

# Enjeux de la climatisation et tour d'horizon de possibles alternatives

Pierre Hollmuller

# Enjeux de la climatisation et tour d'horizon de possibles alternatives

---

## Plan de l'exposé:

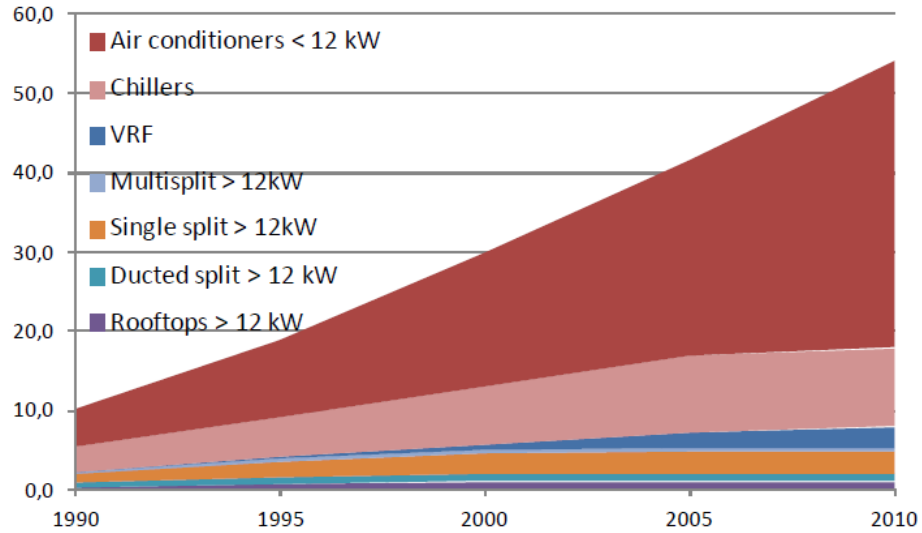
- 1) Enjeux de la climatisation à Genève
- 2) Contrainte météo et confort d'été
- 3) Appareils portables de refroidissement par cycle frigorifique et par évaporation (étude de cas)
- 4) Réseaux hydro-thermique GLN (étude de cas)
- 5) Conclusions

---

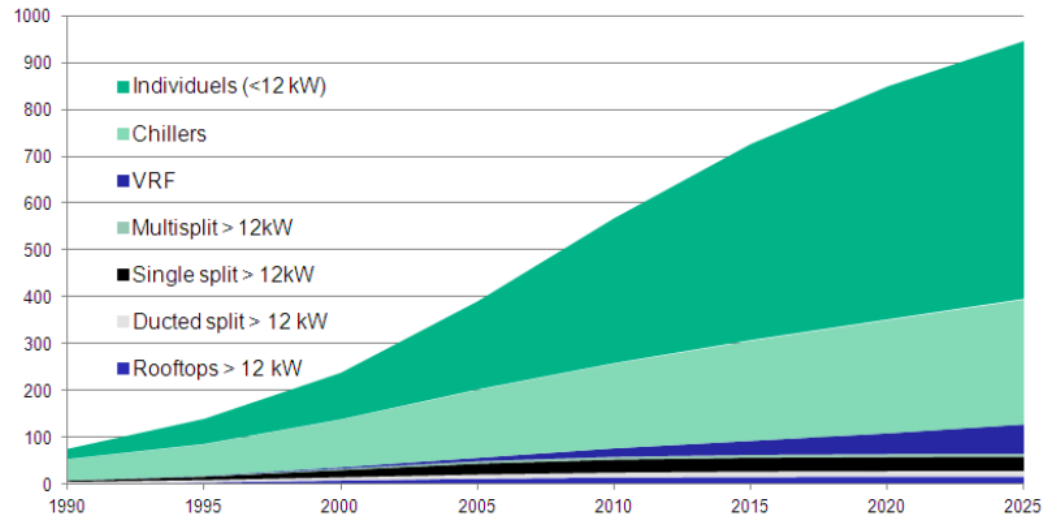
## Enjeux de la climatisation à Genève

# Marché européen de la climatisation

## EU27 annual sales (GW cooling)



## EU27 total stock (GW cooling)



Source: P. Rivière, Mines/ParisTech

# Energie finale pour besoins thermique, Genève

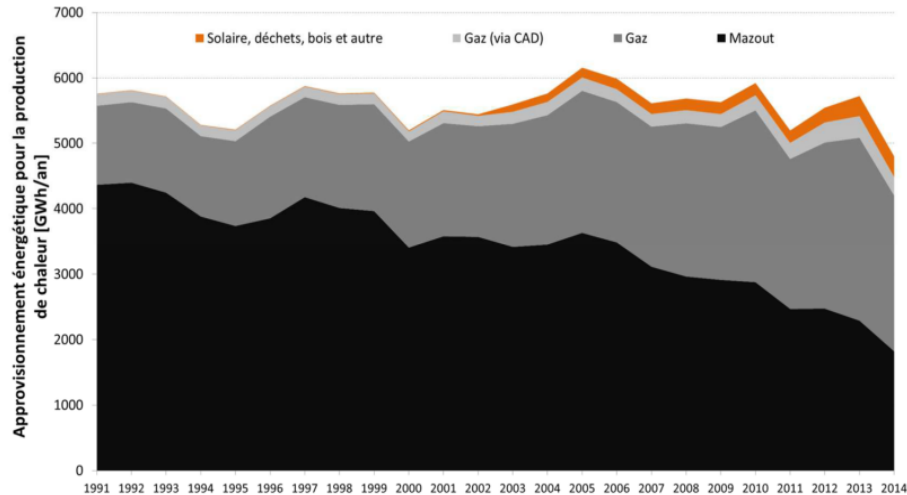
## Chauffage

- Total: env. 5'600 GWh/an
- Stabilité / Réduction
- Substitution mazout/gaz (+ renouvelables)

## Climatisation

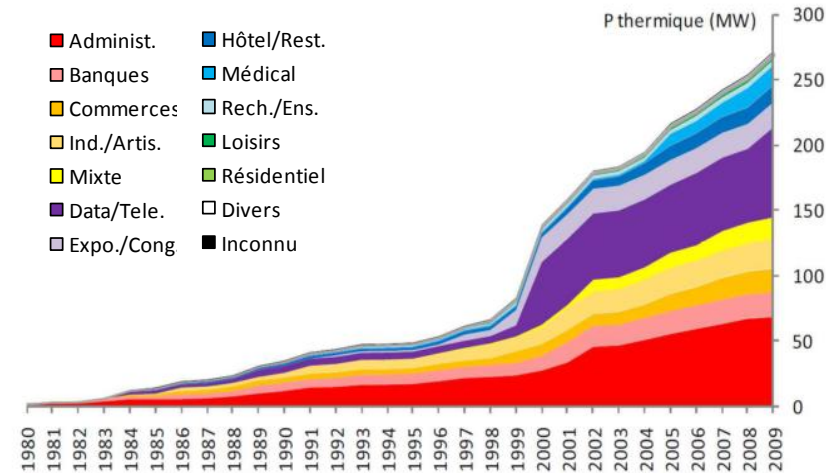
- Total: env. 220 GWh<sub>el</sub>/an (env. 600 GWh<sub>th</sub>/an)
- 60% pour les datacenters
- Augmentation: ~ 10 GWh<sub>el</sub>/an

### Evolution du marché de la chaleur



Quiquerez et al. (2016). Données source: OCSTAT

### Evolution du marché de la climatisation



Hollmuller et al. (2012). Données source: OCEN

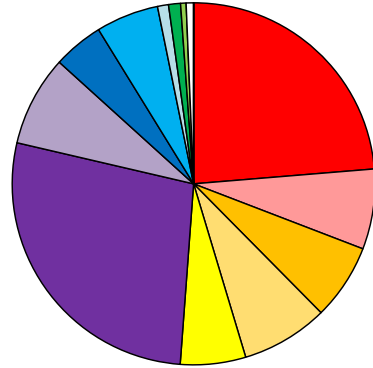
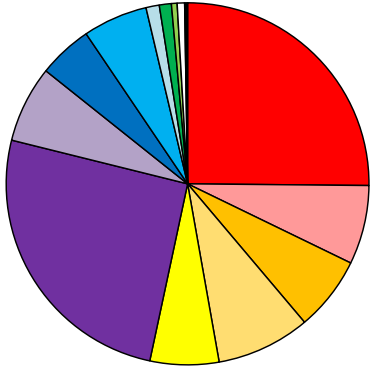
# Enjeux de la climatisation à Genève

