525 1) during summer period and building occupation time.

gr_ore_meno_cat1 [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is below the low limit value for category 1 (according to standard DIN EN 1525 1) during summer period and building occupation time.

gr_ore_meno_cat2 [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is below the low limit value for category 2 (according to standard DIN EN 1525 1) during summer period and building occupation time.

gr_ore_meno_cat3 [Kh]: cumulated degree-hours when the operative indoor air temperature of the "aula" zone is below the low limit value for category 3 (according to standard DIN EN 1525 1) during summer period and building occupation time.

The Output File COOLSIM.OU6

This output file is the same as the one produced with PILESIM and not all the output variables are relevant and used.

QHeat [kWh]: total energy demand for heating.

QHeatCov [kWh]: heating energy covered by the heat pump.

Auxiliary heating energy:

$$\mathbf{QHeatAux = QHeat - QHeatCov}$$

QCold [kWh]: total energy demand for cooling.

QColdCov [kWh]: cooling energy covered by the pile/boiler system (geocooling and cooling machine).

Auxiliary cooling energy:

$$\mathbf{QColdAux = QCold - QColdCov}$$

QElecTot	[kWh]: total electric energy used by the pile/bore system; (heat pump, cooling machine but without circulation pumps). Electric energy used by the heat pump: $Q_{elPAC} = Q_{HeatCov}/COP$ Electric energy used by the cooling machine: $Q_{elCoolIM} = QElecTot - Q_{elPAC}$
QHeatPil	[kWh]: heating energy covered by the heat pump coupled to the piles/boreholes. The rest, $Q_{HeatCov} - Q_{HeatPil}$, is covered by the heat pump coupled to the cold energy demand.
QFreeCool	[kWh]: cooling energy that is provided by geocooling with the piles/boreholes. The rest, $Q_{ColdCov} - Q_{FreeCool}$, is provided by the heat pump (extracted energy at the evaporator when there is a simultaneous demand for heating and cooling, i.e. see below $Q_{HextCold}$), and the cooling machine (if any). The energy extracted from the cold demand by the cooling machine is: $Q_{CoolMach} = Q_{ColdCov} - Q_{FreeCool} - Q_{HextCold}$
COP	[-]: average performance coefficient of the heat pump. It is defined as the ratio of the delivered heating energy by the electric energy used by the heat pump: $COP = Q_{HeatCov}/Q_{elPAC}$
COPglobal	[-]: mean performance coefficient including the cooling machine: $COP_{global} = (Q_{HeatCov} + Q_{HCoolMach})/QElecTot$ Where $Q_{HCoolMach}$ is the waste heat energy dissipated in the ground by the cooling machine: $Q_{HCoolMach} = Q_{HinjGrnd} - Q_{FreeCool}$
EffCoolIM	[-]: average efficiency of the cooling machine: $EffCoolIM = Q_{CoolMach}/Q_{elCoolIM}$ $Q_{CoolMach} = Q_{ColdCov} - Q_{FreeCool} - Q_{HextCold}$ $Q_{elCoolIM} = QElecTot - Q_{HeatCov}/COP$

The Output File COOLSIM.OU7

This output file is the same as the one produced with PILESIM and not all the output variables are relevant and used.

QHextCold	[kWh]: energy extracted from the cold demand by the heat pump for heating purposes.
QHextGrnd	[kWh]: energy extracted from the ground by the heat pump.
QHinjGrnd	[kWh]: energy injected into the ground (geocooling and cooling machine). The energy injected into the ground by the cooling machine is: $Q_{HCoolMach} = Q_{HinjGrnd} - Q_{FreeCool}$
GrndRatio	[-]: ratio energy injected in the ground over energy extracted from the ground:

$$\text{GrndRation} = \text{QHinjGrnd}/\text{QHextGrnd}$$

FracHeat [-]: fraction of the total heat demand covered by the heat pump:

$$\text{FracHeat} = \text{QHeatCov}/\text{QHeat}$$

Qext/mPil [kWh/m]: energy extracted from the ground per energy pile/bore meter.

FracCold [-]: fraction of the total cold demand covered by the pile/bores system (pile/bores and cooling machine):

$$\text{FracCold} = \text{QColdCov}/\text{QCold}$$

Qinj/mPil [kWh/m]: energy injected into the ground per energy pile/bore meter.

The Output File COOLSIM.OU8

This output file is the same as the one produced with PILESIM and not all the output variables are relevant and used.

TmInbuild [degree C]: air temperature in the heated (or cooled) rooms.

TmCellar [degree C]: air temperature in the cellar.

TmSurfFlo [degree C]: surface temperature of the cellar floor.

TmGrndTop [degree C]: mean temperature of the 30 cm thick ground layer that contains the horizontal connection pipes.

TmGround [degree C]: mean temperature of the ground volume that is ascribed to the energy piles/bores.

QBuiToCel [kWh]: thermal energy transferred from the heated (or cooled) rooms to the cellar. A negative value means thermal energy transferred from the cellar to the ground.

