

Trevano, CP 105  
CH-6952 Canobbio

Telefono +41 (0)58 666 63 51  
Fax +41 (0)58 666 63 49  
E-mail leee@supsi.ch  
N. IVA 425.112

Da Daniel Pahud  
Telefono +41 (0)58 666 63 53  
E-mail daniel.pahud@supsi.ch

**DOC. A**

OGGETTO

Ecole des Métiers à Fribourg

TITOLO

**Simulation thermique du système  
géothermique de la future Ecole des Métiers  
à Fribourg  
Troisième série de simulations du système**

COMMITTENTE

CRÈGE  
Rue Emile-Argand 11  
CH - 2007 Neuchâtel

ESTENSORE RAPPORTO

Dr. Daniel Pahud, SUPSI – DACD – LEEE

DOCUMENTI

DOC. A Rapport  
DOC. B Annexes

LUOGO E DATA

Lugano/Trevano, 22 novembre 2005  
Rapport-LEEE-SUPSI-novembre-DocA.doc

**Table des matières**

<b>1. Objectif de l'étude.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Introduction .....</b>	<b>3</b>
2.1. Résultats de la première série de simulations.....	4
2.2. Résultats de la deuxième série de simulations .....	4
2.3. Résultats de la troisième série de simulations .....	5
<b>3. Paramètres pour la simulation du système .....</b>	<b>5</b>
3.1. Demande d'énergie de chauffage et de refroidissement .....	5
3.2. Champ de sondes géothermiques .....	7
3.3. Propriétés thermiques du terrain .....	8
3.4. Interface terrain - bâtiment.....	8
<b>4. Résultats des simulations.....</b>	<b>8</b>
4.1. Variante 1 : 30 sondes géothermiques espacées par 9 mètres .....	9
4.2. Variante 2 : 30 sondes géothermiques espacées par 6 mètres .....	12
<b>5. Recommandations.....</b>	<b>15</b>

## 1. Objectif de l'étude

Le nouveau bâtiment de l'Ecole des Métiers de Fribourg est conçu pour satisfaire le standard Minergie®. Dans cette optique, un champ de sondes géothermiques est projeté sous le bâtiment pour valoriser l'énergie géothermique locale à des fins de chauffage et de refroidissement. Cette solution permet une utilisation rationnelle de l'énergie avec des frais d'exploitation très bas.

Le principal objectif de cette étude est de tester le concept énergétique du système de chauffage et de refroidissement pour vérifier son fonctionnement aussi bien à court terme qu'à long terme. Les simulations thermiques du système effectuées à cet effet permettront, le cas échéant, d'établir des recommandations sur la meilleure façon d'intégrer le champ des sondes géothermiques dans le système de chauffage et de refroidissement du bâtiment. Elles permettent en outre d'établir les performances thermiques du système retenu.

Dans cette première phase de l'étude, plusieurs variantes sont simulées afin de déterminer le comportement thermique du système et de servir d'aide pour les choix qui doivent être opérés relativement à l'intégration du champ de sondes géothermiques dans le système de chauffage et de refroidissement.

Le programme de simulation PILESIM est utilisé pour la simulation du système couplé sur le champ de sondes géothermiques.

## 2. Introduction

Les résultats présentés dans ce rapport correspondent à la troisième série de simulations. Ces dernières ont été effectuées sur la base des derniers calculs pour la détermination des demandes de chauffage et de refroidissement du bâtiment. Les premiers calculs du bâtiment ont montré une demande d'énergie de refroidissement annuelle (340 MWh/an) deux fois plus élevée que celle de chauffage (150 MWh/an), ce qui s'avère problématique à long terme pour les couvrir par geocooling sur les sondes géothermiques. Une réflexion sur les charges internes à évacuer et sur la possibilité de rafraîchir le bâtiment de nuit par le système de ventilation a conduit aux deuxièmes calculs des besoins thermiques. Relativement aux premiers calculs, il en résultait une demande d'énergie annuelle de chauffage totale environ deux fois plus importante (280 MWh/an plutôt que 150 MWh/an), et une demande de refroidissement deux fois plus faible (150 MWh/an plutôt que 340 MWh/an). Les derniers calculs, sur lesquels se basent la troisième série de simulations, ont montré que l'énergie de refroidissement nécessaire au système de ventilation est, contrairement aux calculs précédents, pratiquement négligeable. Les demandes d'énergie de chauffage et de refroidissement sont calculées à respectivement 250 MWh/an et 70 MWh/an. La demande d'énergie annuelle de refroidissement du bâtiment représente maintenant environ 30% de celle de chauffage.

## 2.1. Résultats de la première série de simulations

Les résultats de la première série de simulations ont montré la nécessité de ne couvrir qu'une partie de la demande de refroidissement. En effet la demande de refroidissement annuelle (340 MWh/an) était près de deux fois plus grande que celle de chauffage (150 MWh/an), ce qui empêche de refroidir le bâtiment par geocooling (i.e. sans machine frigorifique), suite au réchauffement progressif du terrain dans la zone des sondes.

La première série de simulations a été effectuée avec 24 sondes géothermiques espacées entre-elles par 9 m.

Une solution a été cherchée en ne couplant sur le système géothermique que les dalles actives dans le mode refroidissement. En mode chauffage, la totalité de la demande de chaleur des trois systèmes de distribution (ventilation, panneaux rayonnants et dalles actives) devait être couverte par la (ou les) pompe(s) à chaleur couplée(s) sur les sondes géothermiques. Les résultats indiquaient qu'un fonctionnement continu des dalles actives en mode refroidissement permettait d'évacuer par geocooling la totalité de la demande de refroidissement de ces dernières, même si l'énergie thermique annuelle injectée dans les sondes était près de 40% plus importante que celle extraite. Cela signifie que la demande de refroidissement du système de ventilation et des panneaux rayonnants devait être évacuée par une machine frigorifique indépendante du système géothermique, dont la taille devait permettre de satisfaire la puissance maximum de 220 kW demandée par le système de ventilation et des panneaux rayonnants mis ensemble.

## 2.2. Résultats de la deuxième série de simulations

Les changements importants des deuxièmes calculs sur les demandes de chauffage et de refroidissement du bâtiment ont conduit à redimensionner complètement le système fonctionnant sur les sondes géothermiques. La grande différence avec les premières simulations du système est que le refroidissement par geocooling est maintenant potentiellement possible sur la totalité des besoins de refroidissement du bâtiment et non sur une partie seulement.

Les résultats de la première série de simulations avaient conduit à envisager la possibilité d'évacuer une partie des rejets thermiques de nuit par le toit, en profitant de l'émission radiative (infrarouge) de ce dernier vers le ciel. Toutefois le potentiel est relativement limité, dans le sens où seule la distribution des dalles actives peut être couplée au toit, puisque seulement celle-ci fonctionne de nuit pour le refroidissement. Les panneaux rayonnants sont à l'arrêt et le système de ventilation fonctionne en rafraîchissement nocturne. Une estimation de l'énergie de refroidissement annuelle évacuée de cette manière reste toutefois modeste, lorsque la simultanéité de la puissance radiative émise et de la puissance de refroidissement à évacuer est prise en compte. De cette manière, jusqu'à 20 MWh/an peuvent être évacués, sans pour autant réduire la puissance maximum de refroidissement. Compte tenu du nouveau ratio entre les demandes annuelles de chauffage (280 MWh/an) et de refroidissement (150 MWh/an) du bâtiment, cette option n'est plus nécessaire et n'a pas été évaluée.

La deuxième série de simulations a été effectuée avec 6 sondes géothermiques supplémentaires (30 sondes au lieu de 24), comme cela était déjà prévu dans l'avant-projet, mais avec un espacement réduit à 6 m. Deux variantes ont été calculées pour tenir compte du fonctionnement des dal-

les actives en mode chauffage et refroidissement : de nuit seulement, pendant 12 heures consécutives, en alternance avec le fonctionnement du système de ventilation et des panneaux rayonnants, ou en permanence 24 heures sur 24.

Les résultats de la deuxième série de simulations a montré que le fonctionnement des dalles actives 12h par jour et en alternance avec le système de ventilation et des panneaux rayonnants permet de limiter les puissances de pointe pour le chauffage et le refroidissement, et ainsi d'optimiser l'utilisation du champ de sondes géothermiques. Toutefois, les pointes de puissance, aussi bien en chauffage qu'en refroidissement, ne pouvaient pas être couvertes par le système couplé sur les sondes géothermiques. Les calculs ont montré que l'apport des puissances auxiliaires pouvait se limiter au système de ventilation seulement, aussi bien en chauffage qu'en refroidissement.

### **2.3. Résultats de la troisième série de simulations**

La troisième série de simulations a été effectuée avec 30 sondes géothermiques, mais en raison de la différence marquée entre l'énergie annuelle extraite du terrain et l'énergie annuelle injectée, l'espacement entre les sondes est augmenté à 9 m.

Les résultats sont présentés dans le chapitre 4.

## **3. Paramètres pour la simulation du système**

Les paramètres de simulation doivent permettre de caractériser du point de vue thermique le système afin de pouvoir simuler son fonctionnement et déterminer ses performances thermiques. Les principaux groupes de paramètres concernent en premier lieu les demandes d'énergie de chauffage et de refroidissement du bâtiment, les dimensions et la géométrie du champ de sondes géothermiques ainsi que les propriétés thermiques du terrain.

### **3.1. Demande d'énergie de chauffage et de refroidissement**

Les demandes d'énergie de chauffage et de refroidissement ont été calculées en valeurs horaires pour les zones Ouest, Centrale et Est du bâtiment et pour les trois modes de distribution de chaleur : ventilation, panneaux rayonnants et dalles actives. Les calculs ont été exécutés par un modèle de simulation dynamique du bâtiment (EnergieBüro Grossenbacher, Tecnoservice Engineering SA, HTA-Luzern) et les résultats sont donnés en entrée au programme PILESIM.

Le fonctionnement des dalles actives en mode chauffage et refroidissement est réalisé de nuit seulement, pendant 12 heures consécutives, en alternance avec le fonctionnement du système de ventilation et des panneaux rayonnants).

Les demandes d'énergie de refroidissement ont été calculées avec une ventilation nocturne lorsque la température extérieure le permet. Cette option permet de réduire sensiblement l'énergie de refroidissement que le système avec sondes géothermiques doit couvrir. Pour la zone centrale, différents calculs ont montré que la demande d'énergie annuelle de refroidissement serait près de 50% supérieure sans ventilation nocturne.

Les distributions horaires sont montrées sous forme graphique dans le document B. Les énergies annuelles et les puissances maximums sont énumérées dans les tables 2.1 pour le chauffage et 2.2 pour le refroidissement.

**Fonctionnement des dalles actives : 12h par jour (de nuit, en alternance avec ventilation et panneaux rayonnants)**

<b>Chauffage</b>	Ventilation	Panneaux rayonnants	Dalles actives	Total
Zone Ouest	21 MWh/an max. 52 kW	12 MWh/an max. 24 kW	10 MWh/an max. 25 kW	44 MWh/an max. 75 kW
Zone Centrale	9 MWh/an max. 41 kW	11 MWh/an max. 28 kW	28 MWh/an max. 39 kW	49 MWh/an max. 65 kW
Zone Est	25 MWh/an max. 60 kW	28 MWh/an max. 24 kW	108 MWh/an max. 84 kW	161 MWh/an max. 84 kW
<b>Total</b>	<b>56 MWh/an</b> max. 152 kW	<b>51 MWh/an</b> max. 75 kW	<b>146 MWh/an</b> max. 133 kW	<b>253 MWh/an</b> <b>max. 220 kW</b>

*Table 2.1 : Demandes d'énergie et puissances maximums de chauffage pour le nouveau bâtiment de l'École des Métiers à Fribourg (variante 12h pour les dalles actives) – résultats des troisièmes calculs des besoins thermiques du bâtiment*

**Fonctionnement des dalles actives : 12h par jour (de nuit, en alternance avec ventilation et panneaux rayonnants)**

<b>Refroidissement</b>	Ventilation	Panneaux rayonnants	Dalles actives	Total
Zone Ouest	1 MWh/an max. 28 kW	1 MWh/an max. 17 kW	21 MWh/an max. 27 kW	22 MWh/an max. 40 kW
Zone Centrale	1 MWh/an max. 27 kW	11 MWh/an max. 35 kW	19 MWh/an max. 35 kW	30 MWh/an max. 53 kW
Zone Est	1 MWh/an max. 34 kW	1 MWh/an max. 26 kW	17 MWh/an max. 44 kW	20 MWh/an max. 49 kW
<b>Total</b>	<b>3 MWh/an</b> max. 89 kW	<b>13 MWh/an</b> max. 78 kW	<b>56 MWh/an</b> max. 106 kW	<b>72 MWh/an</b> <b>max. 142 kW</b>

*Table 2.2 : Demandes d'énergie et puissances maximums de refroidissement pour le nouveau bâtiment de l'École des Métiers à Fribourg (variante 12h pour les dalles actives) – ventilation nocturne – résultats des troisièmes calculs des besoins thermiques du bâtiment*

L'ensemble du système est simulé comme s'il n'y a qu'une seule centrale thermique couplée à toutes les sondes géothermiques. Si 3 centrales devaient être réalisées, il est important que chacune d'elle soit raccordée à l'ensemble des sondes. Ceci est particulièrement important étant donné la variation très importante des ratios entre les énergies annuelles de chauffage et de refroidissement d'une centrale à l'autre.

Les niveaux de température sont fixés pour le fonctionnement de la PAC (pompe à chaleur) et pour la distribution de froid en geocooling (refroidissement direct sur les sondes géothermiques en couplant le circuit des sondes à celui de la distribution de refroidissement par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur).

**Chauffage** : courbe de chauffage définie par une température maximum de travail de la PAC (eau à la sortie du condenseur) de 40°C à la température de l'air extérieur de -9°C. La température s'abaisse linéairement avec l'augmentation de la température extérieure et vaut 20°C lorsque cette dernière atteint 20°C.

Pour le **geocooling**, la température maximum du fluide caloporteur retournant dans les sondes est fixée à 20°C. La **température minimum** du fluide dans les sondes est fixée à 0°C ; (sondes géothermiques sous le bâtiment, le gel de la sonde doit être absolument évité).

La pompe à chaleur est dimensionnée pour délivrer une puissance thermique de 140 kW aux conditions nominales B7W50 (entrée du fluide caloporteur dans l'évaporateur : 7°C ; sortie de l'eau de chauffage du condenseur : 50°C). Les performances thermiques de la PAC sont déterminées en se basant sur un COP (coefficient de performance) de 3.4 aux conditions de travail B7W50. La puissance électrique du compresseur est ainsi de 40 kW et les débits de fluide sont définis avec une chute de température de 3 K dans l'évaporateur et de 10 K dans le condenseur aux conditions nominales. Il en résulte en débit nominal d'environ 30 m<sup>3</sup>/h dans le circuit des sondes géothermiques.

### 3.2. Champ de sondes géothermiques

Un champ de 30 sondes géothermiques de 150m chacune est simulé. La résistance thermique des sondes est directement issue du test de réponse effectué. Compte tenu de la différence marquée entre l'extraction et l'injection annuelle d'énergie dans les sondes (rapport de 3 pour 1), l'espacement est, relativement aux deuxièmes simulations, augmenté de 6 à 9 mètres.

- Nombre de sondes géothermiques 30 -
- Longueur d'une sonde géothermique 150 m
- Diamètre moyen du forage de la sonde 0.13 m
- Espacement entre les sondes 9 m
- Résistance thermique d'une sonde 0.12 K/(W/m)

Pour les simulations effectuées avec PILESIM, l'arrangement spatial des sondes est entièrement déterminé par leur espacement. En effet le modèle se base sur une densité des sondes géothermiques uniforme, disposée dans une surface cylindrique. Le volume de terrain traversé par les sondes a ainsi la forme d'un cylindre vertical.

### 3.3. Propriétés thermiques du terrain

La conductivité thermique moyenne de la couche de terrain traversée par les sondes géothermiques a été déterminée in situ par le test de réponse, de même que sa température initiale.