## Requêtes de climatisation (Genève 1980 – 2009)

Puissance thermique: 272 MW<sub>th</sub>

Puissance électrique: 91 MW<sub>el</sub>

(18% de la pointe totale)

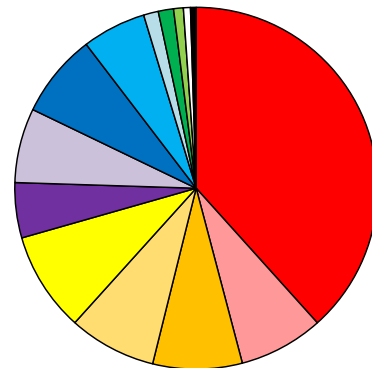
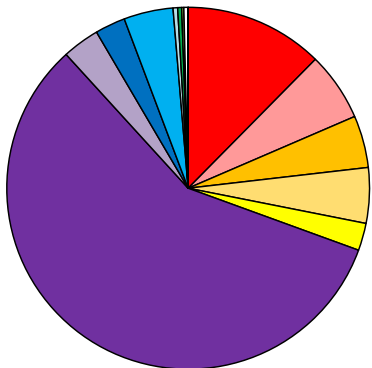


Energie électrique: 225 GWh<sub>el</sub>

(8% de la demande totale)

Surface climatisée: 1.8 mio m<sup>2</sup>

(10% des locaux non résidentiels)

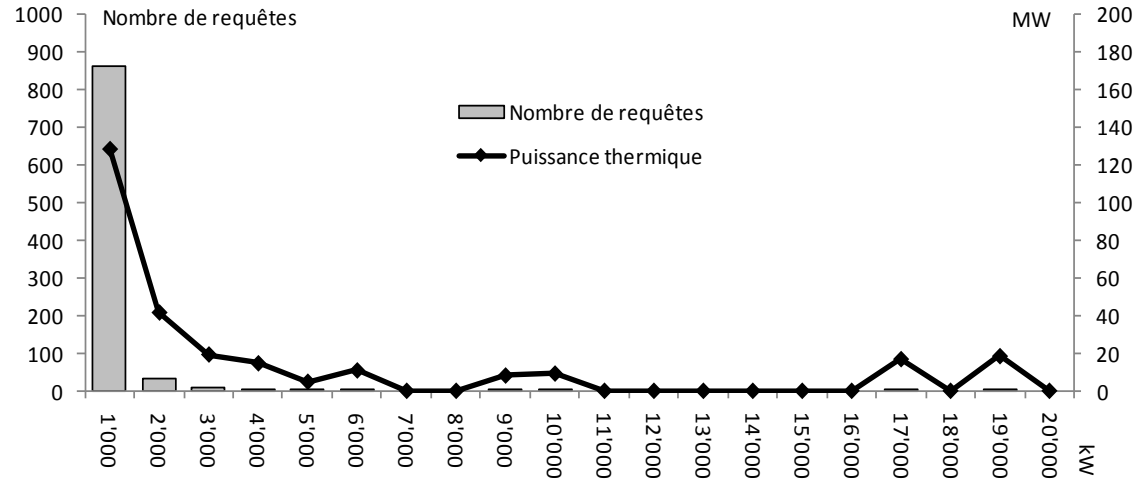


- Administ.
- Banques
- Commerces
- Ind./Artis.
- Mixte
- Data/Tele.
- Expo./Cong.
- Hôtel/Rest.
- Médical
- Rech./Ens.
- Loisirs
- Résidentiel
- Divers
- Inconnu

# Enjeux de la climatisation à Genève

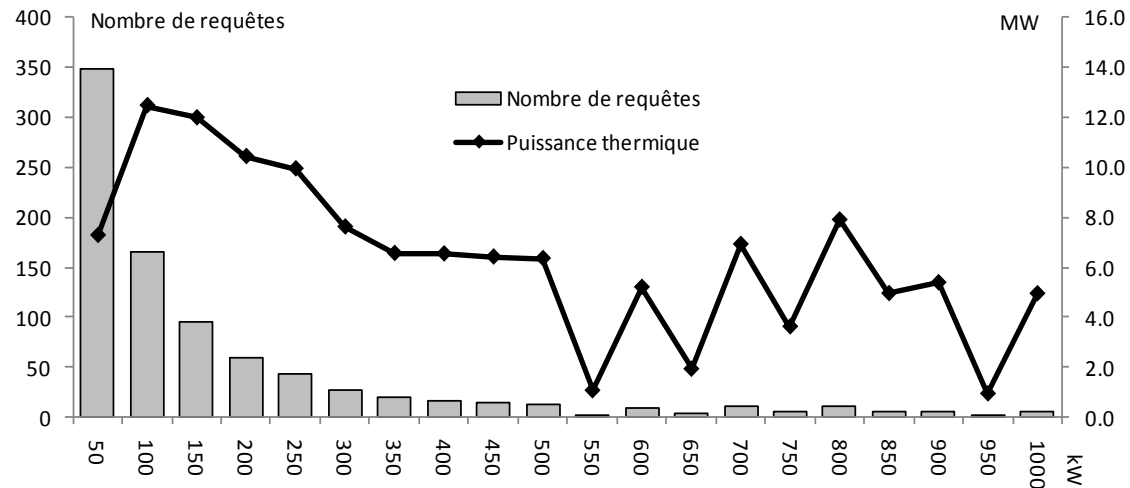
## Taille des installations

### Total



kW <sub>th</sub>	Nb. ins.	Puiss.
< 50	38%	3%
50 - 1000	56%	45%
> 1000	5%	53%

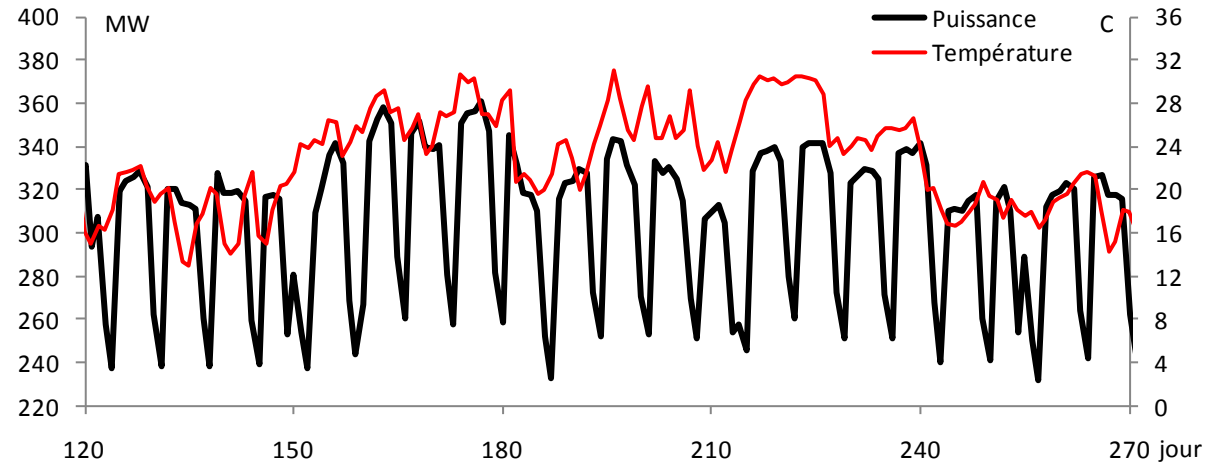
### Zoom installations < 1000 kW



# Enjeux de la climatisation à Genève

---

Courbe de charge électrique et température météo  
(moyennes journalières, mai – septembre 2003)