QCelToOut [kWh]: thermal energy transferred from the cellar to outside. A negative value means thermal energy transferred from outside to the cellar.

QCelToGrd [kWh]: thermal energy transferred from the cellar to the ground. A negative value means thermal energy transferred from the ground to the cellar.

QTotExtGd [kWh]: total energy extracted from the ground by the pile/bore system. Only the hourly values of the extracted energy from the piles/bores are summed.

QHoPipExt [kWh]: energy extracted from the ground by the horizontal connection pipes. The hourly heat transfer values are summed only when heat is extracted from these pipes.

The Output File COOLSIM.OU9

This output file is the same as the one produced with PILESIM and not all the output variables are relevant and used.

QDSTtoGrd [kWh]: thermal energy injected in the ground through the piles/bores alone (without the horizontal connection pipes). A negative value means extracted energy.

QPIPtoGrd [kWh]: thermal energy injected in the ground through the horizontal connection pipes. A negative value means extracted energy.

QlossOut	[kWh]: total heat losses from the ground volume ascribed to the energy piles/bores. A negative value is a heat gain.
QEDSTin	[kWh]: variation of the internal energy of the ground in the volume ascribed to the piles/bores. A positive value means stored energy, i. e., a global increase of the ground temperatures. A negative value means a cooling of the ground temperatures.
ERRDS%	[%]: error on the heat balance performed on the ground volume ascribed to the piles/bores (for calculation control).
ErrorExt%	[%]: error on the energy extracted from the ground (for calculation control).
ErrorInj%	[%]: error on the energy injected into the ground (for calculation control).
QlossTout	[kWh]: heat losses through the top side of the ground volume ascribed to the energy piles/bores. A negative value is a heat gain.
QlossSout	[kWh]: heat losses through the vertical sides of the ground volume ascribed to the energy piles/bores. A negative value is a heat gain.
QlossBout	[kWh]: heat losses through the bottom side of the ground volume ascribed to the energy piles/bores. A negative value is a heat gain.

The Plot File BRIDGESIM.PL1

This file contains the time evolution of some temperatures and heat rates for the last year of the simulation period. Hourly values of these quantities are written in this file only if the input parameter "*Print hourly values for last year*" is set to "Yes". Their labels are explained below. The 11 columns of the file are:

Time	[hour]: time in hours from the first hour of the year of the simulation start.
T_AIR_EST	[°C] : outdoor air temperature.
T_RUGIADA	[°C]: dew temperature of the outdoor air temperature.
T_AIR_UFFICI	[°C]: indoor bulk air temperature of the "uffici" zone.
T_AIR_AULA	[°C]: indoor bulk air temperature of the "aula" zone.
T_OP_AULA	[°C]: operative indoor air temperature of the "aula" zone.
T_CEIL_AULA	[°C]: surface temperature of the active concrete plate in the "aula" zone (ceiling).
Uso_Edificio	[-]: occupation status of the building (1 occupied; 0 non occupied).
T_rm	[°C]: daily running mean outdoor air temperature according to DIN EN 15251.
Ttab_for	[°C]: forward fluid temperature in the heating/cooling distribution (TABS).
Ttab_ret	[°C]: return fluid temperature in the heating/cooling distribution (TABS).

The Plot File BRIDGESIM.PL2

This file contains the time evolution of some temperatures and heat rates for the last year of the simulation period. Hourly values of these quantities are written in this file only if the input parameter "*Print hourly values for last year*" is set to "Yes". Their labels are explained below. The 7 columns of the file are:

Time	[hour]: time in hours from the first hour of the year of the simulation start.
TempInPile	[degree C]: inlet fluid temperature in the pile/bore flow circuit.
TempOutPil	[degree C]: outlet fluid temperature from the pile/bore flow circuit.
HeatDemand	[kW]: heat demand of the building.
HeatSatisf	[kW]: heat demand covered by the heat pump.
ColdDemand	[kW]: cold demand of the building.
ColdSatisf	[kW]: cold demand covered by the pile/bore system (geocooling or cooling machine).

Heat Balance of the System

The quantities contained in the file COOLSIM.OUi (i=1 a 9) allow the user to establish an overall heat balance of the system. A diagram of the energy fluxes is shown in Fig. A3.3.