- Conductivité thermique moyenne du terrain 2.6 W/mK
- Capacité thermique volumétrique du terrain 2.1 MJ/m<sup>3</sup>K
- Température initiale moyenne du terrain 12 °C

### 3.4. Interface terrain - bâtiment

Afin de limiter les transferts thermiques entre le terrain et le bâtiment, une couche d'isolation de 10 cm d'épaisseur est supposée être présente sous toute la base du bâtiment.

## 4. Résultats des simulations

Les simulations du système sont exécutées sur une période de 20 ans. Deux variantes sont présentées. La variante 1 est la variante de référence. Elle est simulée en couplant sur le système avec sondes géothermiques la totalité des demandes de chauffage et de refroidissement. Afin de limiter les demandes de puissance en chauffage et en refroidissement, les dalles actives fonctionnent en alternance avec le système de ventilation et des panneaux rayonnants. La totalité de la demande de chauffage ne peut pas être couverte sans devoir sur-dimensionner la longueur des sondes géothermiques. C'est la raison pour laquelle la puissance de la pompe à chaleur (PAC) est limitée à 140 kW, afin de limiter la puissance d'extraction sur les sondes et l'abaissement de la température du fluide caloporteur.

**Variante 1** : 30 sondes géothermiques espacées par 9 mètres.

**Variante 2** : 30 sondes géothermiques espacées par 6 mètres.

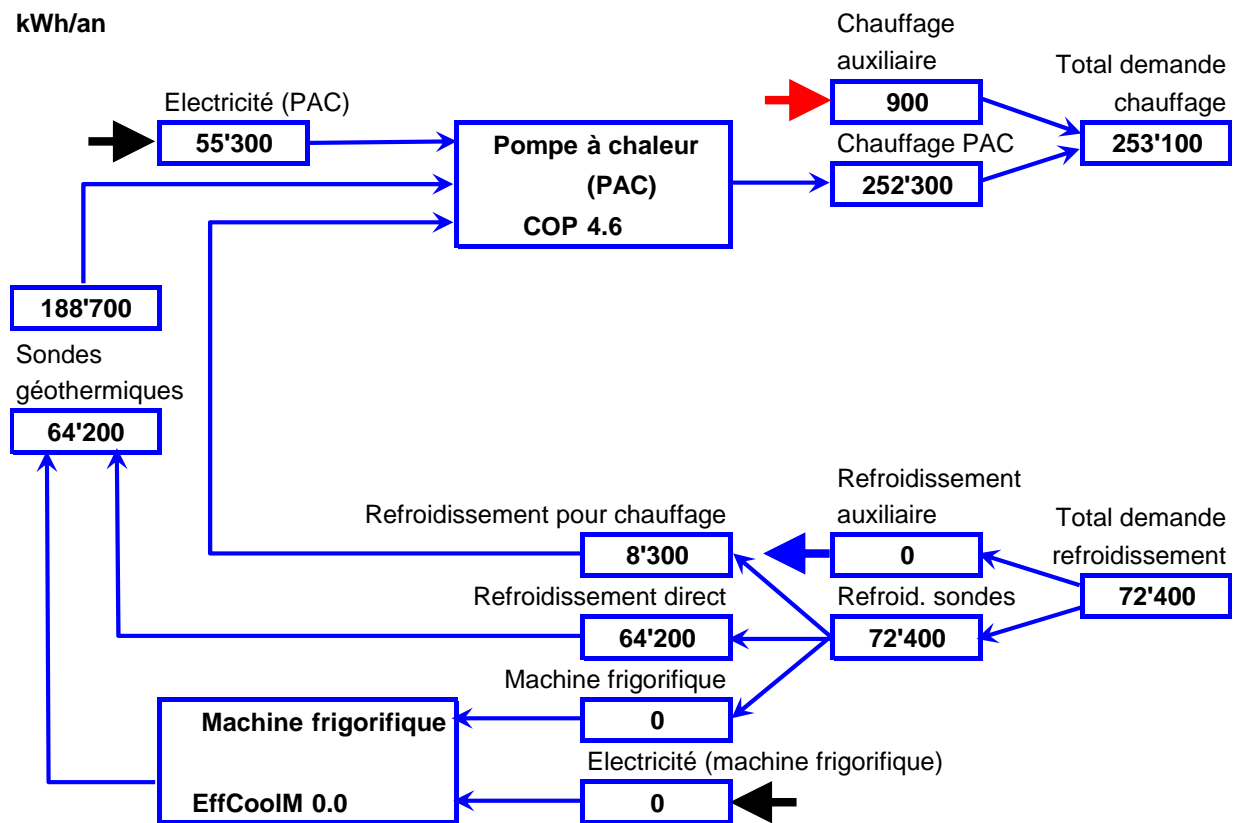


**4.1. Variante 1 : 30 sondes géothermiques espacées par 9 mètres**

Chauffage	253 MWh/an	puissance maximum de chauffage	220 kW
Refroidissement	72 MWh/an	puissance maximum de refroidissement	142 kW

**Bilan thermique du système**

moyenne sur 20 ans



**Chauffage**

Puissance d'extraction par mètre de sonde	30	W/m
Energie annuelle extraite par mètre de sonde	42	kWh/m/a

**Refroidissement**

Puissance d'injection par mètre de sonde	32	W/m
Energie annuelle injectée par mètre de sonde	14	kWh/m/a

Figure 4.1 : Bilan énergétique du système pour la variante de référence (variante 1)

Le bilan annuel des énergies injectée et extraite des sondes donne un rapport injecté sur extrait de **0.34**. Il s'ensuit un léger abaissement de la température du terrain dans la zone des sondes (déduit de la figure 4.2). La totalité de la demande de refroidissement est couverte par geocooling (cf. figure 4.3). La pompe à chaleur est dimensionnée pour couvrir 150 – 160 kW de la demande de chaleur. La puissance manquante est couverte par un réseau de chauffage à distance (environ 60 – 70 kW). Toutefois, la pompe à chaleur permet de couvrir pratiquement la totalité de l'énergie annuelle de chauffage, avec un taux de couverture supérieure à 99%.

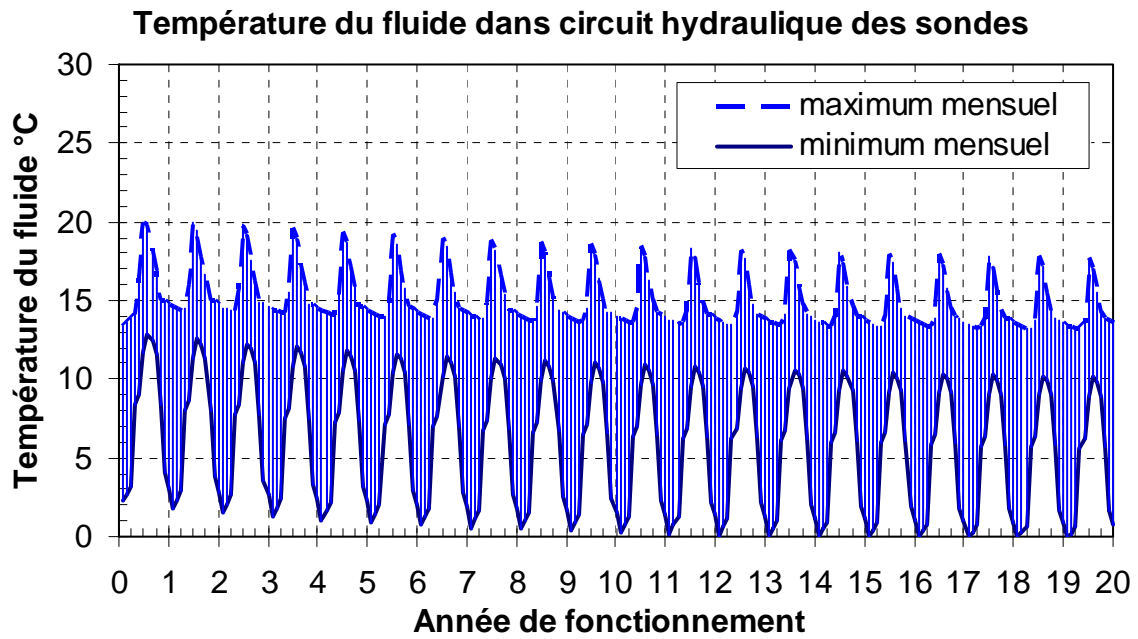


Figure 4.2 : Evolution de la température du fluide dans les sondes pour la variante de référence (variante 1)

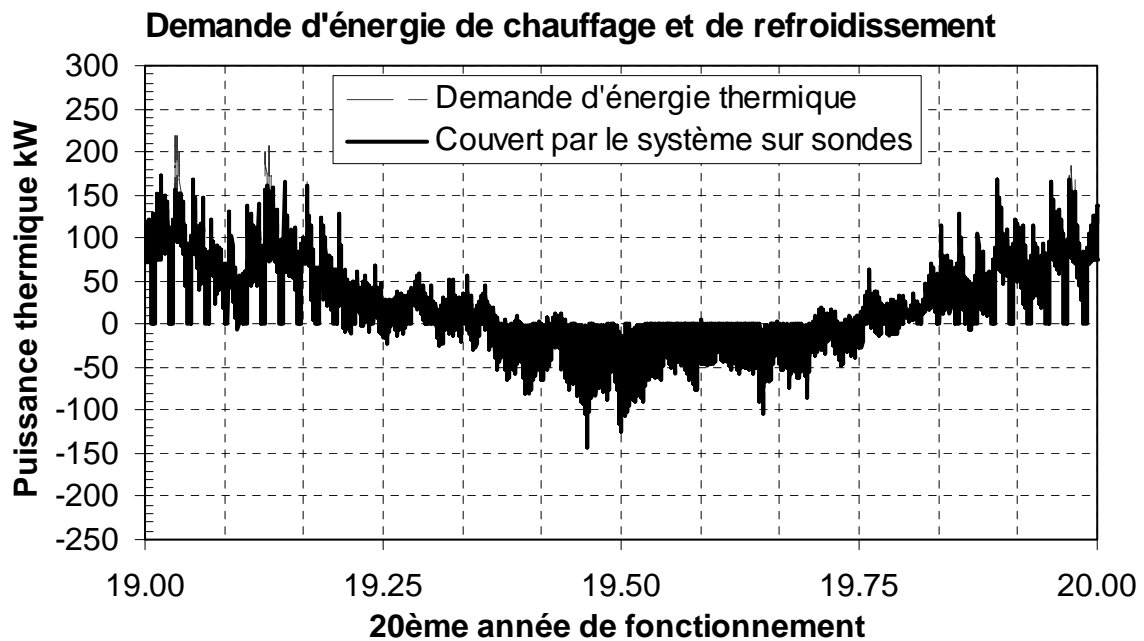
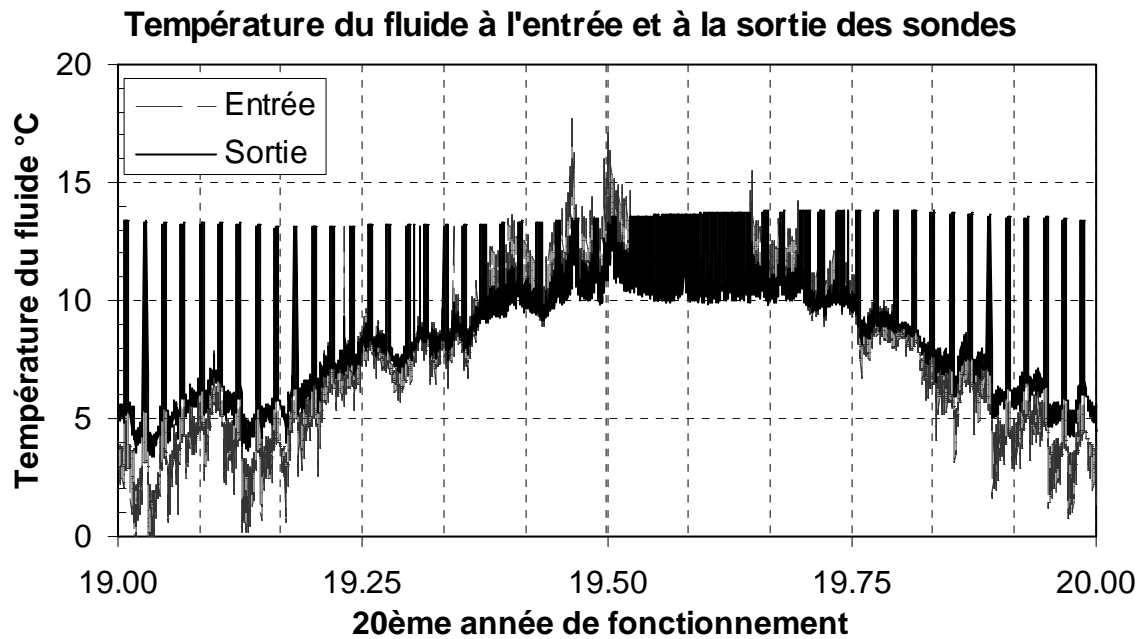


Figure 4.3 : Evolution des puissances demandées et couvertes par le système géothermique la 20<sup>e</sup> année de fonctionnement du système pour la variante de référence (variante 1)



*Figure 4.4 : Evolution de la température à l'entrée et à la sortie des sondes la 20<sup>e</sup> année de fonctionnement du système pour la variante de référence (variante 1)*

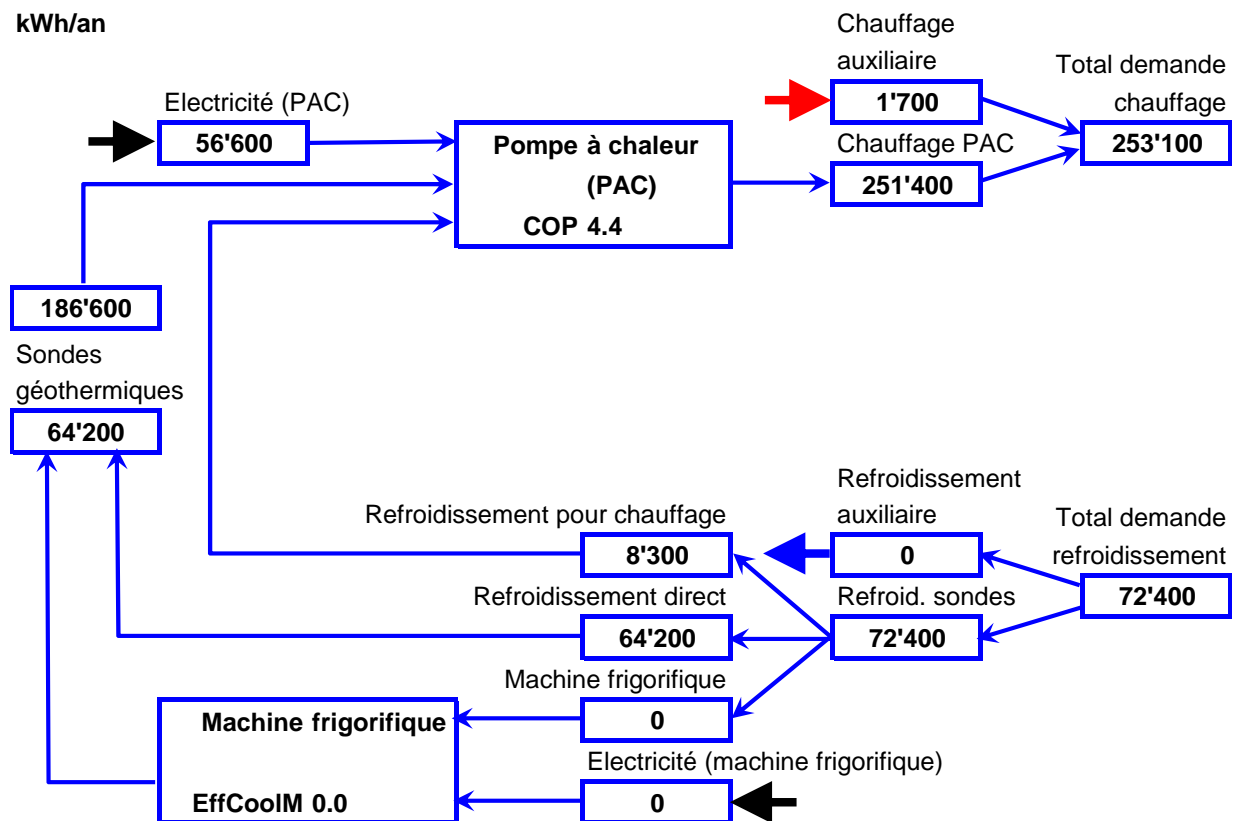
L'air pulsé dans le bâtiment a une température comprise entre 20 et 24°C. Comme la température du fluide à la sortie des sondes peut monter jusqu'à 17°C, il se pose la question du dimensionnement de l'échangeur fluide – air dans les monoblocs de ventilation.