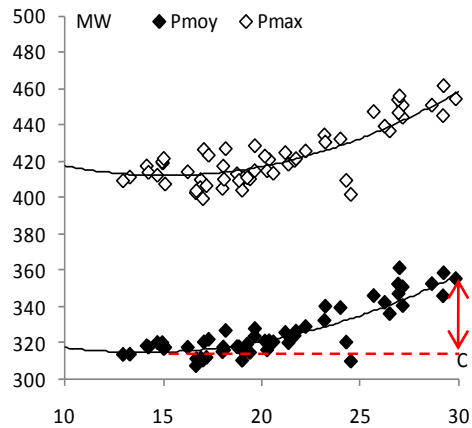


# Enjeux de la climatisation à Genève / approche top-down

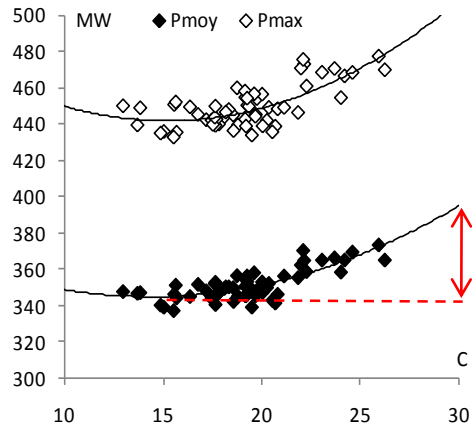
## Puissance électrique pour climatisation de confort (hors datacenters)

Charge électrique en fonction de la température (été, valeurs journalières)

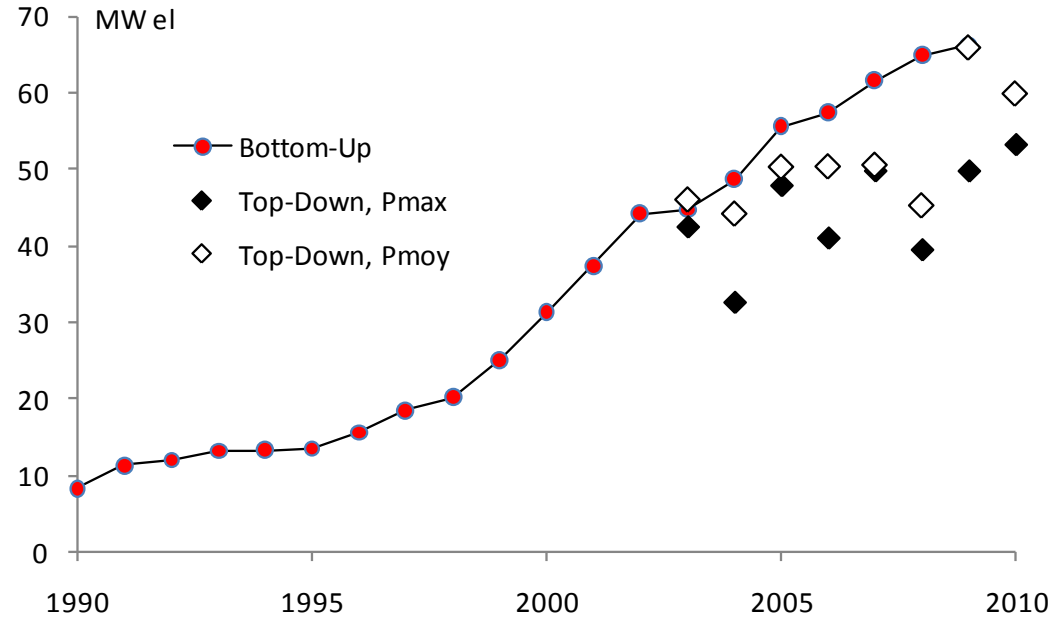
2003



2010



Puissance nominale requêtes de clim. et puissance électrique de pointe (à 30°C)

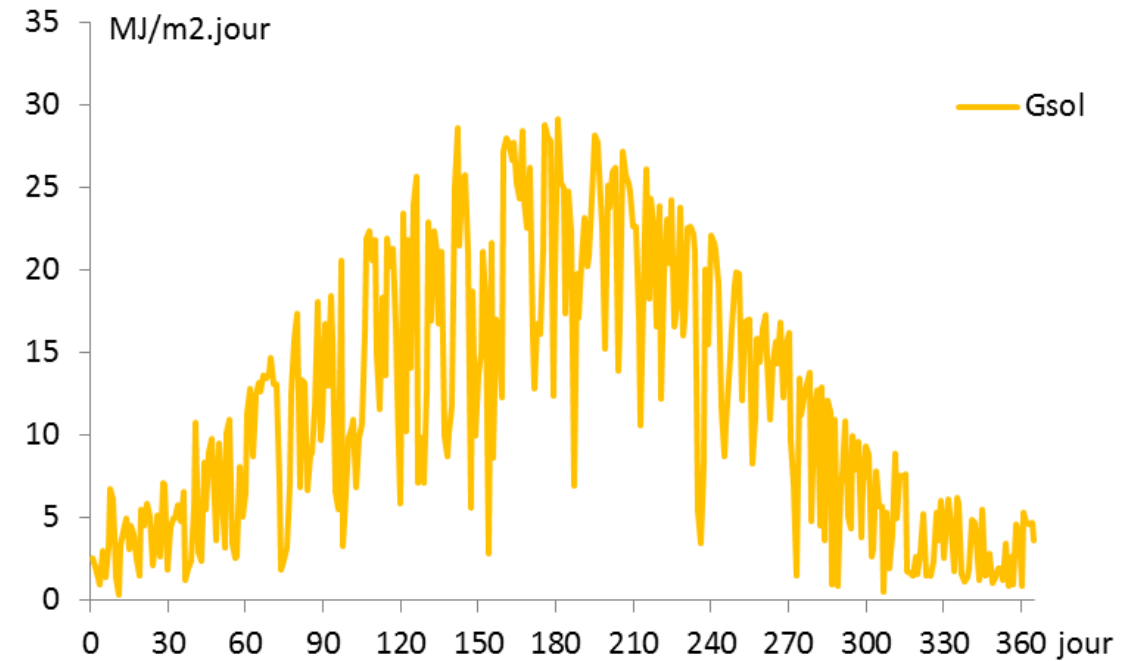
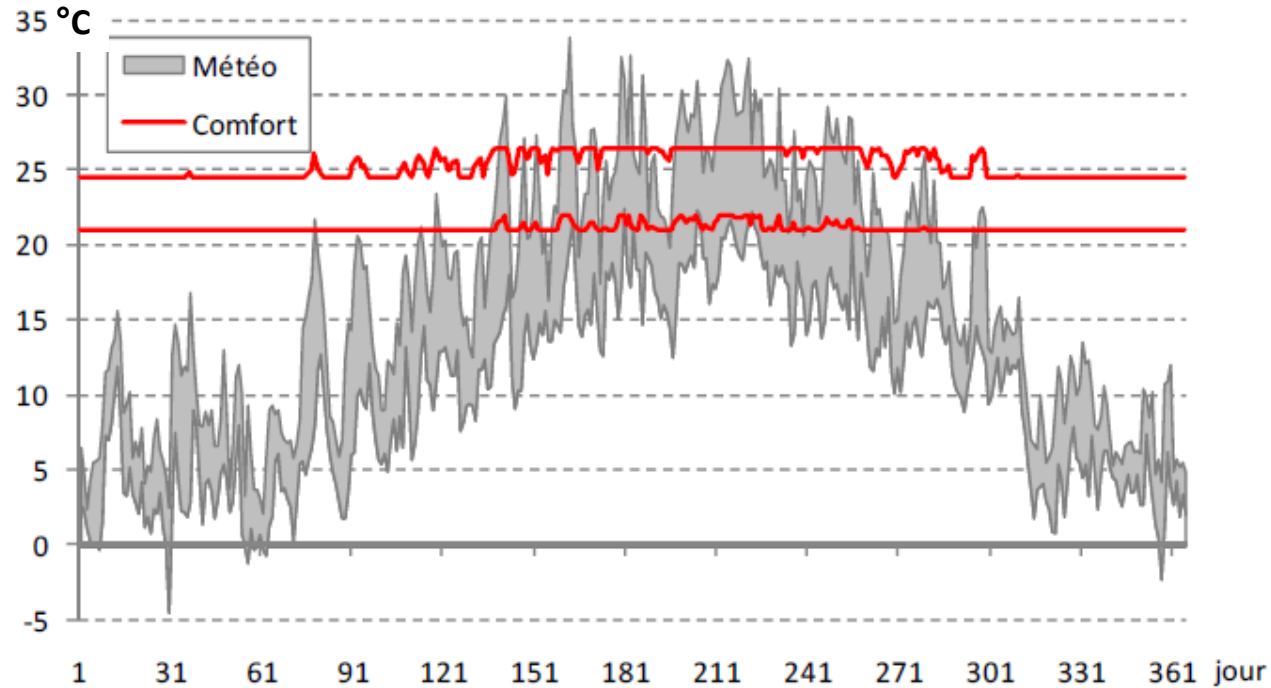