System heat balance

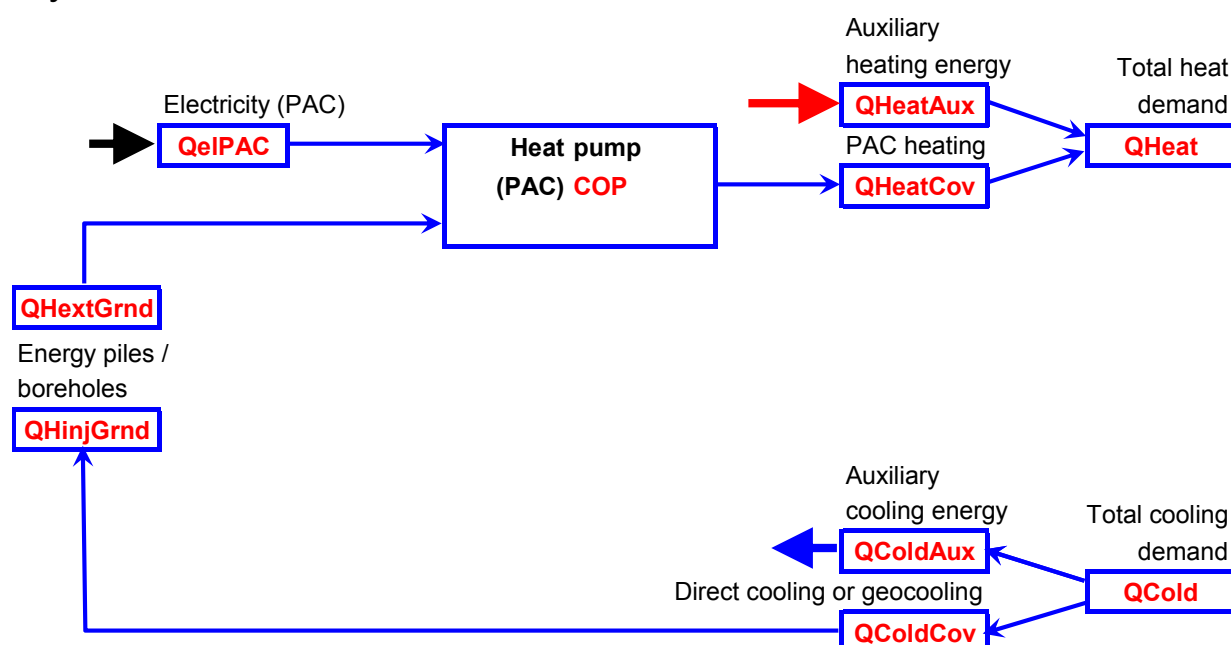


Figure A3.3 System heat balance of the system

The heat quantities are calculated by the first simulation summary:

QHeat	[kWh]: total energy demand for heating (in COOLSIM.OU6).
QHeatAux	[kWh]: heating energy covered by auxiliary energy. QHeatAux = QHeat – QHeatCov
QHeatCov	[kWh]: heating energy covered by the heat pump (in COOLSIM.OU6).
COP	[-]: average performance coefficient of the heat pump (in COOLSIM.OU6).
QeIPAC	[kWh]: electric energy used by the heat pump. QeIPAC = QHeatCov/COP

QHextGrnd	[kWh]: energy extracted from the ground by the heat pump (in COOLSIM.OU7).
QHinjGrnd	[kWh]: energy injected into the ground by geocooling and the cooling machine (in COOLSIM.OU7).
QColdAux	[kWh]: cooling energy covered by auxiliary energy. QColdAux = QCold – QColdCov
QColdCov	[kWh]: cooling energy covered by the pile/boiler system (geocooling and cooling machine); (in COOLSIM.OU6).
QCold	[kWh]: total energy demand for cooling (in COOLSIM.OU6).

A3.1.8. Output Results with COOLSIM

An excel file has been created with the name COOLSIM.XLS in order to produce graphical output results from the output files created by COOLSIM. It contains macros that automatically open the output files, copy the content into the COOLSIM.XLS file and close them. The global system heat balance is produced together with various design quantities and files for both the building and the geothermal system. The various output results that are produced are shown in figure A3.4 to A3.11.

Building energy indexes

mean operation year

Heating

Building annual heating demand

129 MJ/(m²y)

Energy reference area

2'360 m²

84'400 kWh/y

Heat pump operation time

1'440 h/y

Maximum heat pump thermal power

72 kW

30 W/m²

Mean heat pump thermal power

59 kW

25 W/m²

Cooling

Building annual cooling demand

59 MJ/(m²y)

38'500 kWh/y

Geocooling operation time

1'110 h/y

Maximum geocooling thermal power

49 kW

21 W/m²

Mean geocooling thermal power

35 kW

15 W/m²

Building air temperature

Operative indoor air temperature **below 20°C** during building occupation

hours per year **0** h/y

degree-hours per year **0** Kh/y

heating period fraction **0** %

Operative indoor air temperature **over 26°C** during building occupation

hours per year **63** h/y

degree-hours per year **15** Kh/y

cooling period fraction **5** %

Indoor air temperature **over 26.5°C** during building occupation for the last simulated year

hours per year **31** h/y (max. 100 h/y according to SIA 382/1)