**4.2. Variante 2 : 30 sondes géothermiques espacées par 6 mètres**

Chauffage	253 MWh/an	puissance maximum de chauffage	220 kW
Refroidissement	72 MWh/an	puissance maximum de refroidissement	142 kW

**Bilan thermique du système**

moyenne sur 20 ans



**Chauffage**

Puissance d'extraction par mètre de sonde	30	W/m
Energie annuelle extraite par mètre de sonde	41	kWh/m/a

**Refroidissement**

Puissance d'injection par mètre de sonde	32	W/m
Energie annuelle injectée par mètre de sonde	14	kWh/m/a

Figure 4.5 : Bilan énergétique du système pour la variante 2 (espacement entre les sondes réduit de 9 à 6m)

Avec un espacement réduit entre les sondes, il s'ensuit un abaissement plus prononcé de la température du terrain (déduit de la figure 4.6), ce qui nécessite de limiter parfois la puissance de la PAC à 120 kW pour empêcher la température de retour du fluide dans les sondes de descendre sous la limite de 0°C (cf. figure 4.8). La totalité de la demande de refroidissement est couverte par geocooling (cf. figure 4.7). La pompe à chaleur permet quand même de couvrir plus de 99% de la demande d'énergie de chauffage annuelle, mais avec un COP annuel (coefficient de performance) légèrement inférieur.

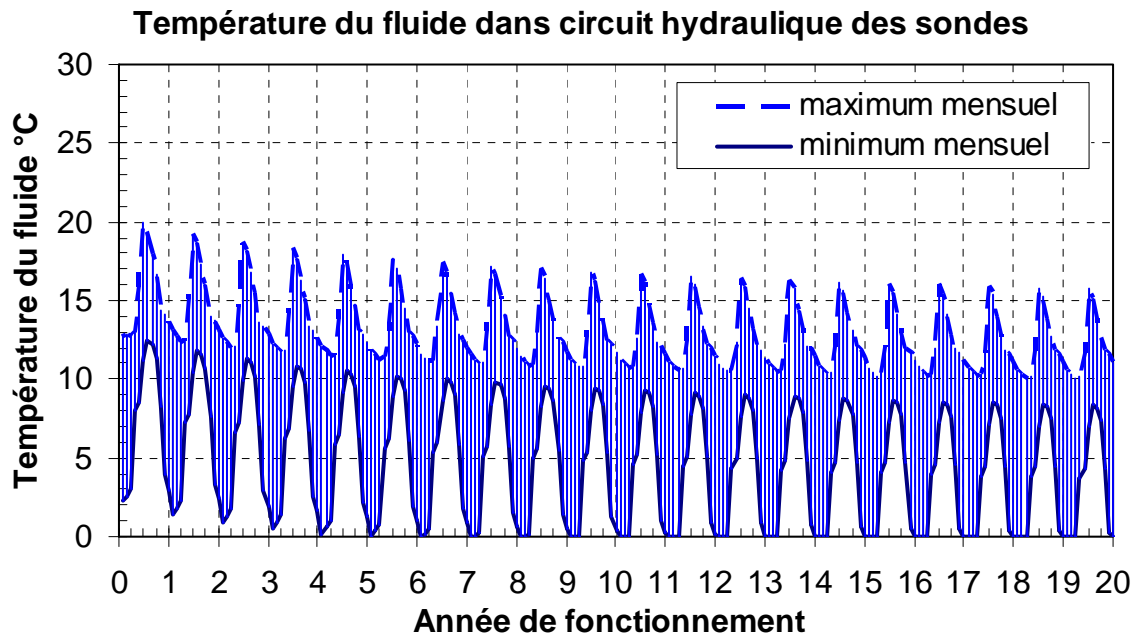


Figure 4.6 : Evolution de la température du fluide dans les sondes pour la variante 2 (espacement ente les sondes réduit de 9 à 6 m)

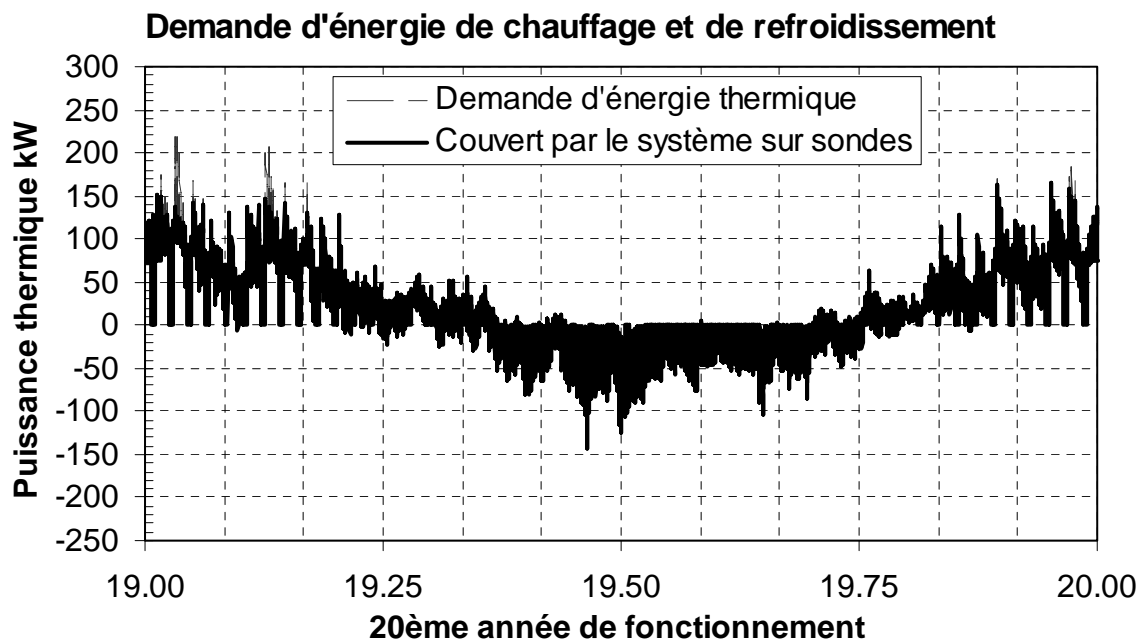


Figure 4.7 : Evolution des puissances demandées et couvertes par le système géothermique la 20<sup>e</sup> année de fonctionnement du système pour la variante 2 (espacement ente les sondes réduit de 9 à 6 m)

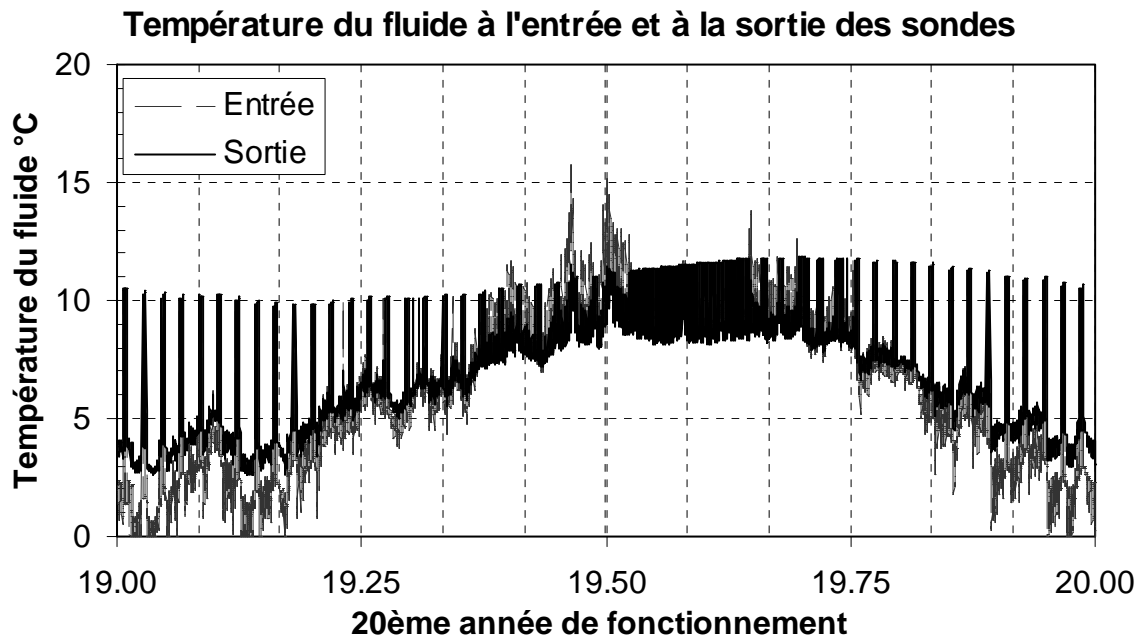


Figure 4.8 : Evolution de la température à l'entrée et à la sortie des sondes la 20<sup>e</sup> année de fonctionnement du système pour la variante 2 (espacement entre les sondes réduit de 9 à 6 m)

Cette variante permet de montrer l'importance de l'espacement des sondes lorsque le bilan annuel des énergies injectée et extraite est fortement déséquilibré.

## 5. Recommandations

Les résultats des simulations faites avec PILESIM se basent sur la troisième simulation des demandes de chauffage et de refroidissement du nouveau bâtiment de l'École des Métiers de Fribourg. Ces dernières sont calculées à 250 MWh/an avec une puissance de pointe de 220 kW pour le chauffage et à 70 MWh/an avec au maximum 140 kW pour le refroidissement.

Les simulations permettent de formuler les recommandations suivantes :

- toutes les sondes géothermiques doivent être raccordées ensemble. Si trois centrales thermiques sont réalisées, elles doivent être couplées à l'ensemble des sondes, même quand elles ne fonctionnent pas simultanément ;
- un ensemble de 30 sondes géothermiques de 150 m chacune est nécessaire, avec un espacement d'au moins 9 m entre les sondes. Un espacement plus grand ne pénalise pas les performances thermiques du système, contrairement à un espacement plus petit. En réalité, les sondes seront disposées sur 3 rangées, formant ainsi un rectangle allongé. Une comparaison avec un calcul plus détaillé pour prendre en compte la géométrie des sondes montre que la disposition réelle des sondes revient à insérer dans le programme PILESIM un espacement entre les sondes plus grand, équivalent à environ 11 m (cf. DOC B, annexe B). Les performances thermiques du système, simulées avec un espacement équivalent de 11m, ne sont pas modifiées.
- le système avec sondes géothermiques doit pouvoir être couplé aux trois systèmes de distribution de chaleur (dalles actives, panneaux rayonnants et ventilation), aussi bien en mode chauffage qu'en mode refroidissement ;
- les dalles actives fonctionnent 12h par jour et en alternance avec le système de ventilation et des panneaux rayonnants, ce qui permet de limiter les puissances de pointe pour le chauffage et le refroidissement ;
- les pompes à chaleur ne doivent pas être dimensionnées pour couvrir la totalité de la demande de chaleur, mais pour extraire jusqu'à environ 30 W/m de sonde géothermique, correspondant à une puissance thermique totale de 150–160 kW aux condenseurs. La température de sortie des condenseurs ne devrait pas dépasser 40°C. Ce dimensionnement des pompes à chaleur a été fait avec une recharge thermique du terrain de l'ordre de 30% avec la demande de refroidissement ; dans tous les cas la possibilité de limiter la puissance des PAC devrait être assurée, afin d'éviter le passage de la température du fluide dans le circuit des sondes au-dessous de 0°C (PAC à plusieurs allures ou plusieurs PAC fonctionnant en parallèle) ;
- les pointes de puissance en chauffage ne peuvent pas être couvertes par le système couplé sur les sondes géothermiques. Toutefois les calculs montrent que l'apport des puissances auxiliaires peut se limiter au système de ventilation seulement ;

- l'apport auxiliaire de chaud dans le système de ventilation devrait être fait de façon indépendante du système avec les sondes géothermiques (avec par exemple un échangeur séparé à la sortie de la batterie de ventilation). Si, malgré les résultats des simulations, un apport auxiliaire de froid est injecté dans le système de ventilation, il devrait également être fait de façon indépendante au système avec les sondes géothermiques ;
- il est important de dimensionner les équipements (échangeurs de chaleur, émetteurs de chaud et de froid, etc.) de manière à pouvoir assurer une température de fluide au retour dans les sondes géothermiques supérieure à 20°C pendant les puissances de pointe.

**Commentaire :**

- les sondes géothermiques seront placées sous le parking. Les tubes horizontaux raccordant les sondes géothermiques et le puits canadien pour l'air du système de ventilation seront enfouis sous le parking. Ils s'influenceront thermiquement, mais dans une mesure modeste et qui va dans le bon sens, dans la mesure où les variations saisonnières des températures du fluide circulant dans les sondes et de l'air dans le puits canadien sont en phase et du même ordre de grandeur.