Données source:  
SIG (électricité) et UNIGE (météo)

---

## Contrainte météo et confort d'été

# Besoins thermiques et contrainte météo



## Hiver (chauffage):

- Contrainte saisonnière, forte
- Facteur météo prépondérant: température
- Défi: limiter les pertes thermiques (enveloppe + ventilation)
- Dimensionnement avec calcul statique généralement suffisant → SIA 380/1

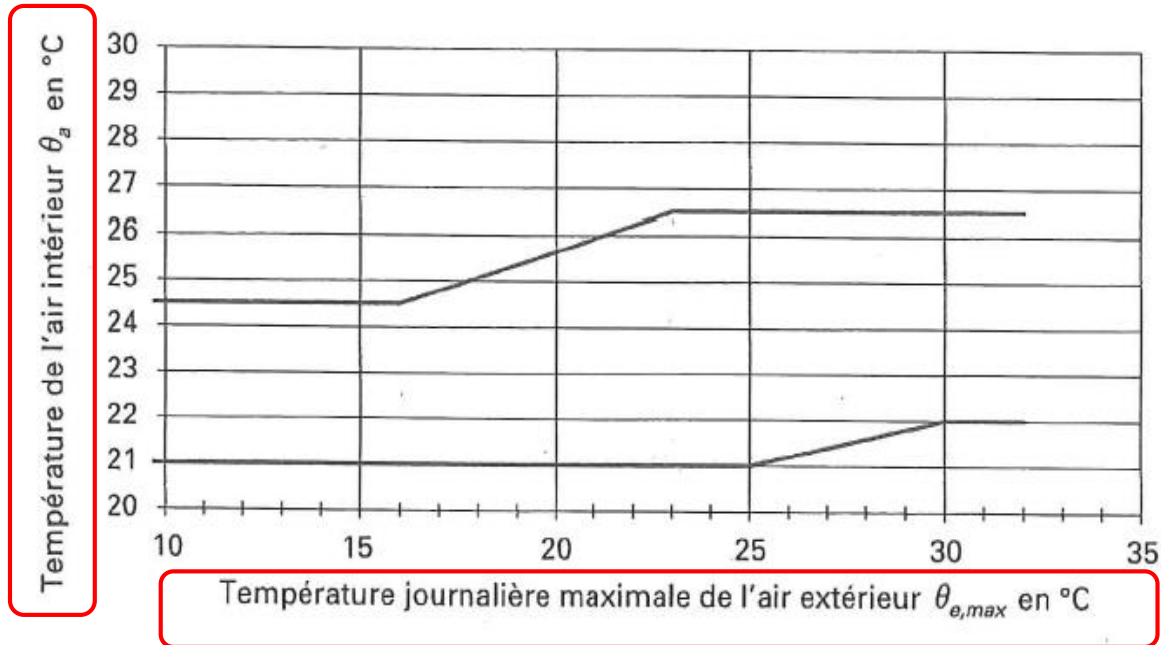
## Eté (climatisation):

- Contrainte journalière, +/- marquée
- Facteur météo prépondérant: ensoleillement
- Défi: limiter les gains solaires (et internes)
- Dimensionnement avec calcul dynamique (effet d'inertie du bâtiment) → modèles de simulation numérique

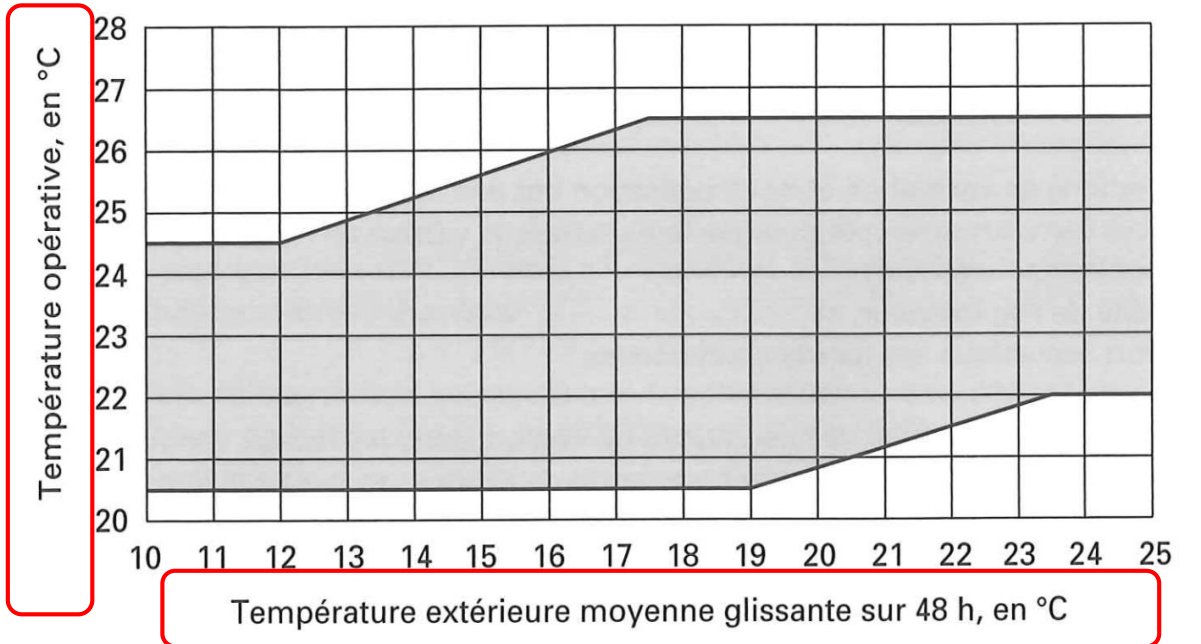
# Confort d'été

Plage admissible pour la température dans les espaces d'habitation ou administratifs, lorsqu'il sont chauffés, refroidis ou ventilés mécaniquement

SIA 382/1 (2007)



SIA 382/1 (2014)



→ Egalement utiliser comme base pour la preuve du besoin de climatisation

# Confort d'été

EN 15251 (2007): confort adaptif

Plage de température admissible fonction de:

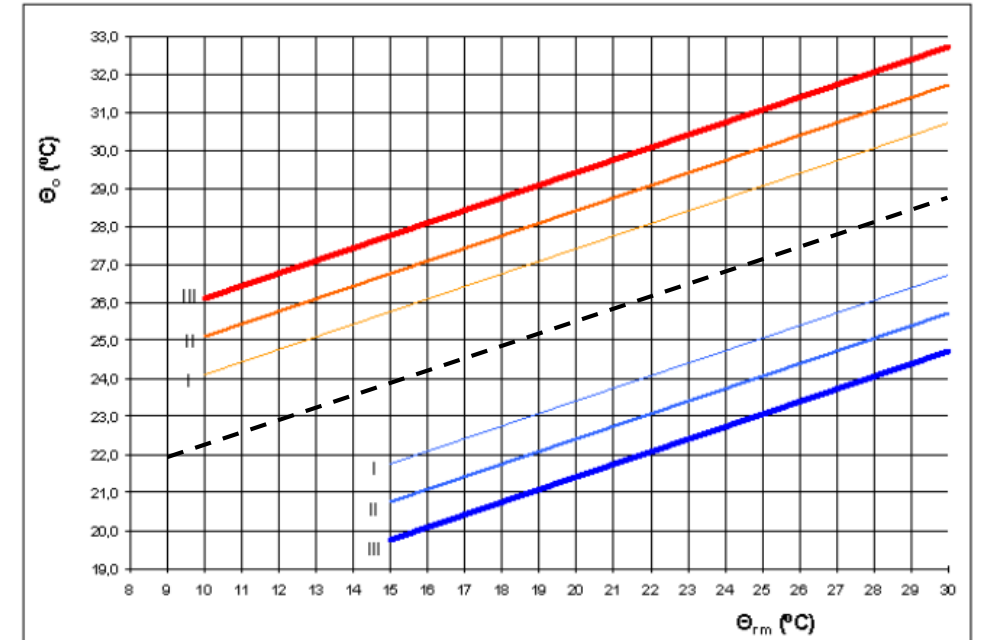
- $\Theta_{rm}$ : température moyenne glissante des 7 derniers jours
- Plage admissible autour de  $\Theta_{rm}$  fonction du type de bâtiment

$$\Theta_{rm} = (\Theta_{ed-1} + 0,8 \Theta_{ed-2} + 0,6 \Theta_{ed-3} + 0,5 \Theta_{ed-4} + 0,4 \Theta_{ed-5} + 0,3 \Theta_{ed-6} + 0,2 \Theta_{ed-7})/3,8$$

$\Theta_{rm}$  est la température moyenne glissante du jour ;

$\Theta_{ed-1}$  est la température moyenne journalière extérieure de la veille ;

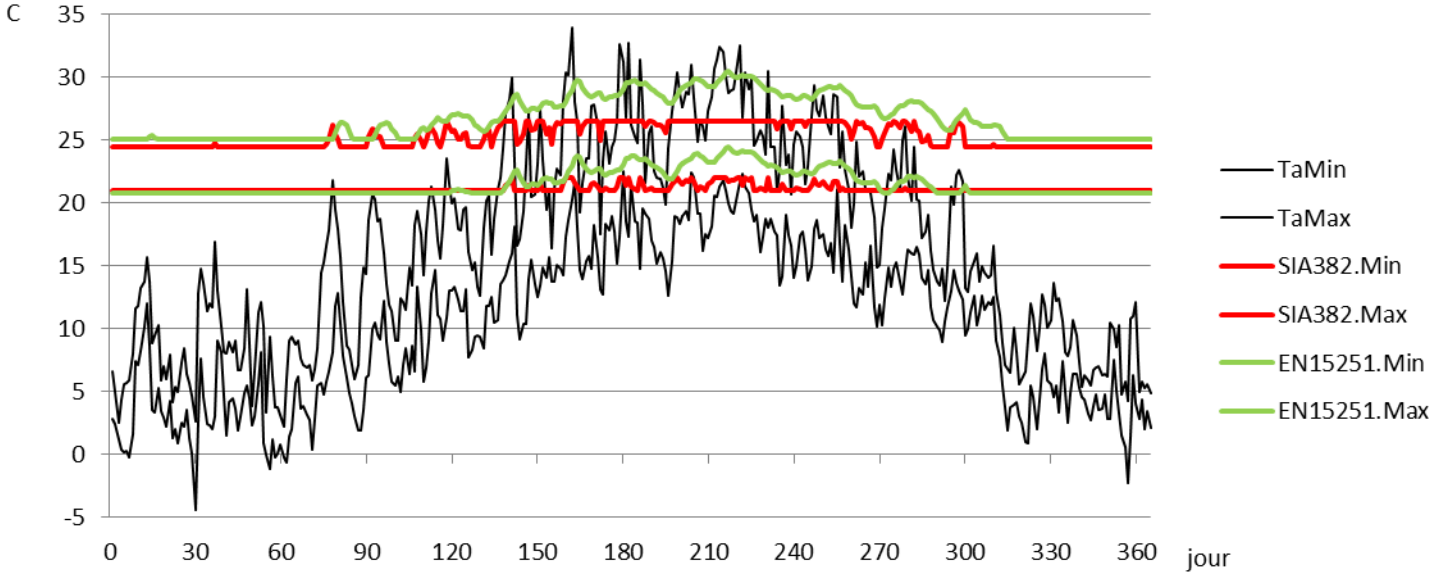
$\Theta_{ed-2}$  est la température moyenne journalière extérieure de l'avant-veille etc.. ;



Catégorie	Explication
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus. Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