Figure A3.4 Energy indexes produced with COOLSIM.XLS for the building

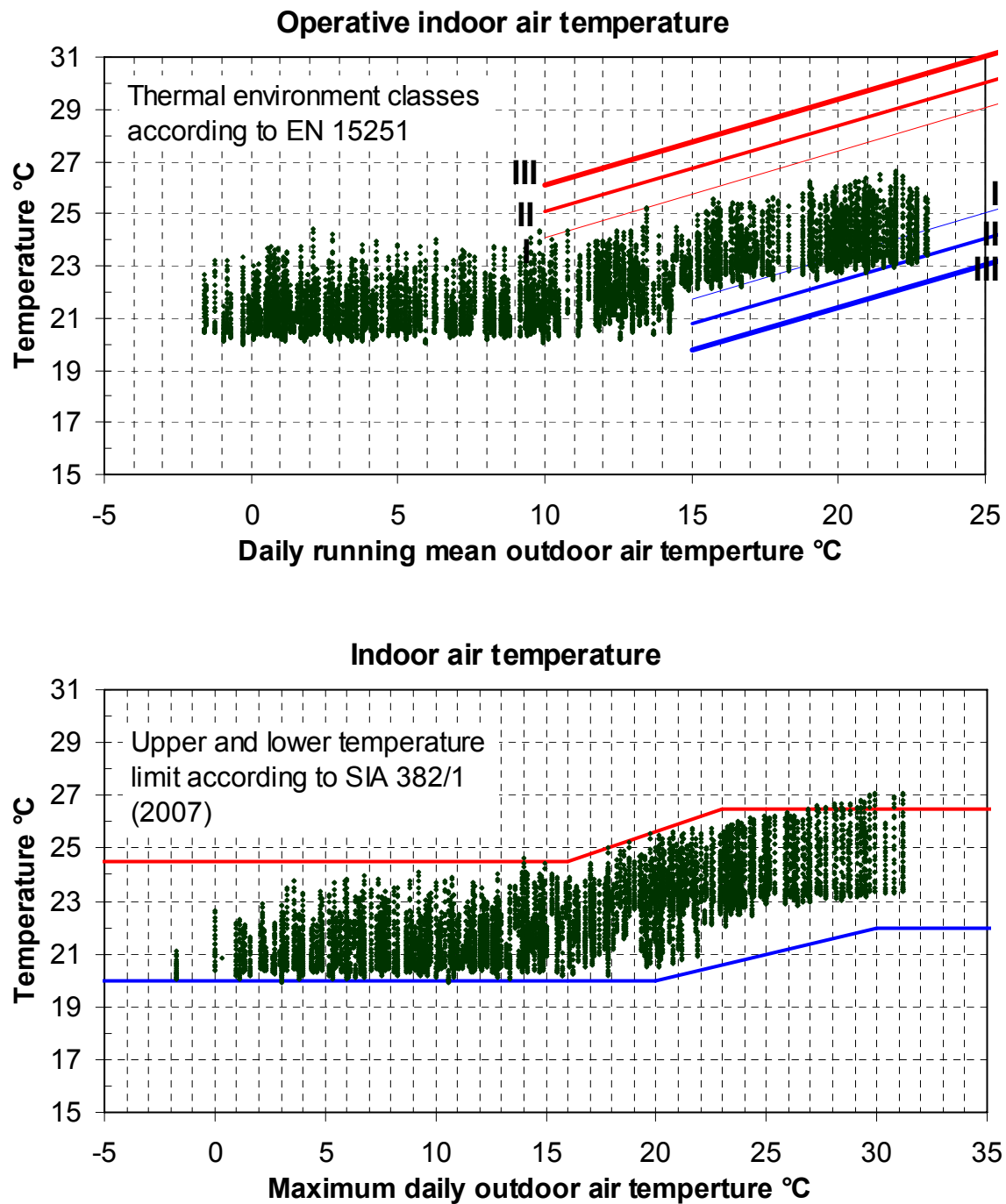


Figure A3.5 Thermal comfort evaluation produced with COOLSIM.XLS for the building