Pour le Laboratoire d'Énergie, d'Écologie et d'Économie:

Dr. Daniel Pahud



Trevano, CP 105  
CH-6952 Canobbio

Telefono +41 (0)58 666 63 51  
Fax +41 (0)58 666 63 49  
E-mail leee@supsi.ch  
N. IVA 425.112

Da Daniel Pahud  
Telefono +41 (0)58 666 63 53  
E-mail daniel.pahud@supsi.ch

**DOC. B**

OGGETTO

Ecole des Métiers à Fribourg

TITOLO

**Simulation thermique du système  
géothermique de la future Ecole des Métiers  
à Fribourg**  
**Troisième série de simulations du système**

COMMITTENTE

CRÈGE  
Rue Emile-Argand 11  
CH - 2007 Neuchâtel

ESTENSORE RAPPORTO

Dr. Daniel Pahud, SUPSI – DACD – LEEE

DOCUMENTI

DOC. A Rapport  
DOC. B Annexes

LUOGO E DATA

Lugano/Trevano, 22 novembre 2005  
Rapport-LEEE-SUPSI-novembre-DocB.doc

# ANNEXE A

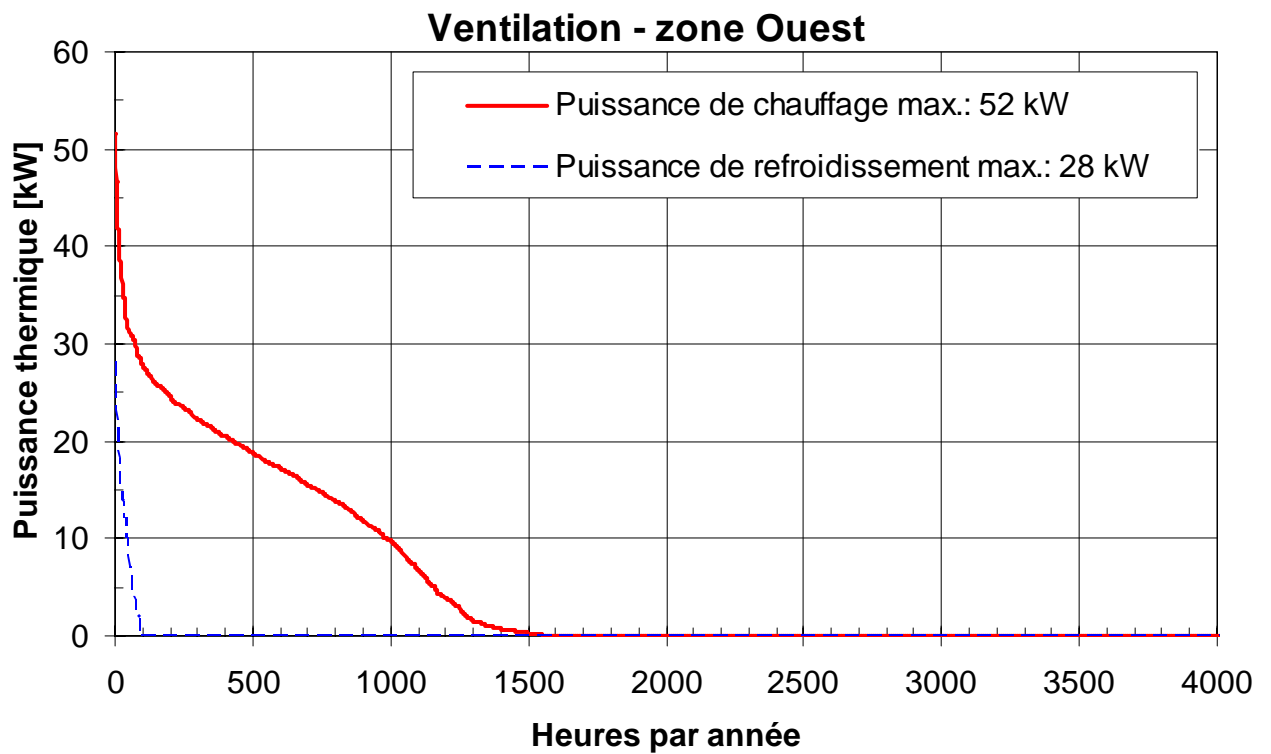
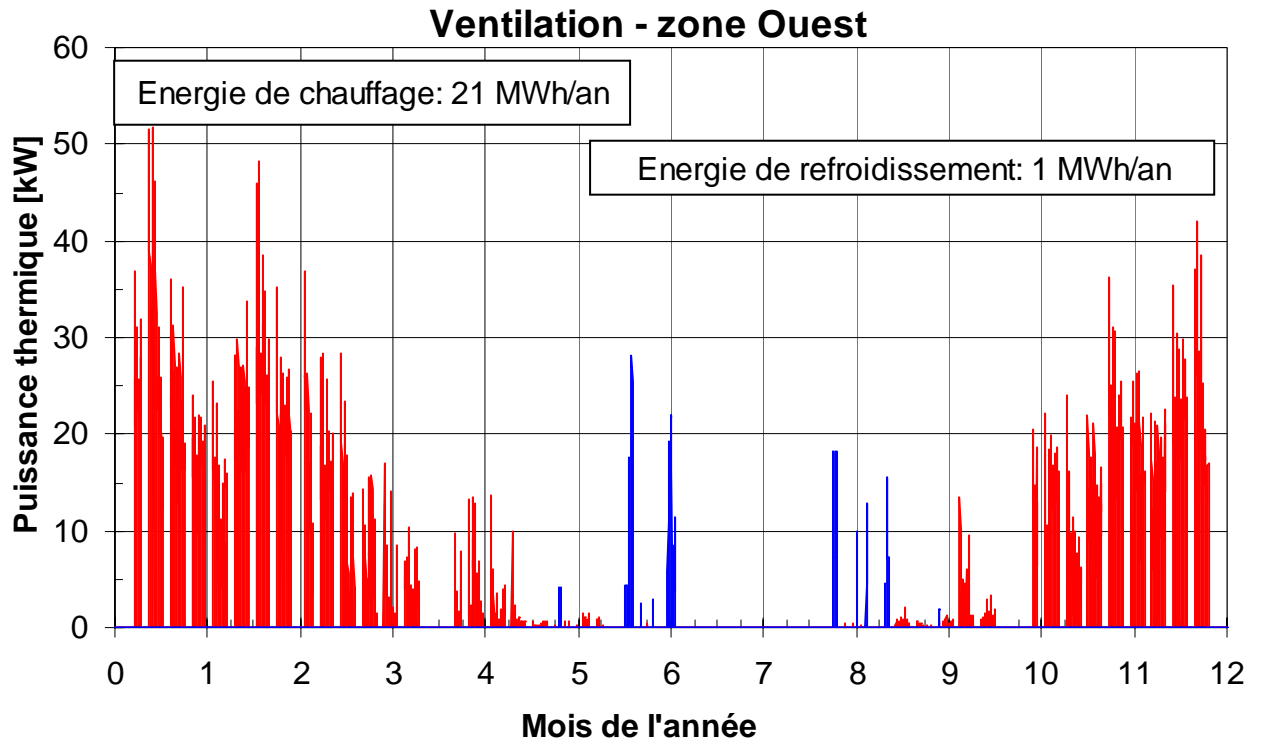
## A- Demandes d'énergie de chauffage et de refroidissement du bâtiment (variante 12h pour les dalles actives – avec ventilation nocturne pour réduire les besoins en refroidissement)

### Récapitulation

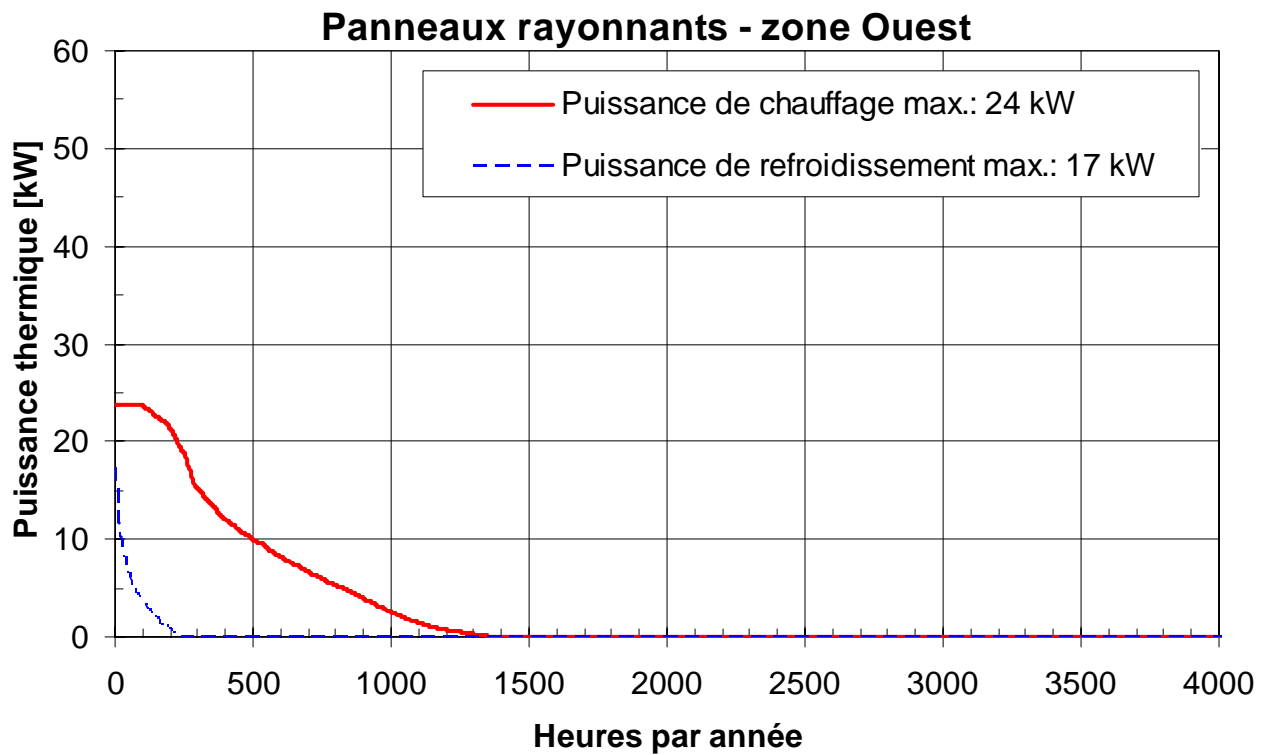
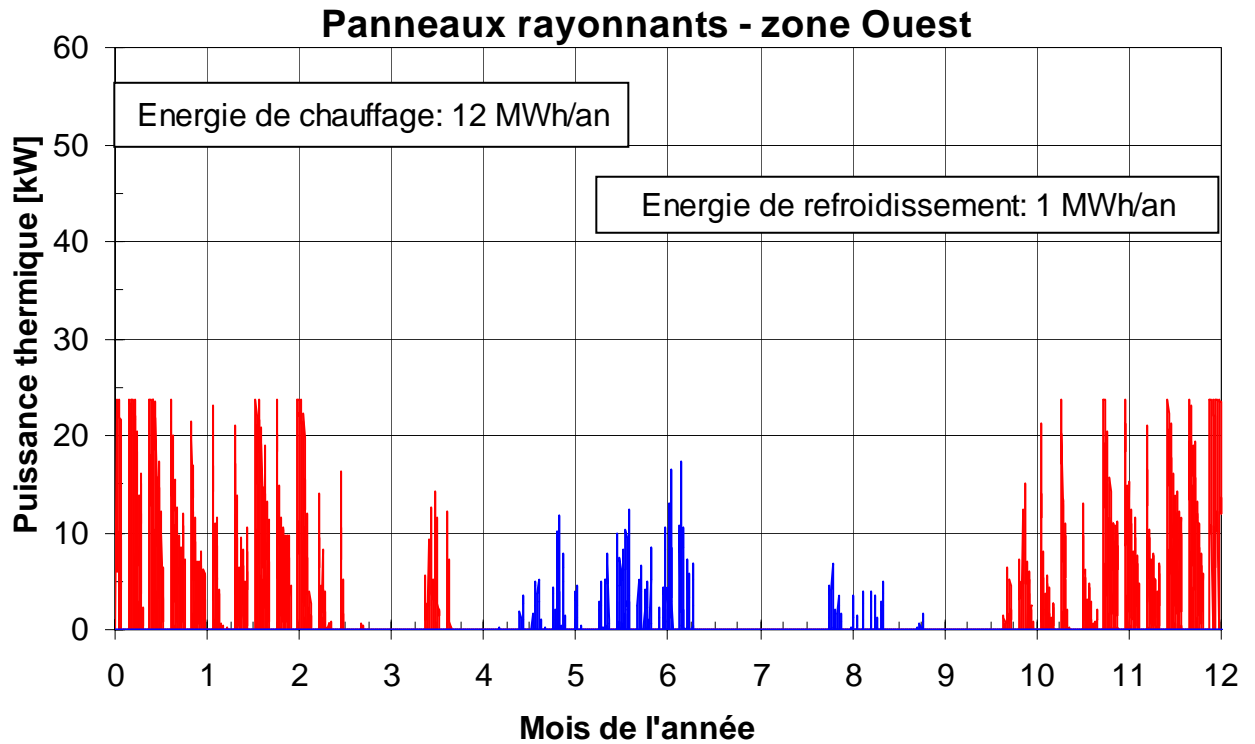
Chauffage	Ventilation	Panneaux rayonnants	Dalles actives	Total
Zone Ouest	21 MWh/an max. 52 kW	12 MWh/an max. 24 kW	10 MWh/an max. 25 kW	44 MWh/an max. 75 kW
Zone Centrale	9 MWh/an max. 41 kW	11 MWh/an max. 28 kW	28 MWh/an max. 39 kW	49 MWh/an max. 65 kW
Zone Est	25 MWh/an max. 60 kW	28 MWh/an max. 24 kW	108 MWh/an max. 84 kW	161 MWh/an max. 84 kW
<b>Total</b>	<b>56 MWh/an</b> max. 152 kW	<b>51 MWh/an</b> max. 75 kW	<b>146 MWh/an</b> max. 133 kW	<b>253 MWh/an</b> <b>max. 220 kW</b>

Refroidissement	Ventilation	Panneaux rayonnants	Dalles actives	Total
Zone Ouest	1 MWh/an max. 28 kW	1 MWh/an max. 17 kW	21 MWh/an max. 27 kW	22 MWh/an max. 40 kW
Zone Centrale	1 MWh/an max. 27 kW	11 MWh/an max. 35 kW	19 MWh/an max. 35 kW	30 MWh/an max. 53 kW
Zone Est	1 MWh/an max. 34 kW	1 MWh/an max. 26 kW	17 MWh/an max. 44 kW	20 MWh/an max. 49 kW
<b>Total</b>	<b>3 MWh/an</b> max. 89 kW	<b>13 MWh/an</b> max. 78 kW	<b>56 MWh/an</b> max. 106 kW	<b>72 MWh/an</b> <b>max. 142 kW</b>

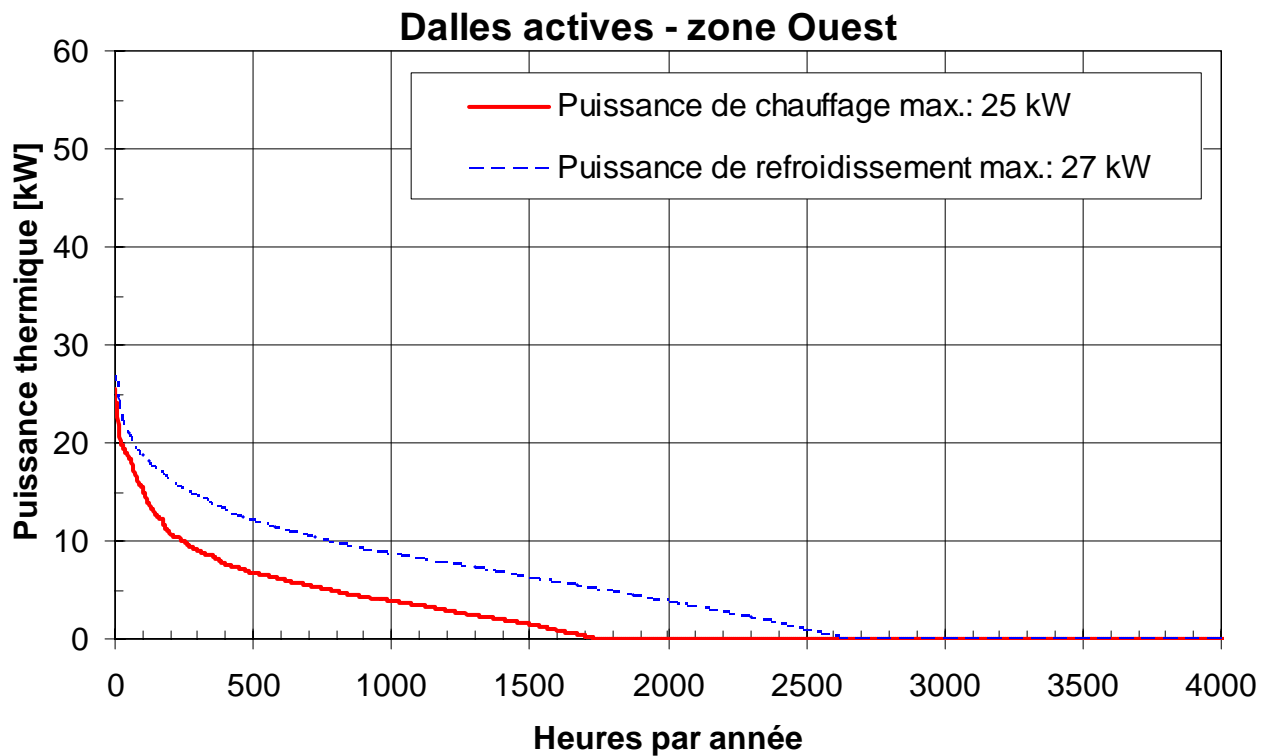
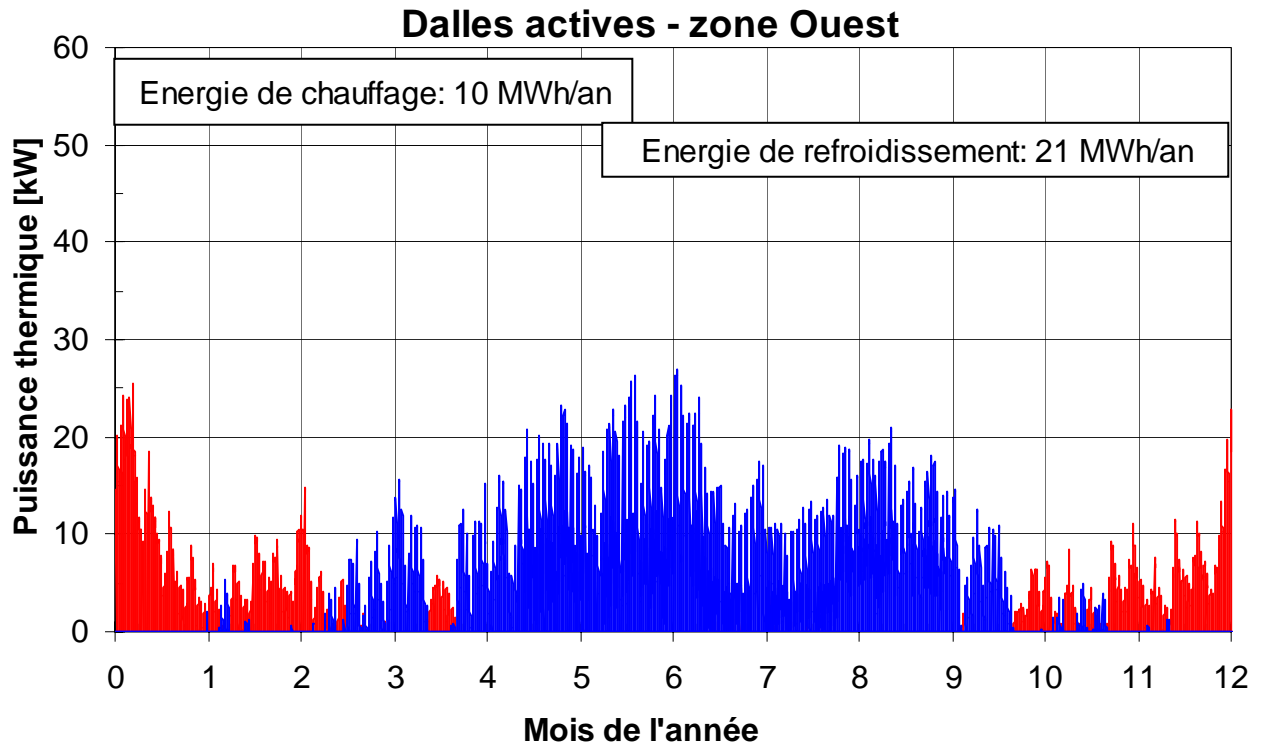
## Zone Ouest - ventilation