# Confort d'été

## SIA382 versus EN 15251 (Type 2)

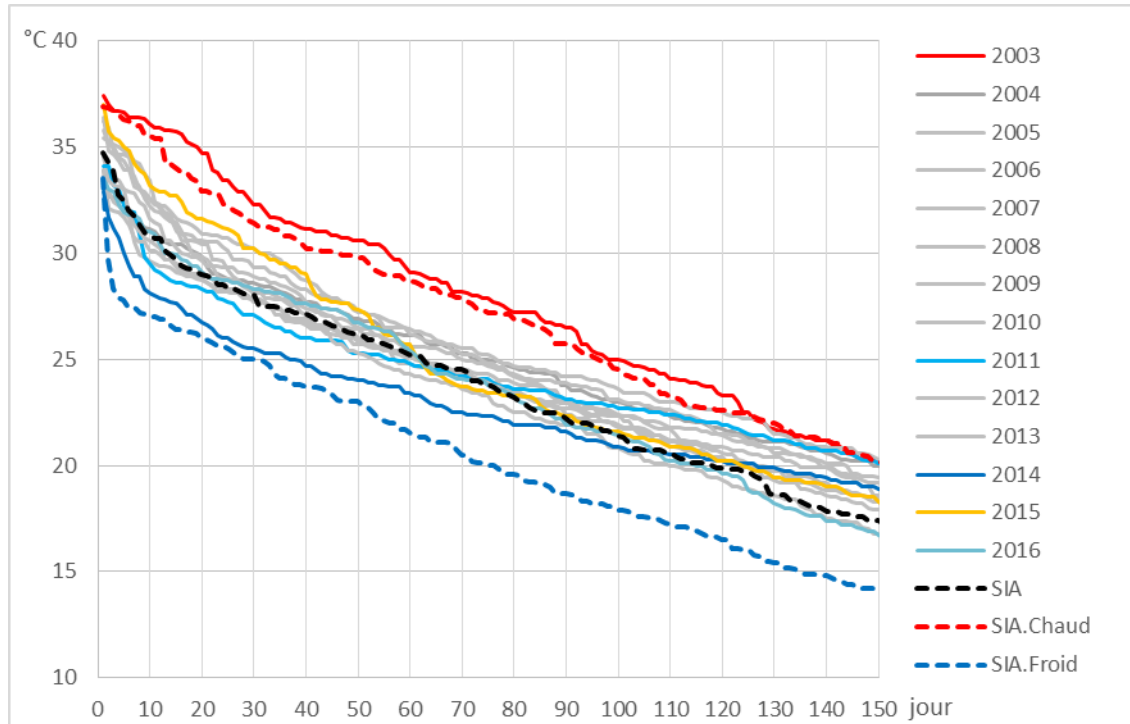


# Contrainte météo

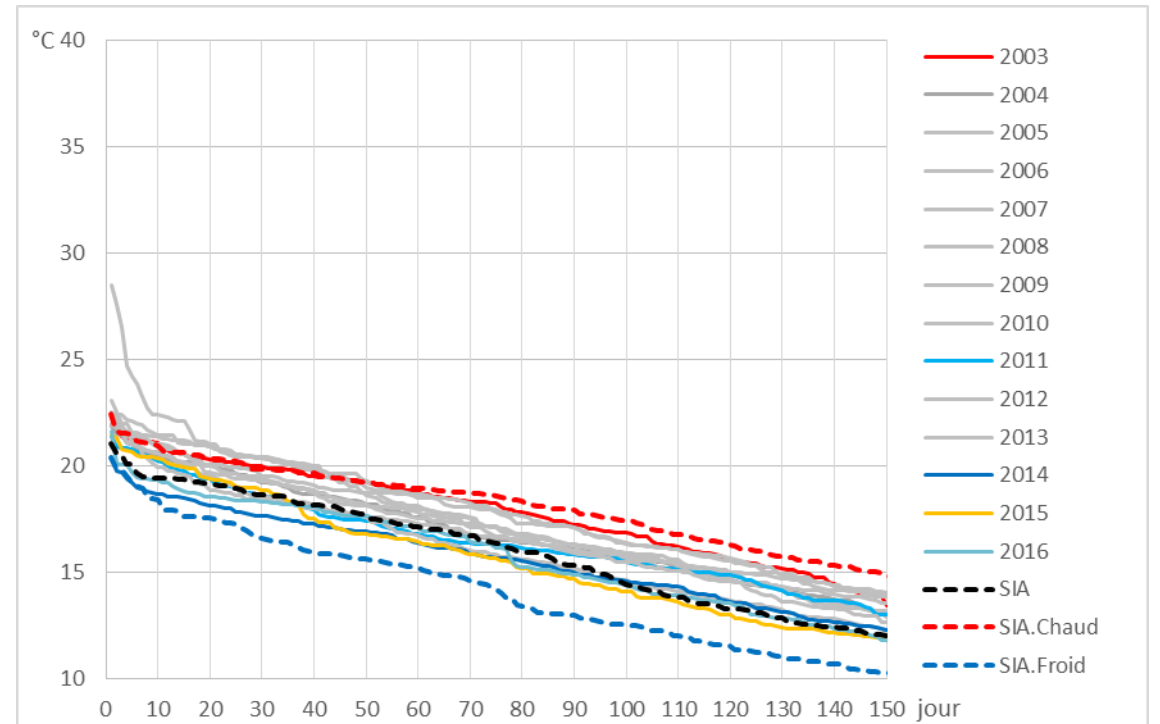
## Température météo:

- Mesures UNIGE 2003 – 2016 ([www.unige.ch/energie/fr/activites/meteo](http://www.unige.ch/energie/fr/activites/meteo))
- Valeurs normées SIA 2028)

## Température sèche (max journalier)



## Température humide (max journalier)



---

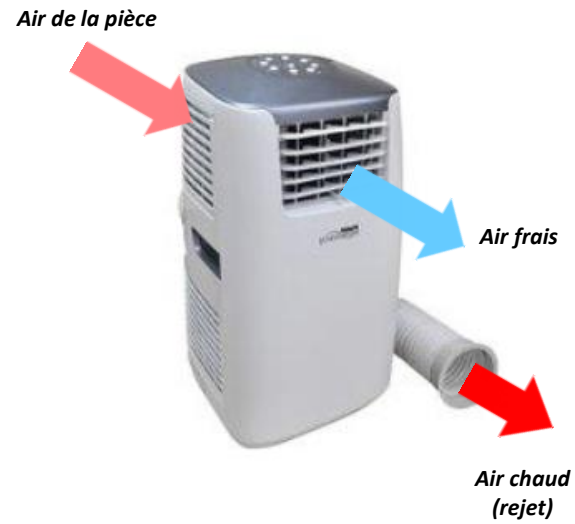
Appareils portables de refroidissement  
par cycle frigorifique et par évaporation

Etude de cas sur 14 places de travail  
d'un bâtiment de bureaux à Genève

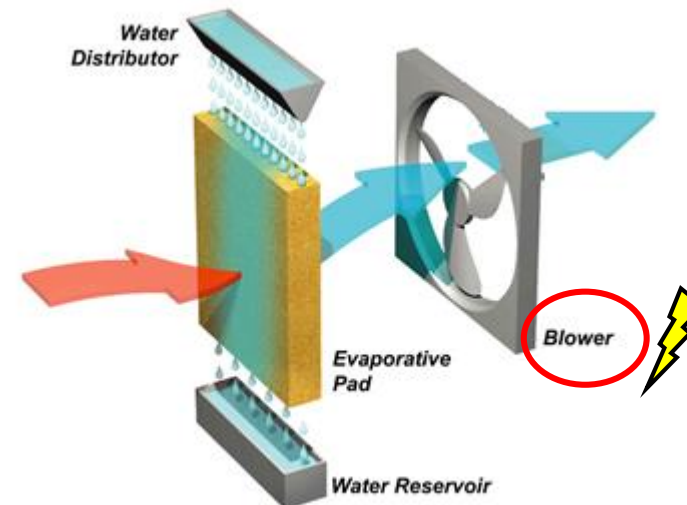
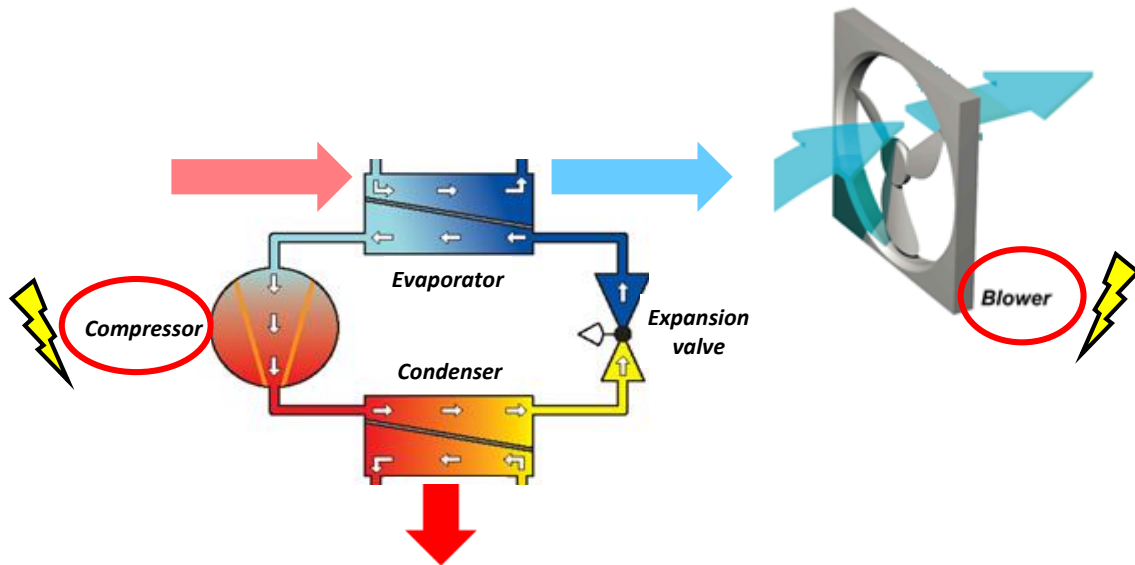
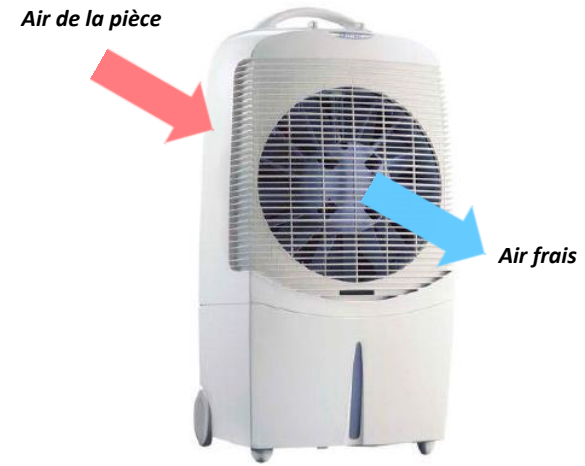