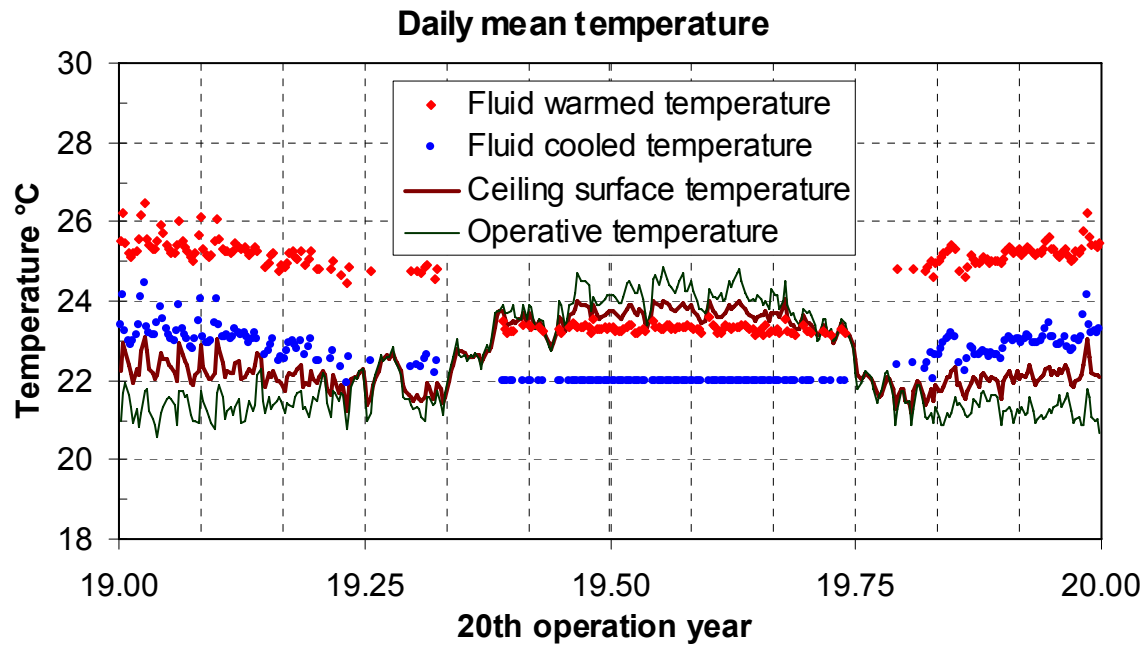


Figure A3.6 Various temperatures evolution produced with COOLSIM.XLS for the building

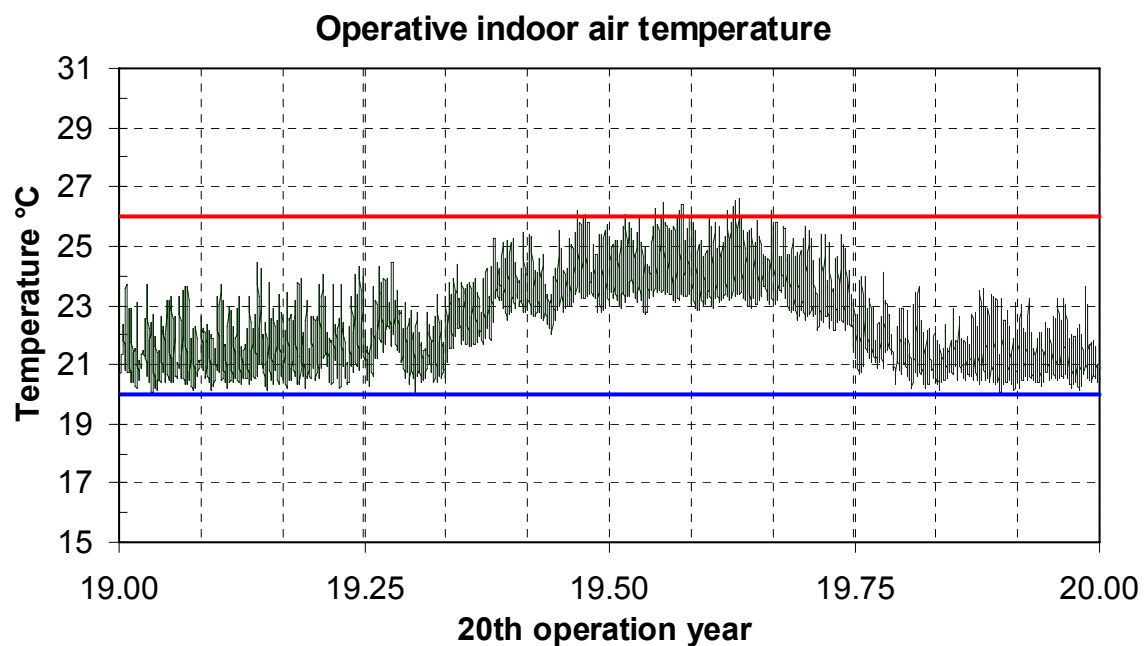
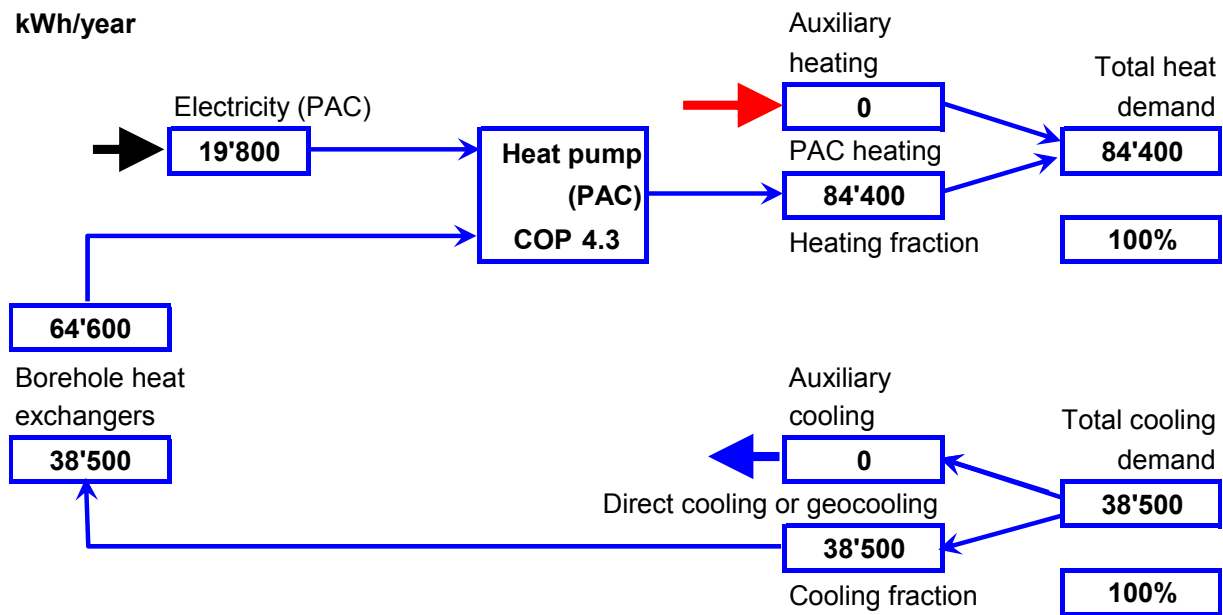