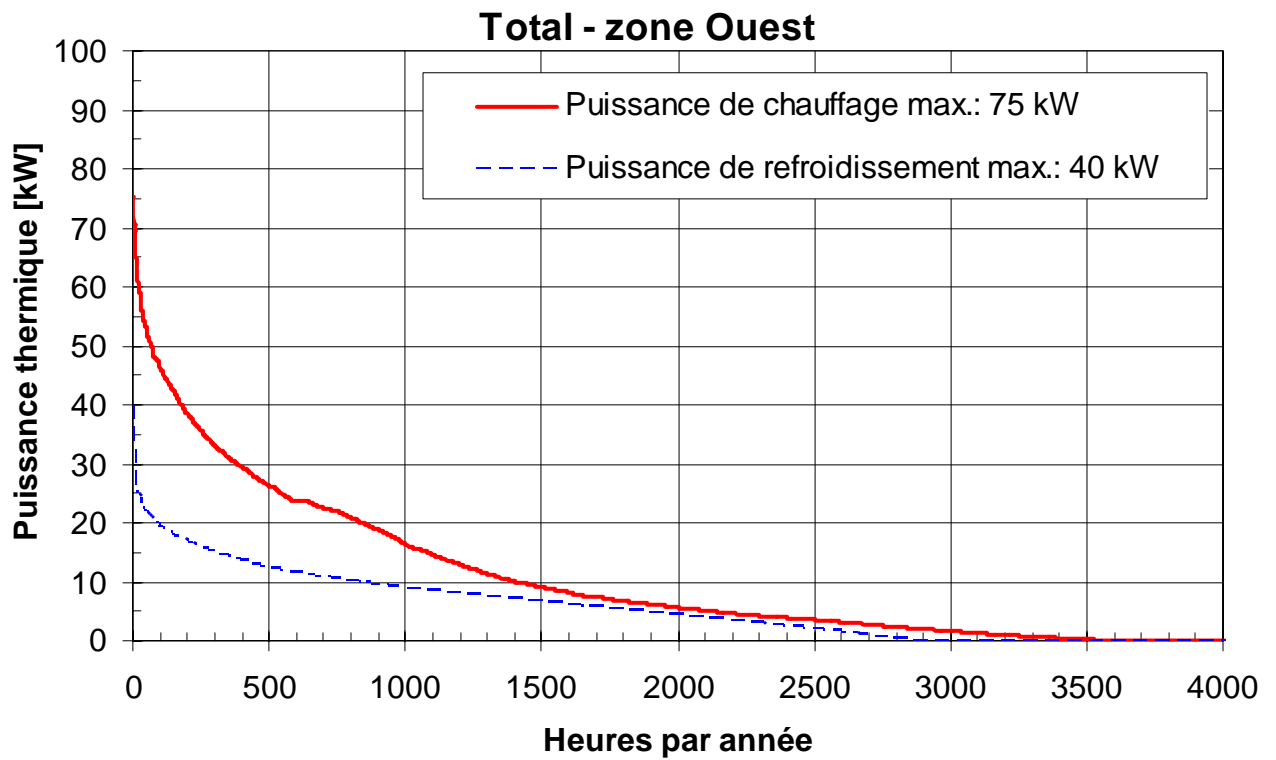
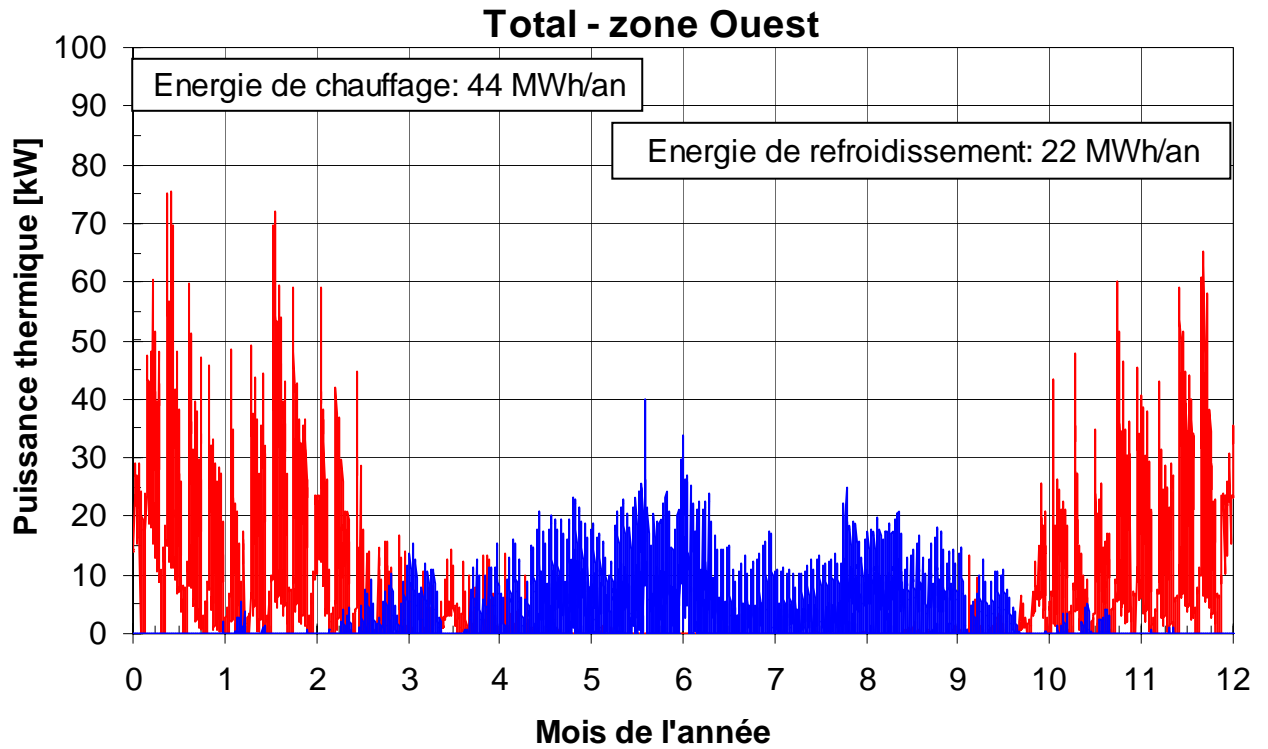
## Zone Ouest – panneaux rayonnants



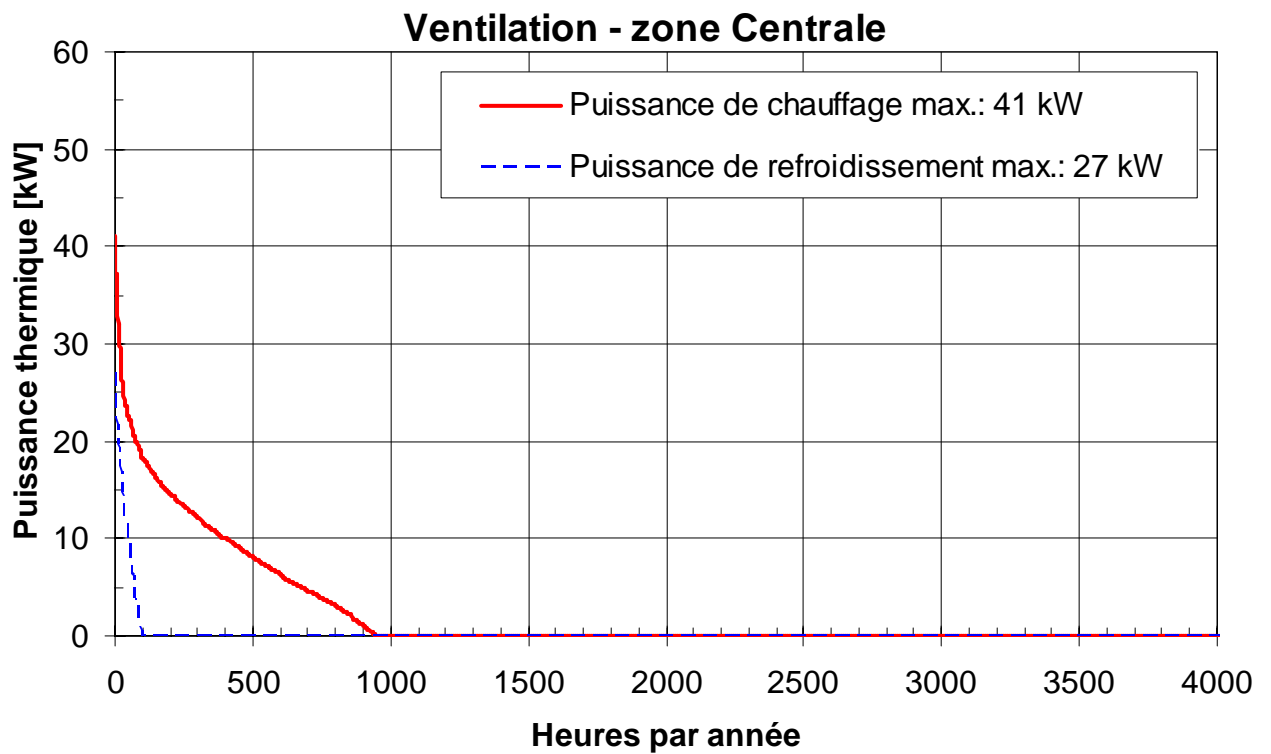
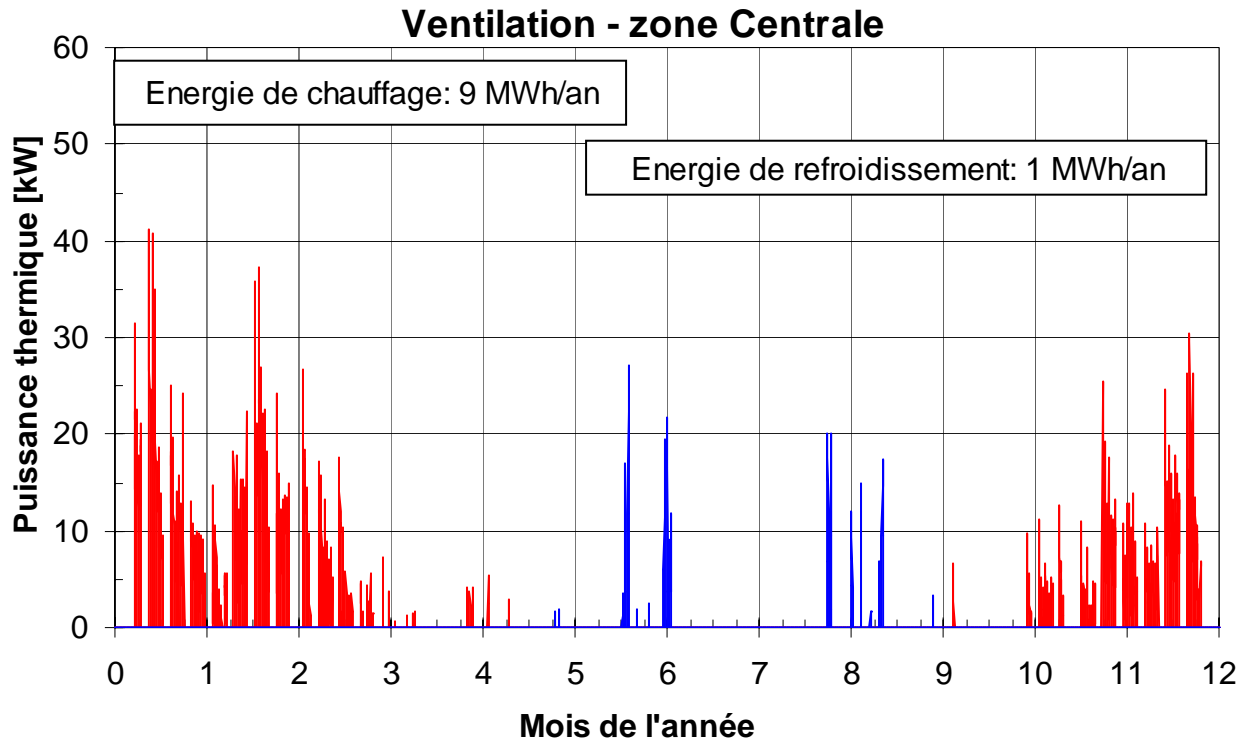
## Zone Ouest – dalles actives



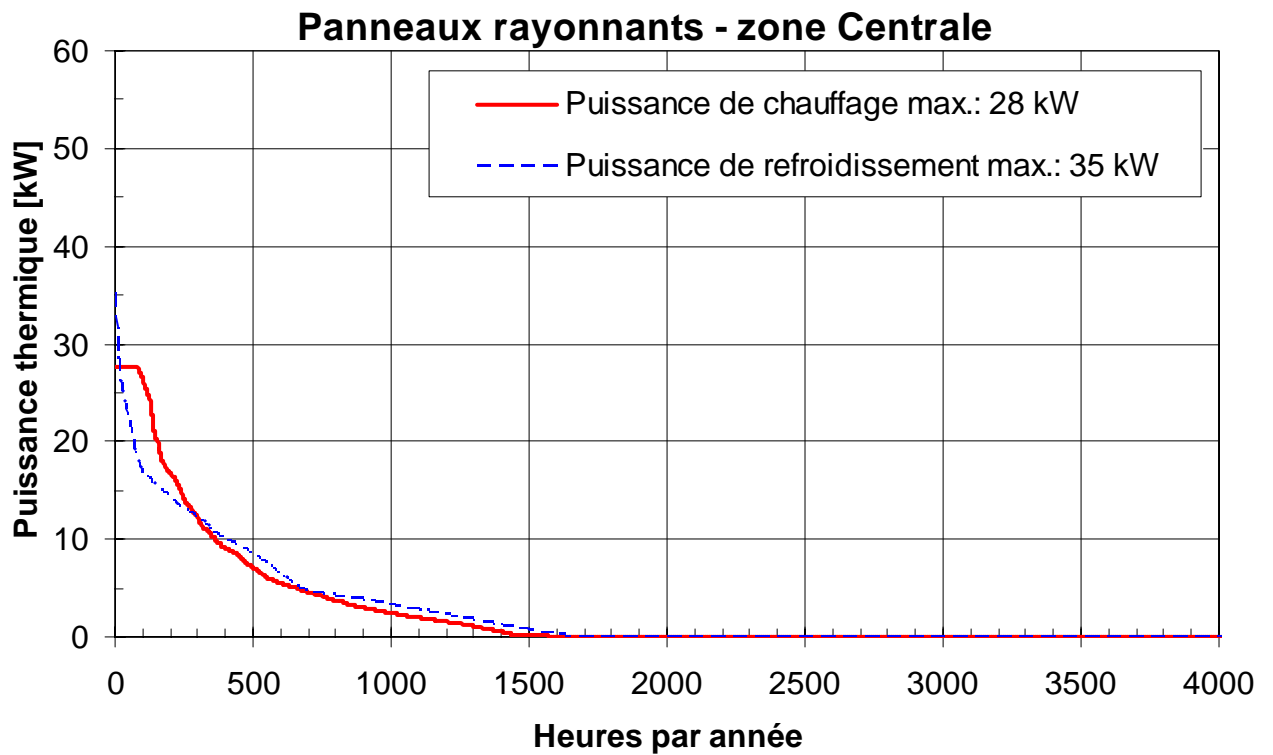
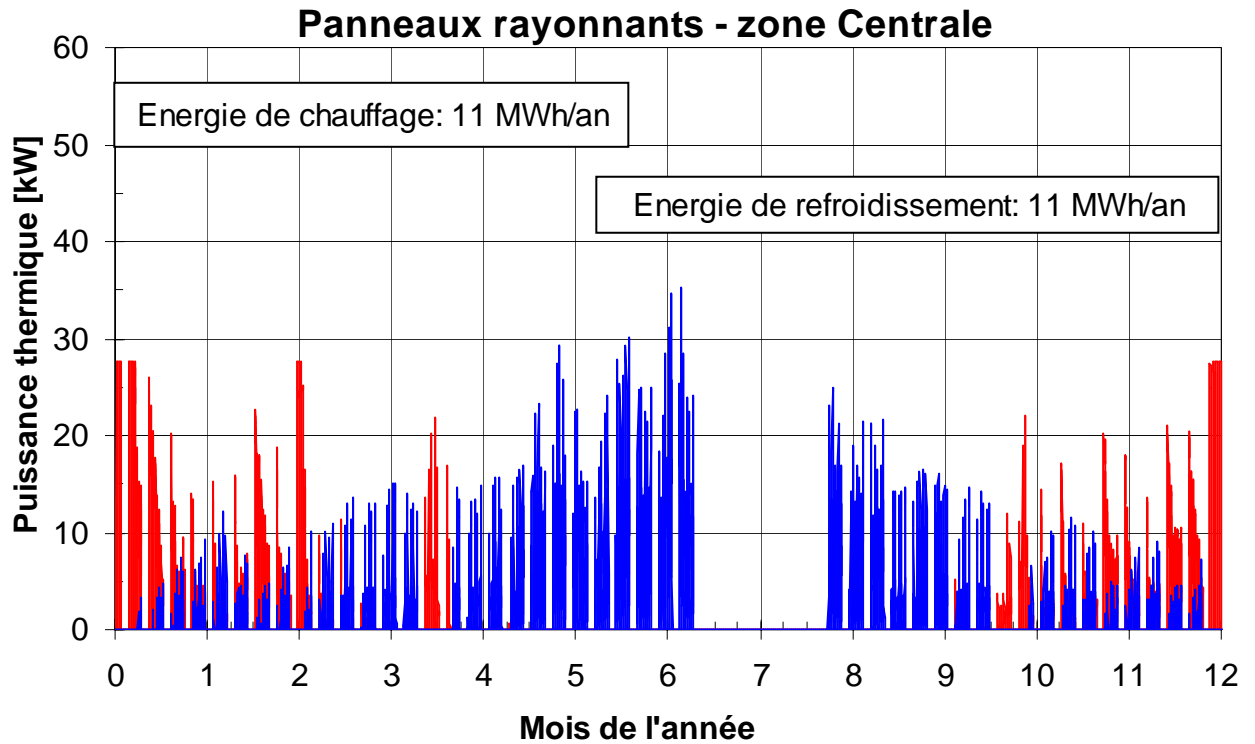
## Zone Ouest – total



## Zone Centrale - ventilation

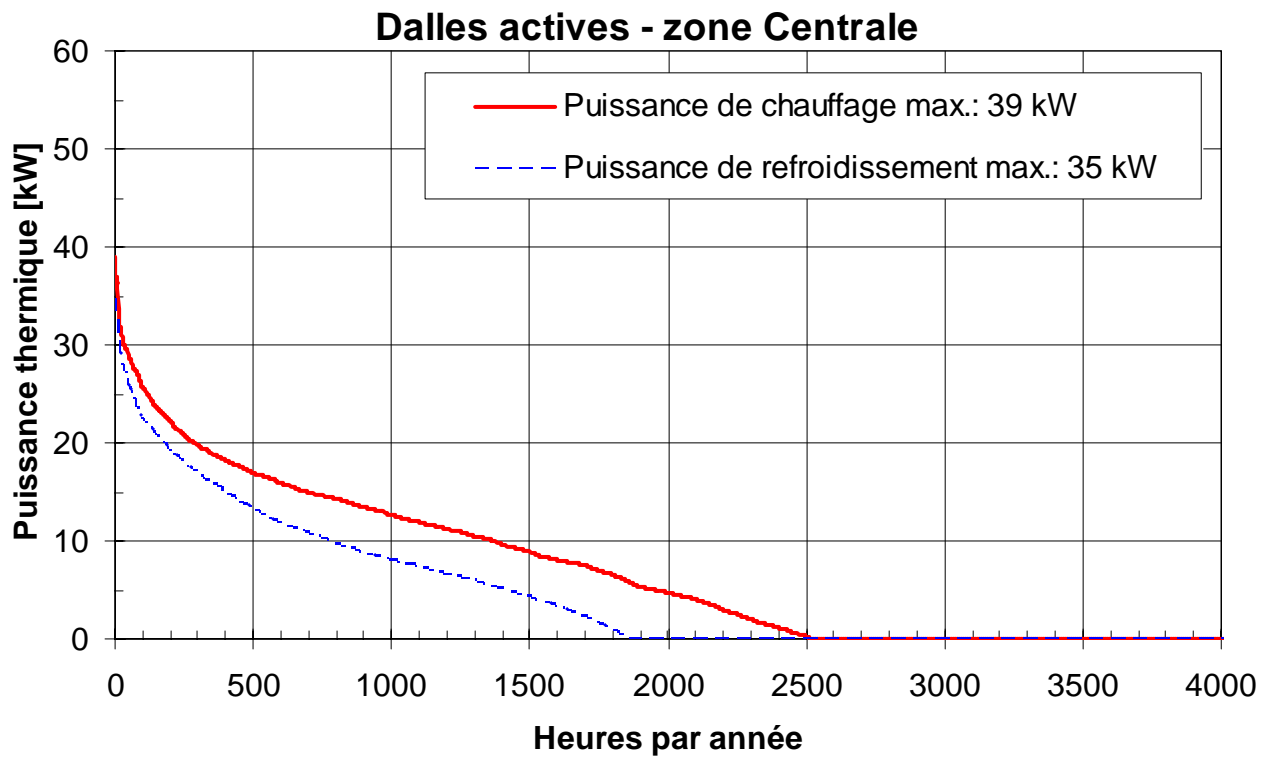
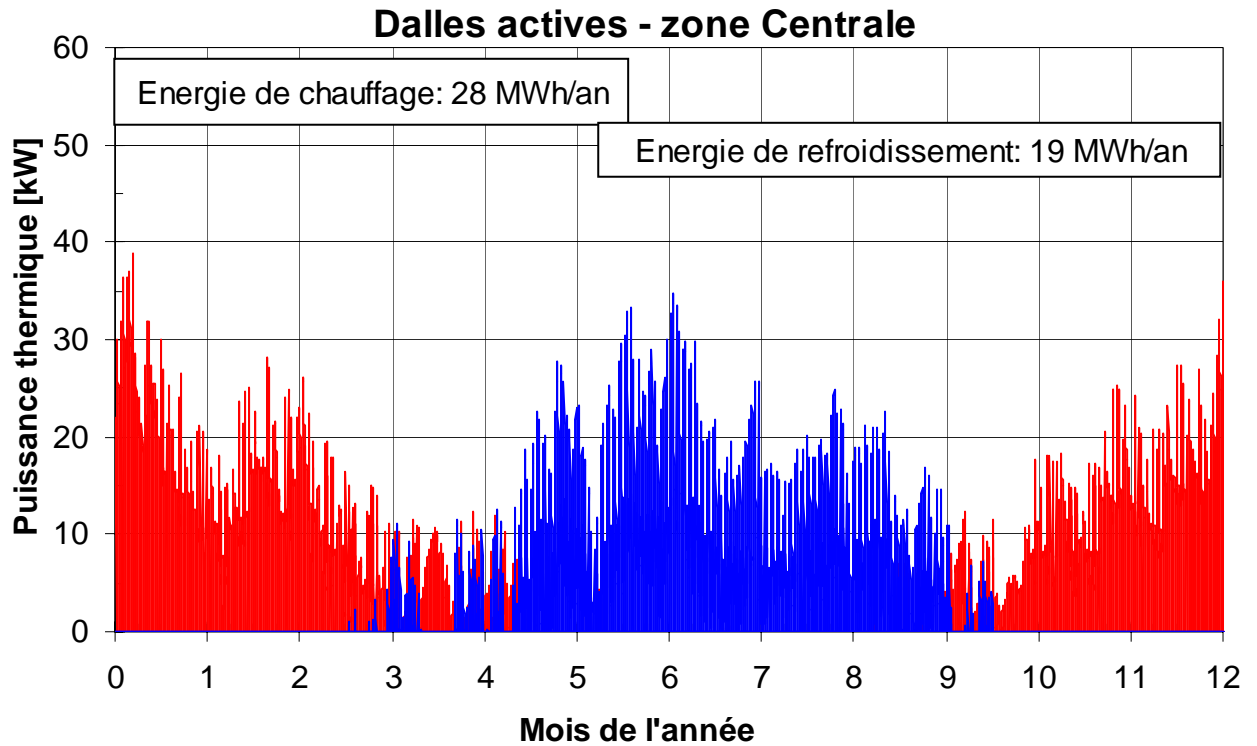


## Zone Centrale – panneaux rayonnants

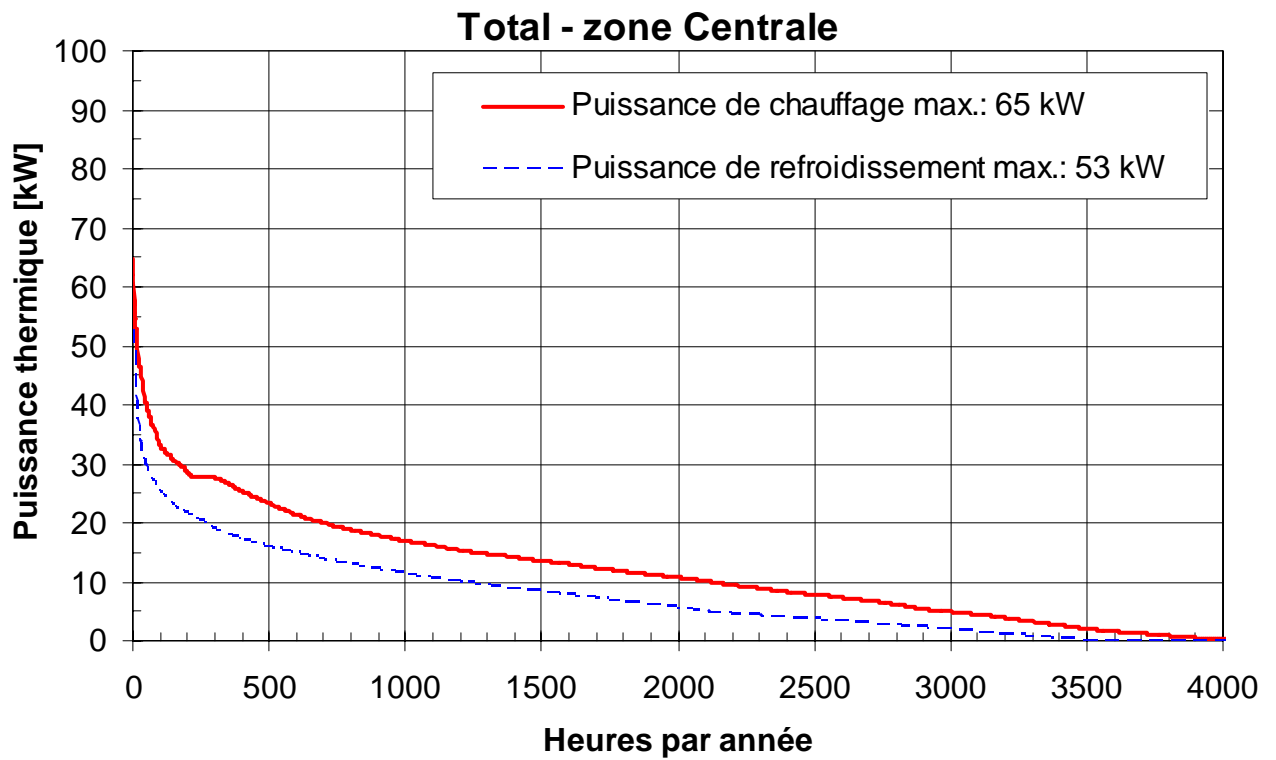
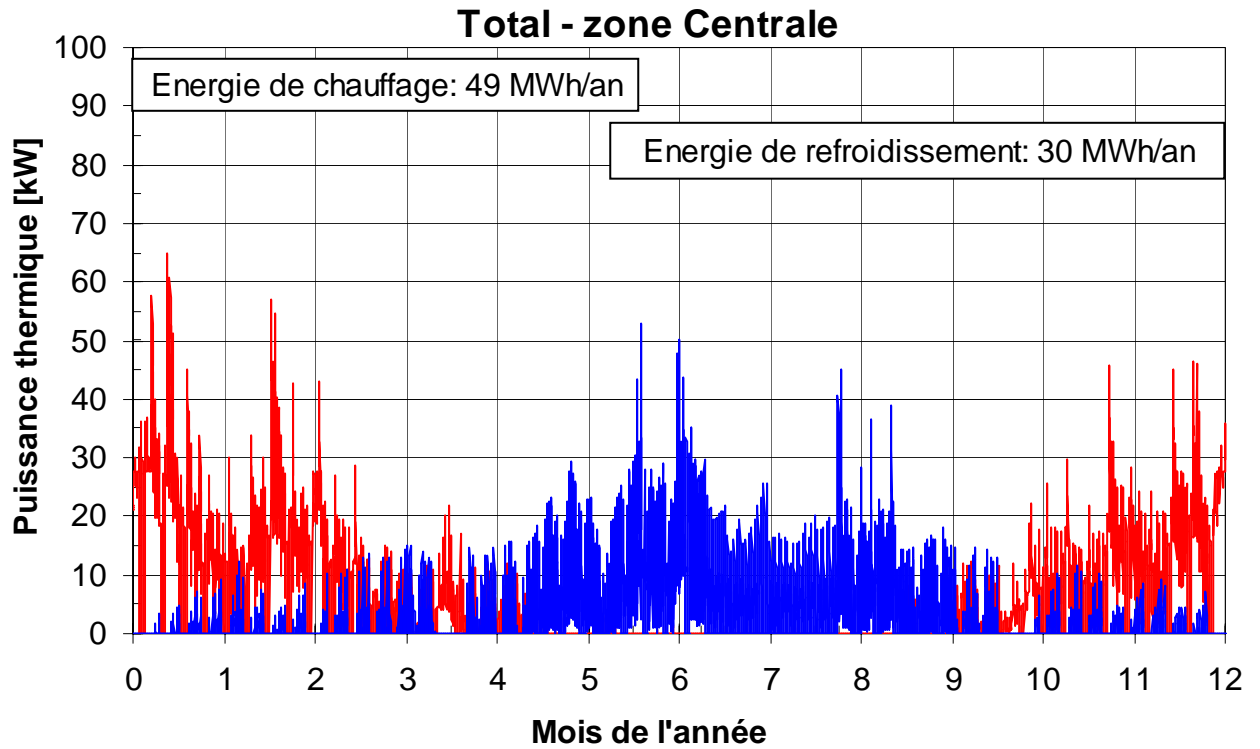