Figure A3.7 Operative temperature evolution produced with COOLSIM.XLS for the building

System heat balance

kWh/year



Heating

Building annual heating demand

129	MJ/(m ² y)	Energy reference area	2'360	m ²
36	W/m	Extraction duration	1'440	h/y
28	W/m			
40	kWh/m/year			

Maximum heat extraction rate per meter borehole

Mean heat extraction rate per meter borehole

Annual extracted energy per meter borehole

Cooling

Building annual cooling demand

Maximum heat injection rate per meter borehole

Mean heat injection rate per meter borehole

Annual injected energy per meter borehole

59	MJ/(m ² y)	Injection duration	1'110	h/y
31	W/m			
22	W/m			
24	kWh/m/year			

Ground heat balance

Ratio injected over extracted energy

60%

Figure A3.8 Heat balance of the geothermal system produced with COOLSIM.XLS

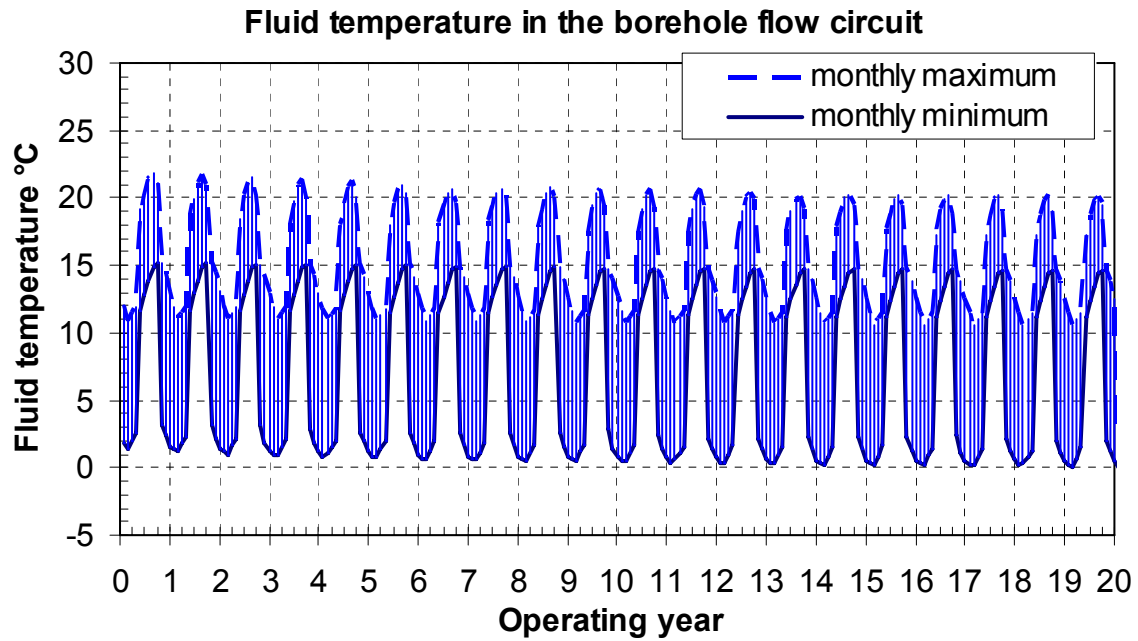


Figure A3.9 Monthly minimum and maximum fluid temperature in the ground flow circuit produced with COOLSIM.XLS