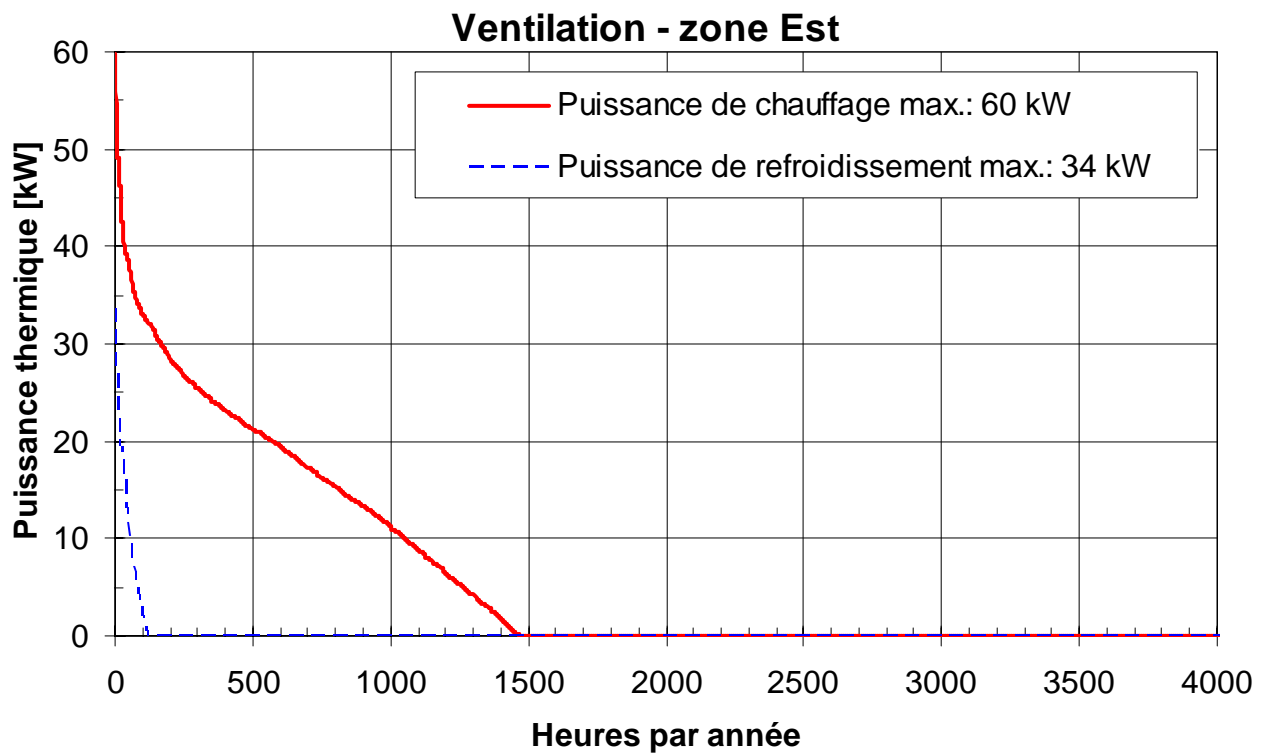
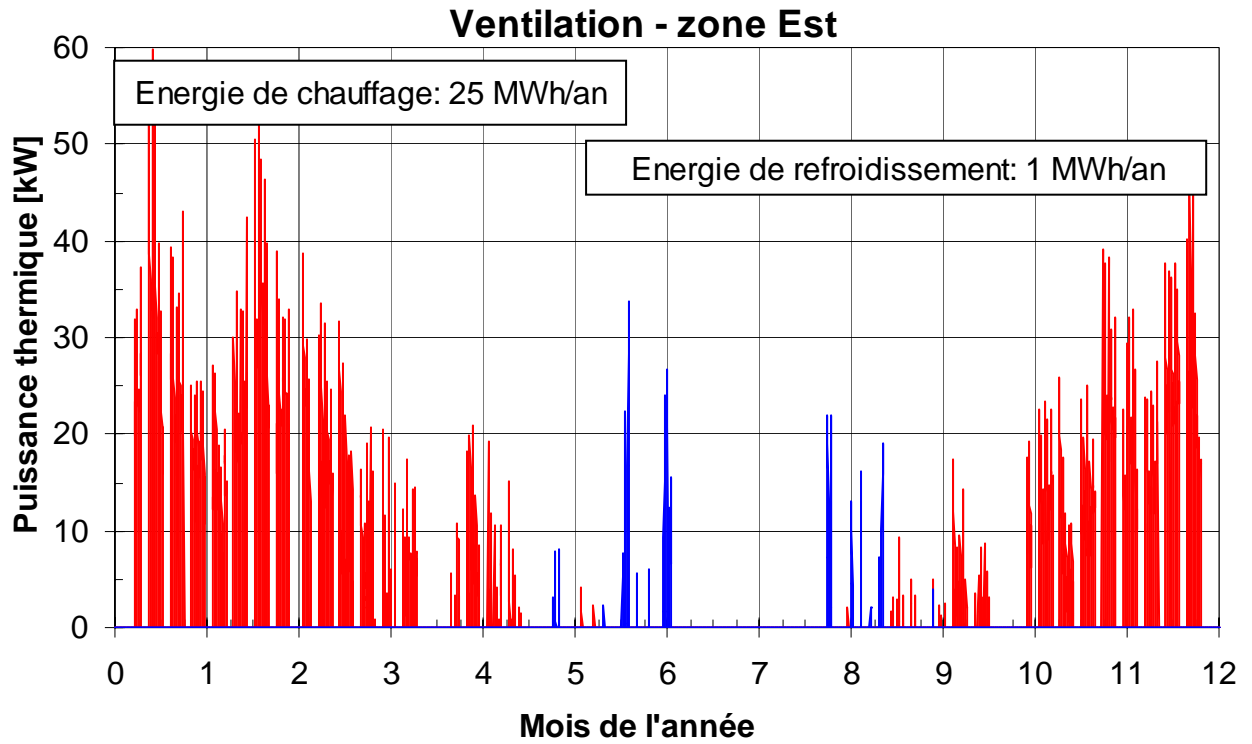
## Zone Centrale – dalles actives



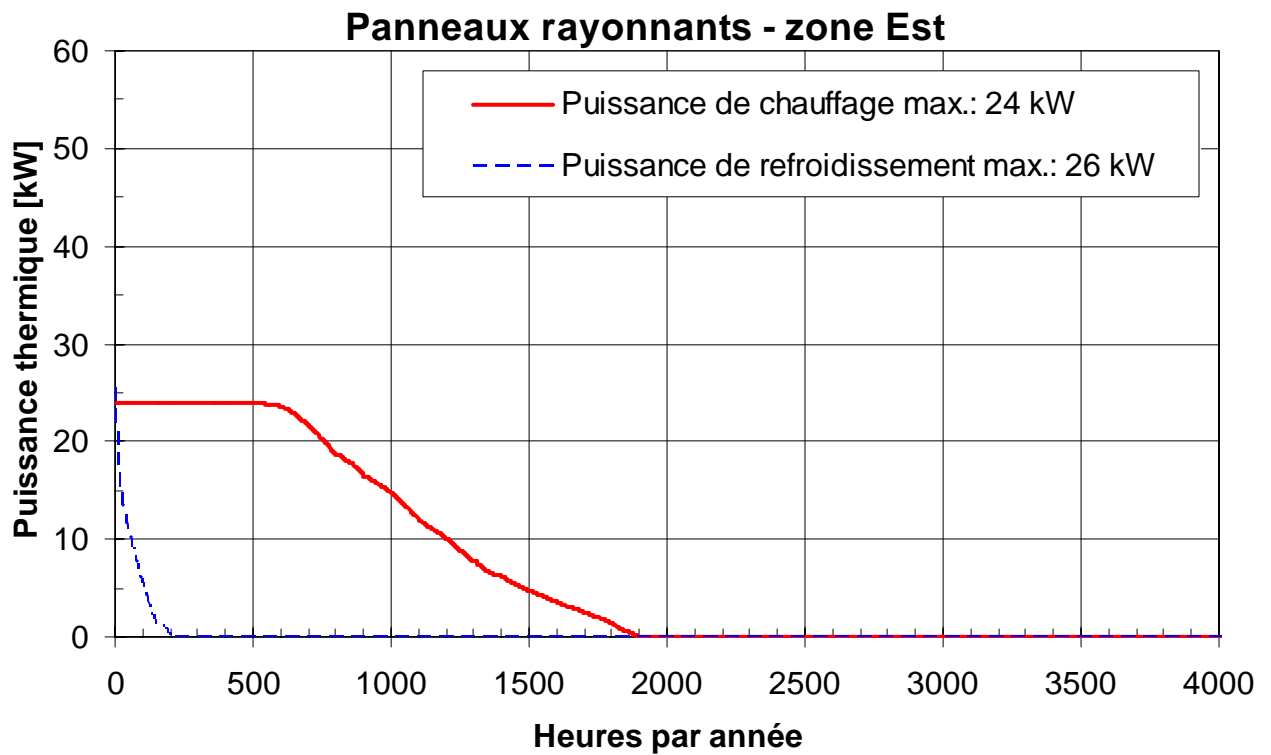
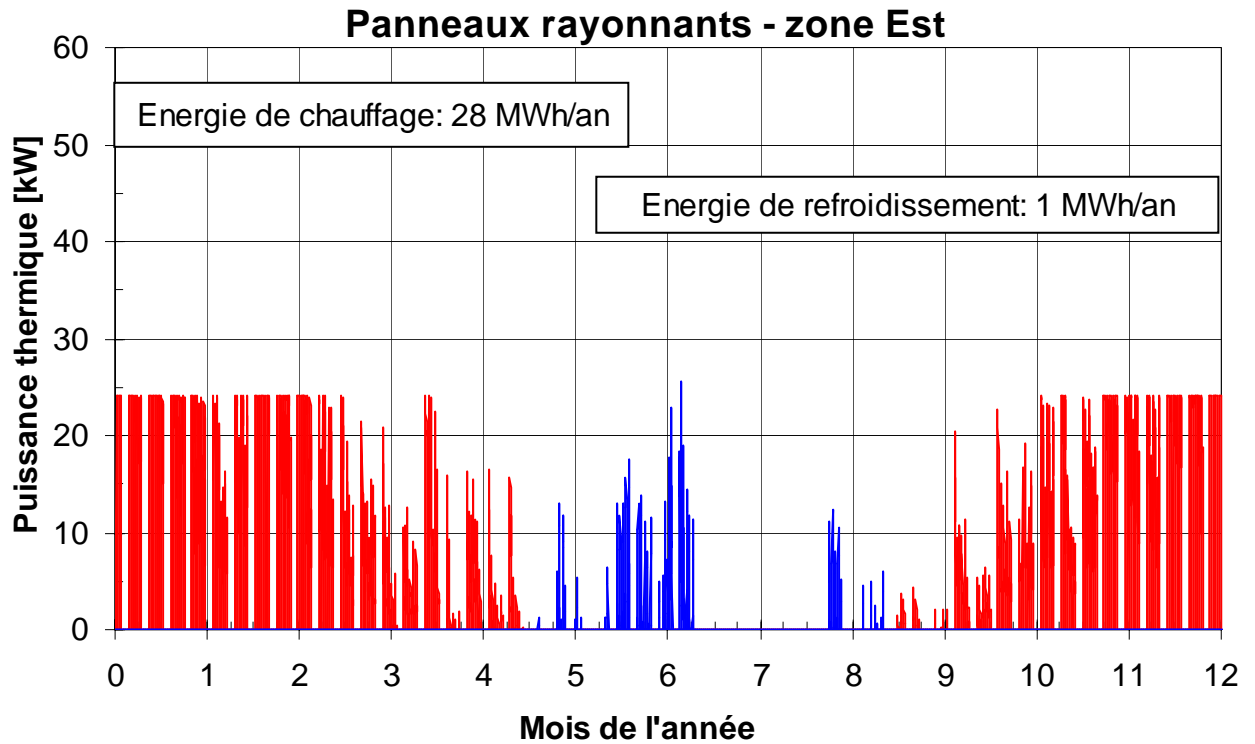
## Zone Centrale – total