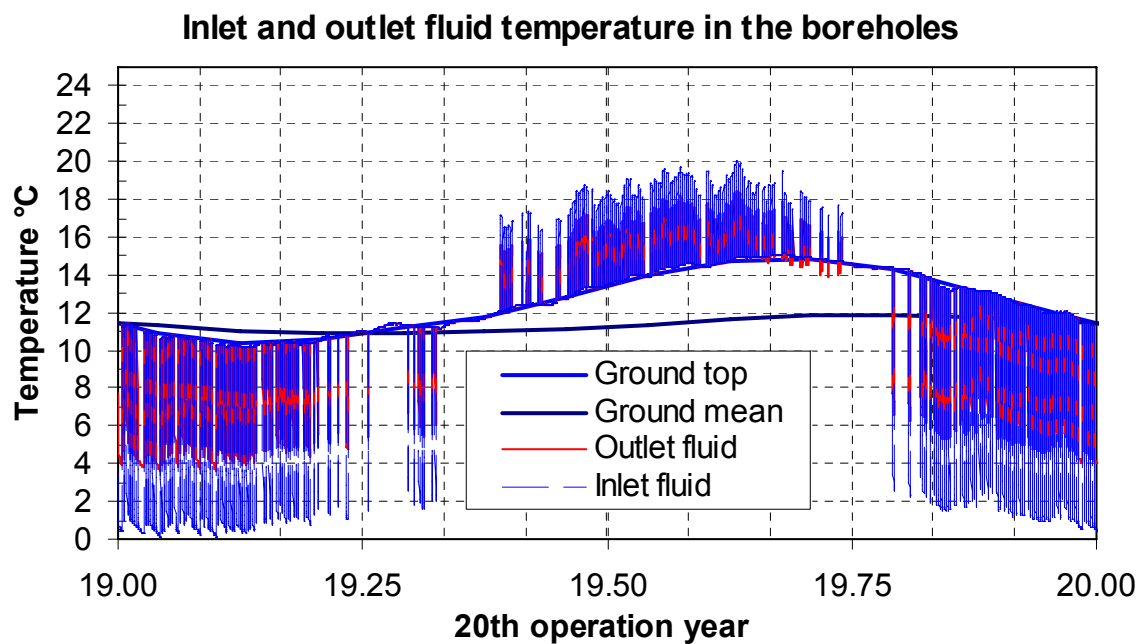


Figure A3.10 Evolution of the inlet, outlet fluid temperatures in the ground flow circuit and ground temperatures produced with COOLSIM.XLS

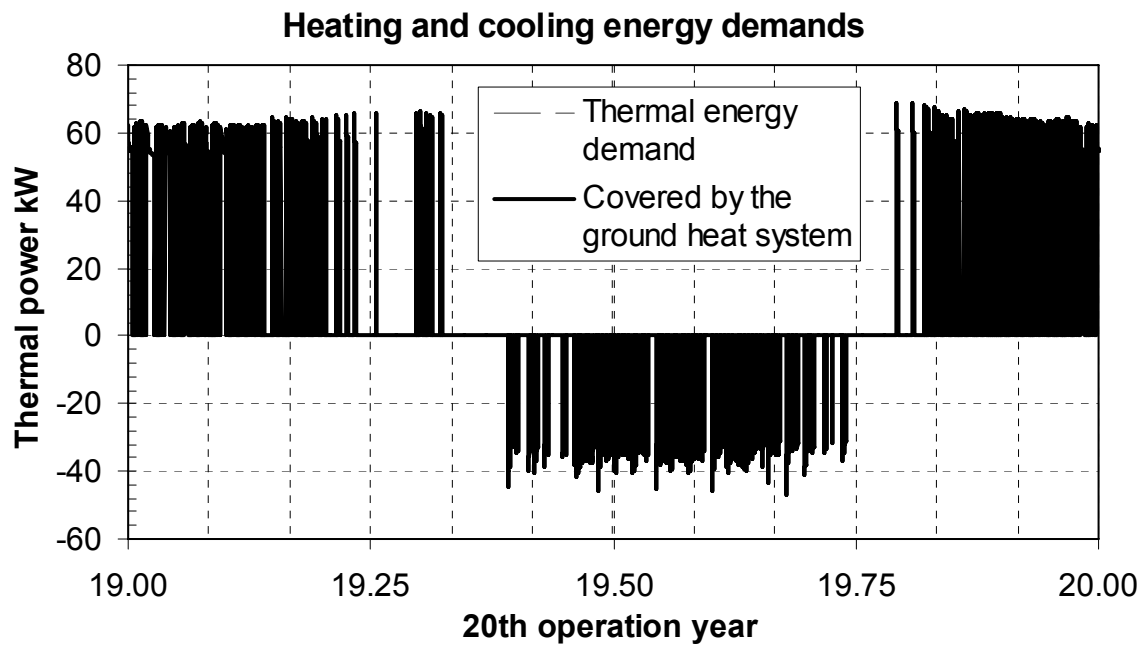


Figure A3.11 Evolution of heating and cooling powers produced with COOLSIM.XLS

Other macros in COOL SIM.XLS allow the user to visualise results of multiple simulations produced with the TRNSED application COOLSIM.

A3.2. Input parameters for the building

A3.2.1. Introduction

The input parameters for the building are generated with the TRNBuild programme of the TRNSYS 16.1 package. The TRNBuild programme generates text files that are then read as input data by COOL SIM. The building must be composed of 6 thermal zones. Two for the building spaces and 4 for the energy distribution system (active concrete plates or floor heating).

A3.2.2. Input variables

The required input variables are 31. They are listed in the required following order:

1. **Tambient** - outdoor air temperature
2. **Relative humidity ambiente** - outdoor air relative humidity
3. **Tsky** - fictive sky temperature
4. **IT-Horizontal** - total incident radiation on horizontal plane
5. **IT-NorthEast** - total incident radiation on north east façade
6. **IT-NorthWest** - total incident radiation on north west façade
7. **IT-SouthEast** - total incident radiation on south east façade
8. **IT-SouthWest** - total incident radiation on south west façade
9. **IB-Horizontal** - incident beam radiation on horizontal plane
10. **IB-NorthEast** - incident beam radiation on north east façade
11. **IB-NorthWest** - incident beam radiation on north west façade
12. **IB-SouthEast** - incident beam radiation on south east façade
13. **IB-SouthWest** - incident beam radiation on south west façade
14. **AI-Horizontal** - incident angle of beam radiation for horizontal plane
15. **AI-NorthEast** - incident angle of beam radiation for north east façade
16. **AI-NorthWest** - incident angle of beam radiation for north west façade
17. **AI-SouthEast** - incident angle of beam radiation for south east façade
18. **AI-SouthWest** - incident angle of beam radiation for south west façade
19. **QTabs3** - heat rate transferred by TABS3 (calculated in fictive zone 3)
20. **QTabs4** - heat rate transferred by TABS4 (calculated in fictive zone 4)
21. **QTabs5** - heat rate transferred by TABS5 (calculated in fictive zone 5)
22. **QTabs6** - heat rate transferred by TABS6 (calculated in fictive zone 6)
23. **TVent-Aula** - inlet air temperature of ventilation air flow for "aula" zone
24. **TVent-Uff** - inlet air temperature of ventilation air flow for "ufficio" zone
25. **Vent-Nott** - night cooling ventilation air change rate (decreased value by 0.1h^{-1} , because it is the permanent and constant defined infiltration air change rate in building file)
26. **Vent-Mec-Aula** - air change rate of mechanical ventilation system for "aula" zone
27. **Vent-Mec-Uffici** - air change rate of mechanical ventilation system for "uffici" zone
28. **ScaleGainsAula** - scaling factor for "aula" zone internal gains (1 is for SIA 380)
29. **ScaleGainsUffici** - scaling factor for "uffici" zone internal gains (1 is for SIA 380)
30. **TCave15** - air temperature of boundary seller (fixed at 15°C)
31. **TCave18** - air temperature of boundary seller (fixed at 18°C)

A3.2.3. Output variables

The required output variables are 27. They are listed in the required following order:

1. **Tair-aula** - air temperature of zone "aula"
2. **Tair-uffici** - air temperature of zone "uffici"
3. **Tsi1-tabs3** - inside surface temperature of top element TABS3
4. **Tsi2-tabs3** - inside surface temperature of bottom element TABS3
5. **Tsi1-tabs4** - inside surface temperature of top element TABS4
6. **Tsi2-tabs4** - inside surface temperature of bottom element TABS4
7. **Tsi1-tabs5** - inside surface temperature of top element TABS5
8. **Tsi2-tabs5** - inside surface temperature of bottom element TABS5
9. **Tsi1-tabs6** - inside surface temperature of top element TABS6
10. **Tsi2-tabs6** - inside surface temperature of bottom element TABS6
11. **SQHeat** - sum of heating demand for zone "aula" and "uffici"
12. **SQCool** - sum of cooling demand of zone "aula" and "uffici"
13. **SQUA** - sum of transmission losses of zone "aula" and "uffici"
14. **SQVENT** - sum of ventilation gains of zone "aula" and "uffici"
15. **SQINF** - sum of infiltration gains of zone "aula" and "uffici"
16. **SQGCONV** - sum of internal convective gains of zone "aula" and "uffici"
17. **SGQRAD** - sum of internal radiative gains of zone "aula" and "uffici"
18. **SQSOLT** - sum of entering solar energy of zone "aula" and "uffici"
19. **QSEC-AULA** - secondary heat flux of all windows in zone "aula"
20. **QSEC-UFFICI** - secondary heat flux of all windows in zone "uffici"
21. **QVent-AULA** - sensible ventilation energy gain of zone "aula"
22. **QVent-UFFICI** - sensible ventilation energy gain of zone "uffici"
23. **SCHED-NOTTE** - values of schedule NOTTE for night cooling
24. **SCHED-V-05-ONOFF** - values of schedule ONOFF for mechanical ventilation
25. **SCHED-SCH6** - values of schedule SCH6 for internal heat gains
26. **TmSurf-AULA** - mean surface temperature of zone "aula"
27. **Tsi** - inside surface temperature of element TABS3 (ceiling surface temperature of zone "aula")

A3.3. References

- Klein S. A. et al. (2007) **TRNSYS. A Transient System Simulation Program**. Version 16.1. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Pahud D. (2007) **PILESIM2: Simulation Tool for Heating/ Cooling Systems with Energy Piles or multiple Borehole Heat Exchangers**. User Manual. ISAAC – DACD – SUPSI, Switzerland.
- DIN EN 15251 (2007) **Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics**. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany
- SIA 382/1 (2007) **Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen**. Zürich, Schweiz.