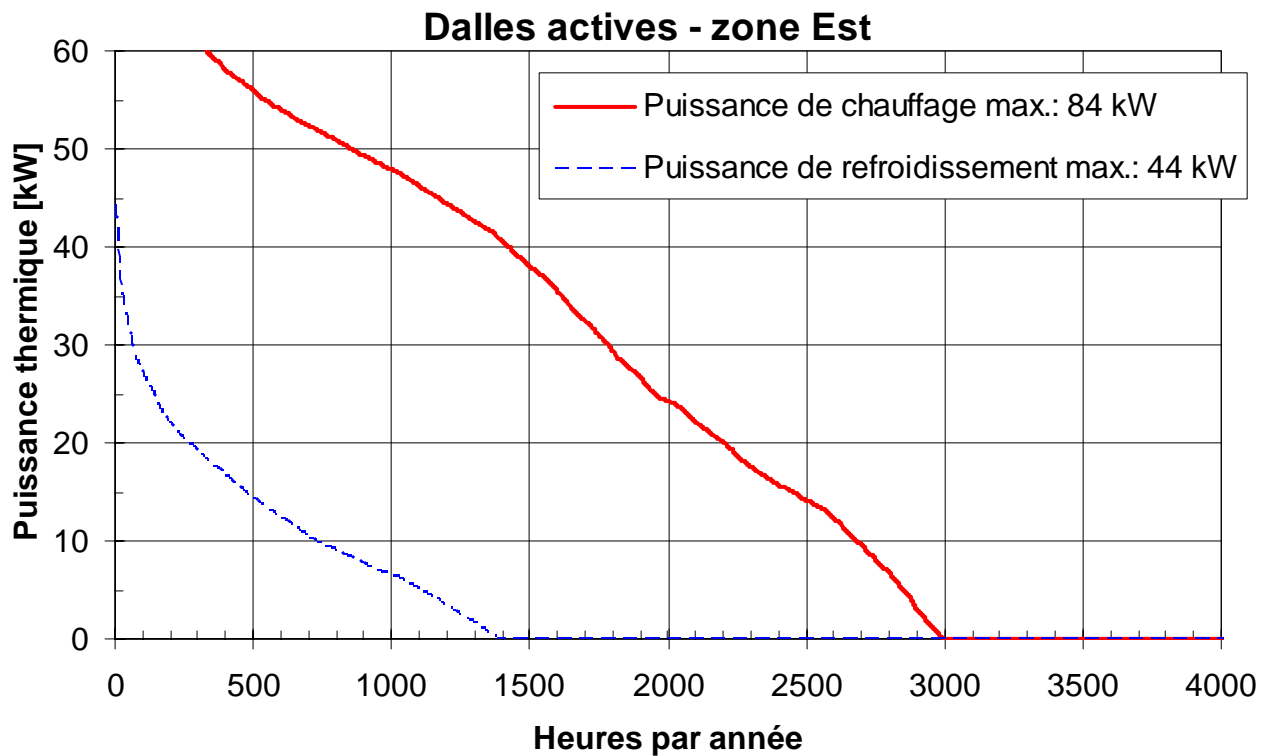
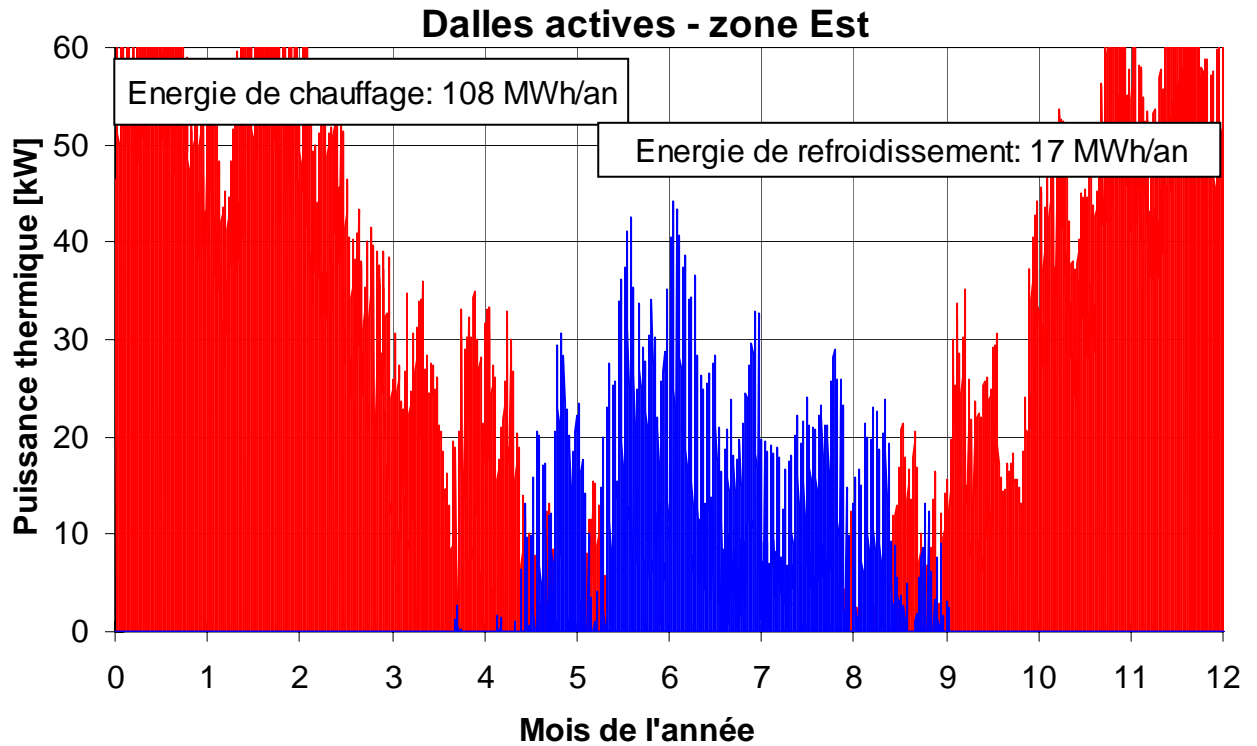
## Zone Est - ventilation



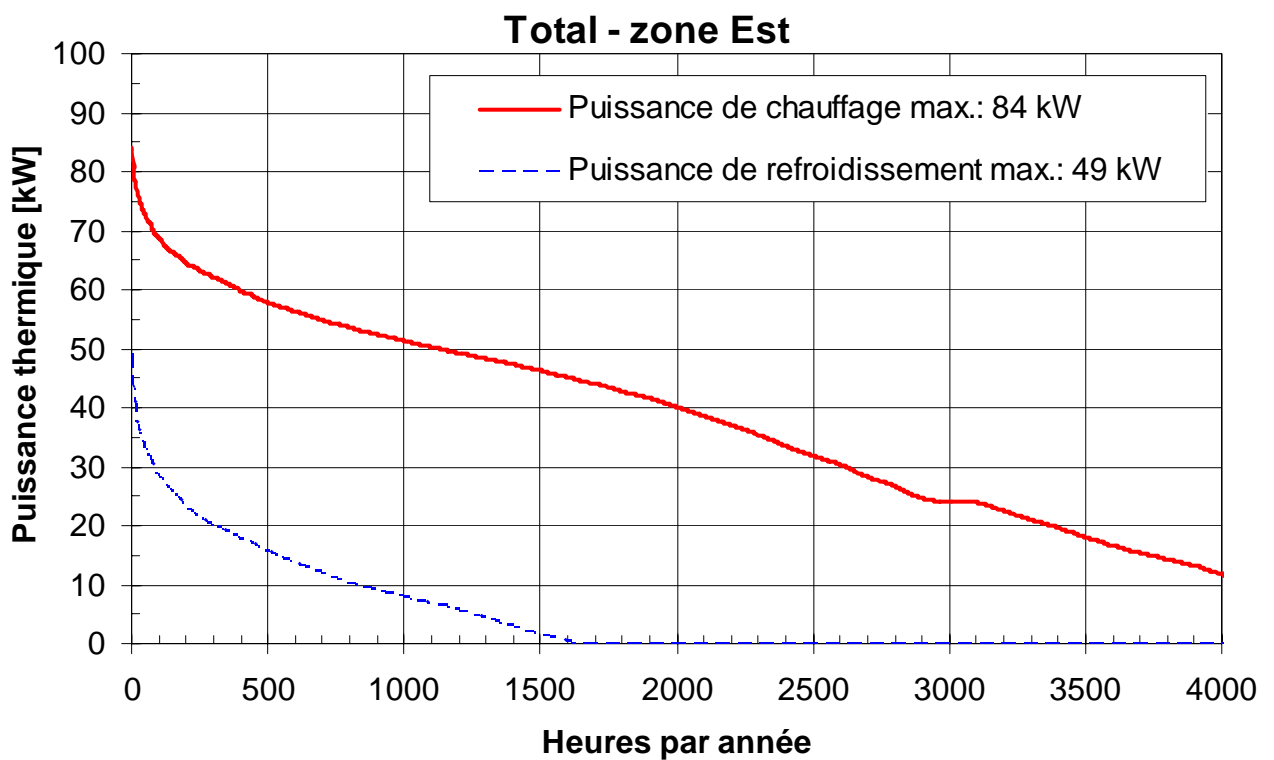
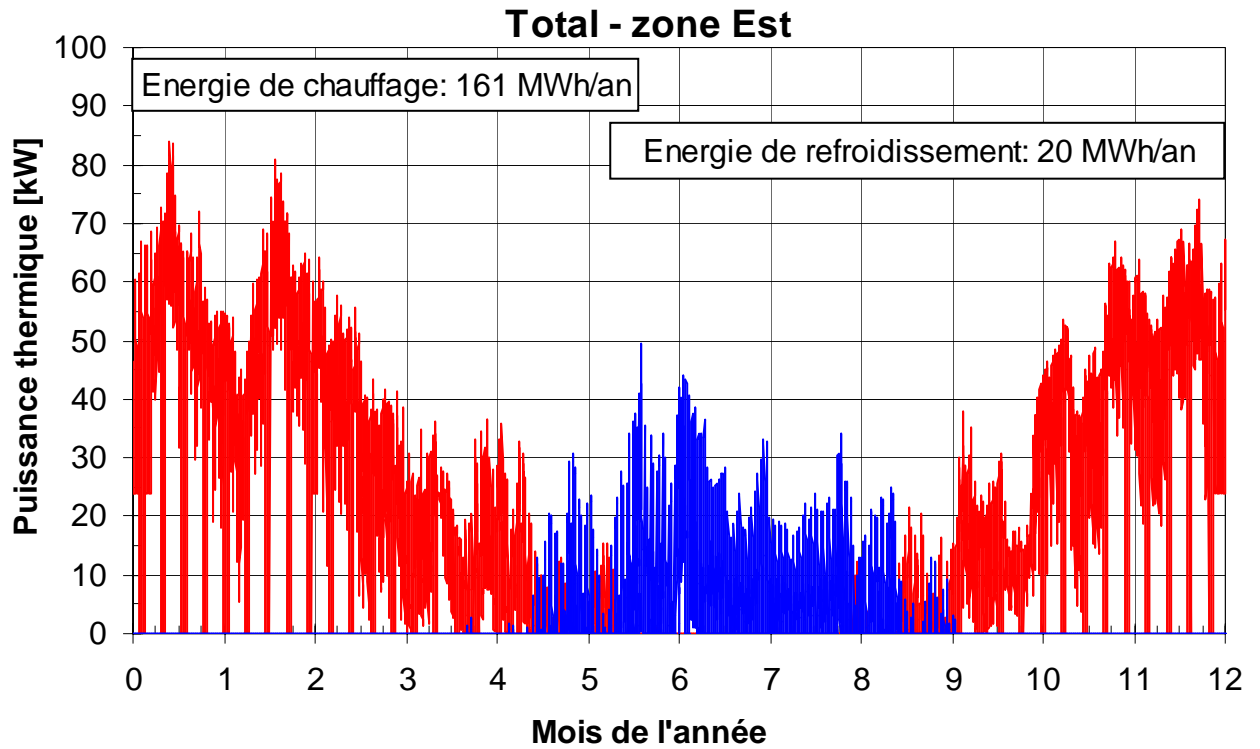
## Zone Est – panneaux rayonnants



## Zone Est – dalles actives

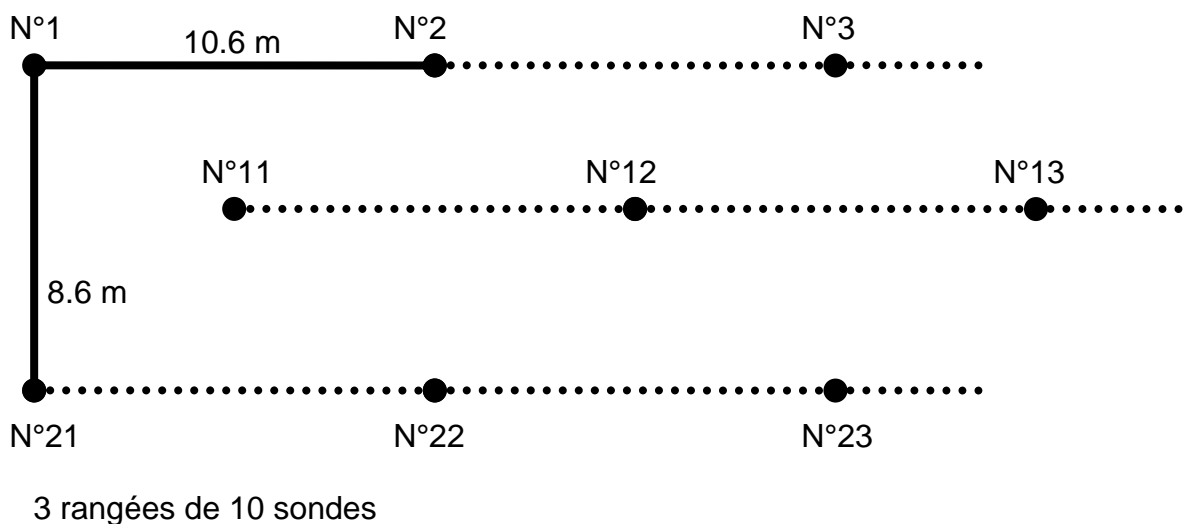


## Zone Est – total



# ANNEXE B

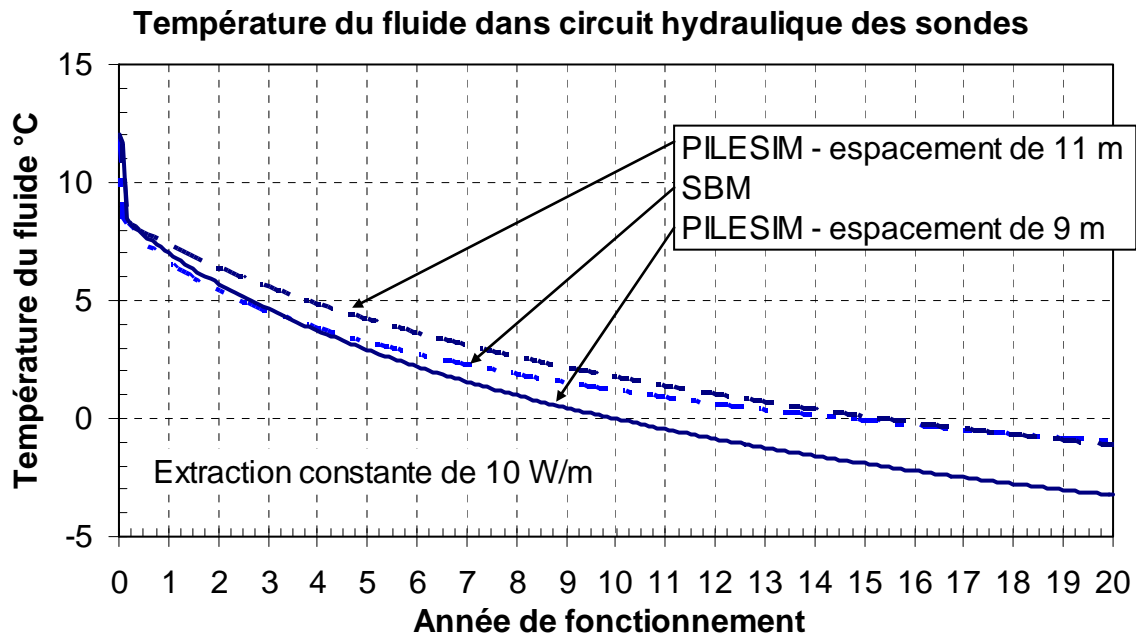
## B- Influence de l'arrangement spatial des sondes géothermiques



Arrangement prévu pour les 3 rangées de sondes géothermiques sous le garage de l'École des Métiers de Fribourg.

L'espacement en x est supérieur à 9 m, mais l'espacement en y est inférieur. En revanche, les sondes sont placées dans une configuration allongée (env. 100m x 10m). Les calculs effectués et présentés dans cette annexe permettent de dire si l'arrangement prévu pour les sondes est compatible avec les simulations effectuées avec PILESIM.

L'arrangement prévu des sondes géothermiques est calculé avec le programme SBM (Es-kilson, 1986). Une puissance constante de 10W/m est extraite pendant 20 ans et l'évolution de la température du fluide circulant dans les sondes est comparée à celle qui est obtenue avec PILESIM (Pahud, 1999), utilisé dans les mêmes conditions et avec les mêmes paramètres.



A moyen terme (i.e. jusqu'à 5 ans), l'arrangement prévu est compatible avec le dimensionnement obtenu avec le programme PILESIM en utilisant l'espacement recommandé de 9 m entre les sondes. Au-delà de 5 ans, les calculs effectués avec PILESIM sont plus pessimistes, ce qui donne une sécurité supplémentaire pour la prise en compte des effets à long terme.

A long terme (après 20 ans de fonctionnement), l'espacement équivalent dans PILESIM devrait être d'au moins 11m pour reproduire les effets à long terme induits par l'arrangement prévu pour les sondes.

La disposition prévue pour les sondes sous le parking est donc tout à fait compatible avec les calculs de dimensionnement effectués avec PILESIM.

Eskilson P. (1986) Superposition Borehole Model. Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

Pahud D. (1999) PILESIM - LASSEN. Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers. User Manual. Swiss Federal Office of Energy, Switzerland.