# Appareils portables de refroidissement

Climatiseur (1200 W<sub>el</sub>)

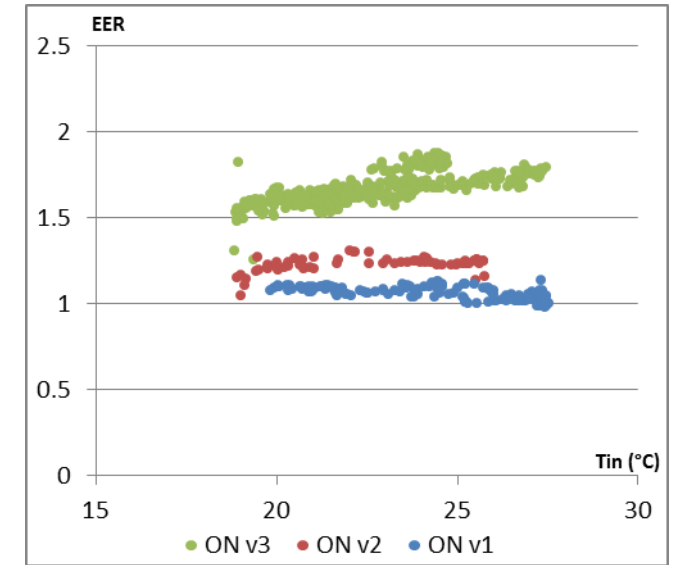
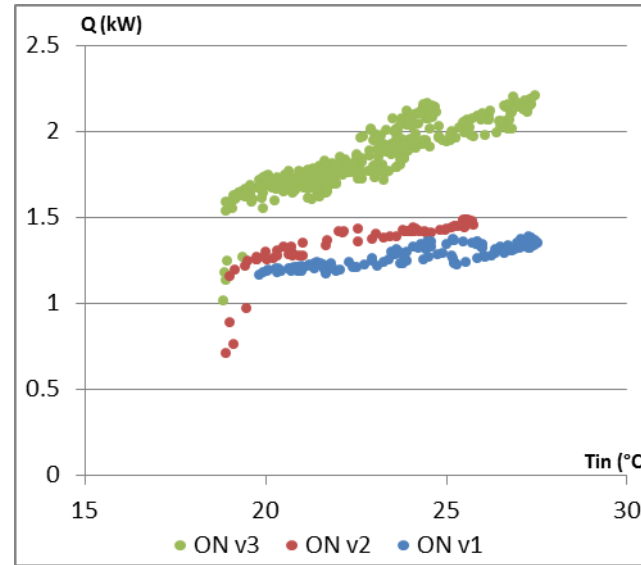
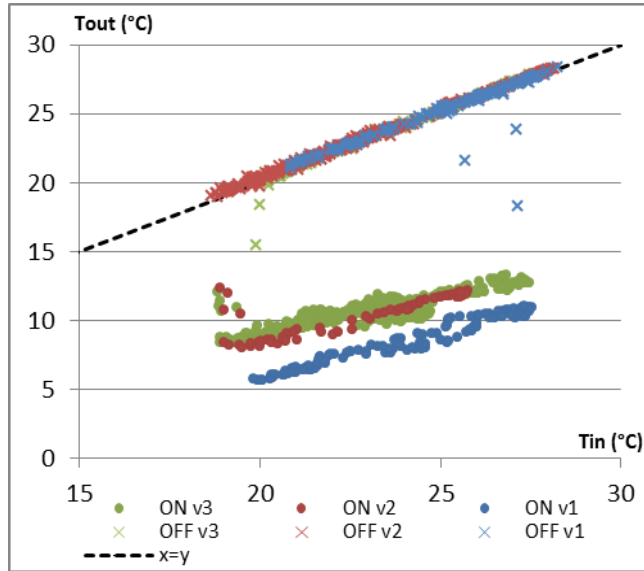


Rafrâchisseur adiabatique (60 W<sub>el</sub>)

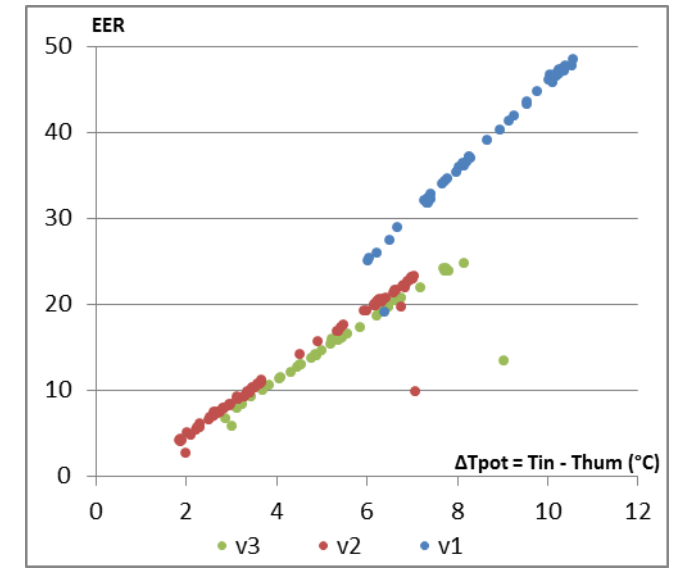
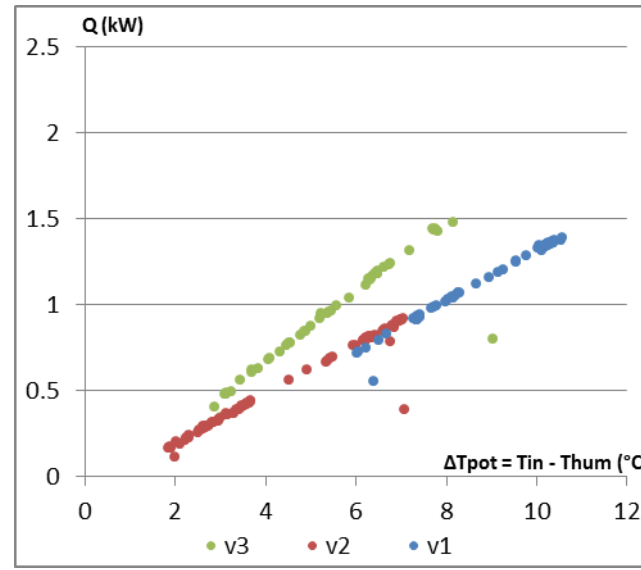
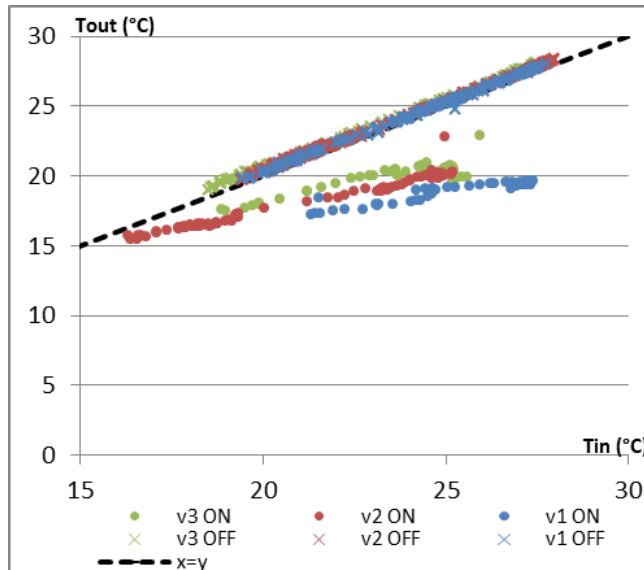


# Appareils portables de refroidissement

Climatiseurs  
1200 W<sub>el</sub>



Rafraîchisseurs  
Adiabatiques  
60 W<sub>el</sub>



# Appareils portables de refroidissement

---

## Etude de cas



Bâtiment de l'Université de Genève, construit en 1963:

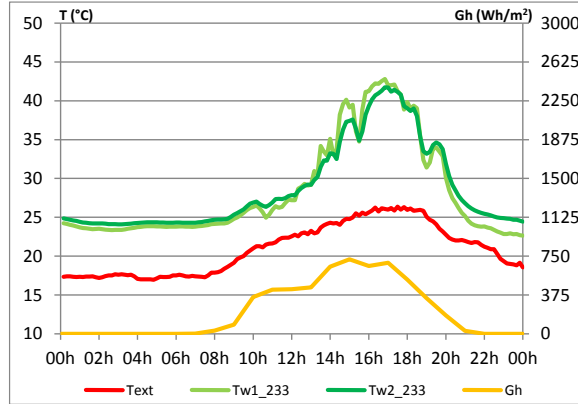
- Réputé pour avoir des hautes températures estivales
- Protections solaires de mauvaise qualité (stores entre vitrages)

Mise à disposition temporaire d'appareils de refroidissement portables:

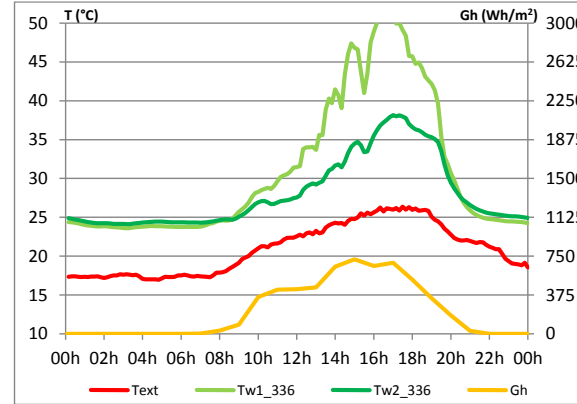
- 4 juillet au 25 septembre 2011
- 7 climatiseurs + 7 adiabatiques (intersion à mi-parcours)
- 162 sondes, avec un pas d'acquisition de 10 minutes
- 1 questionnaire par usager, rempli 4 fois par jour (ressenti thermique sur une échelle de -3 à +3 )
- Questionnaire final

# Usage sur un jour type

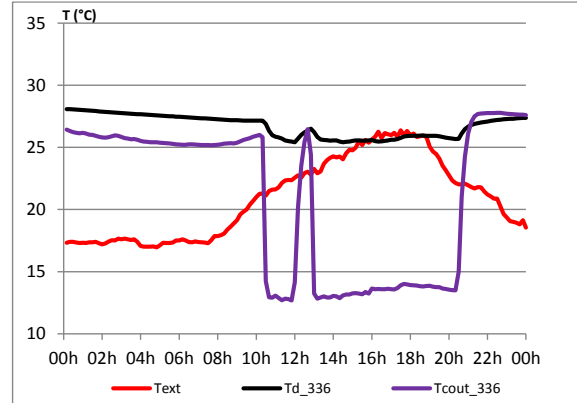
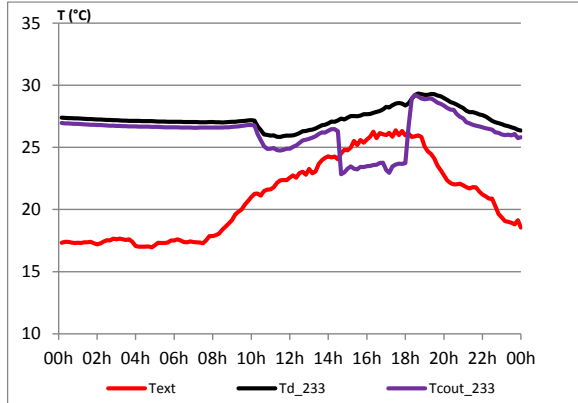
## Rafrâchisseur adiabatique



## Climatiseur



Température extérieure (Text), températures des vitrages (Tw), rayonnement global horizontal (Gh).



Température extérieure (Text), température de la pièce (Td), température de l'air à la sortie de l'appareil de refroidissement (Tcout).

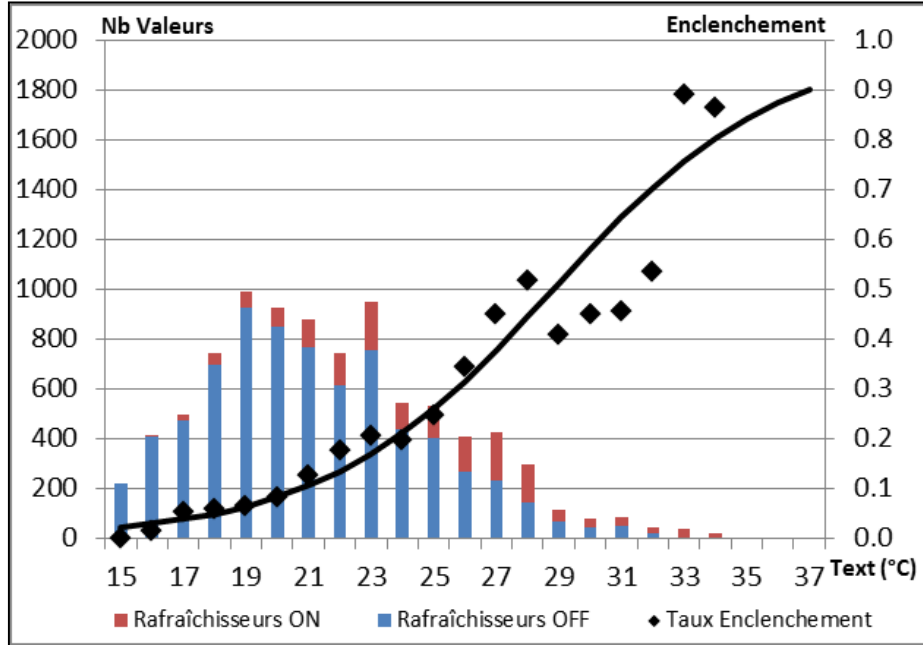
	How do you feel?						
	cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
10:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12:40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
00:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

	How do you feel?						
	cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
10:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20:30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

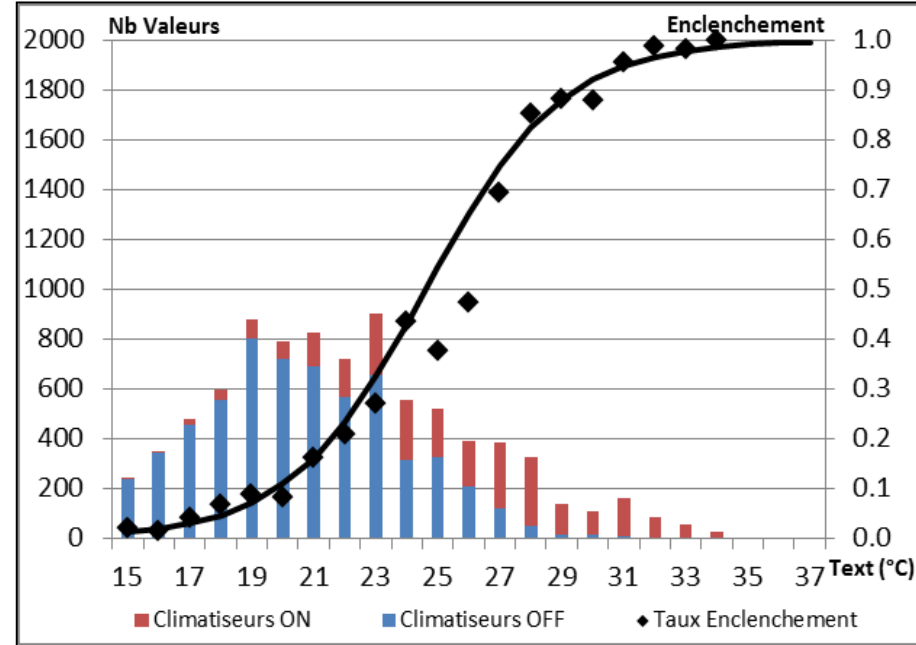
# Usage pendant un été

## Taux d'enclenchement (pendant les heures de présence)

### Rafraîchisseur adiabatique



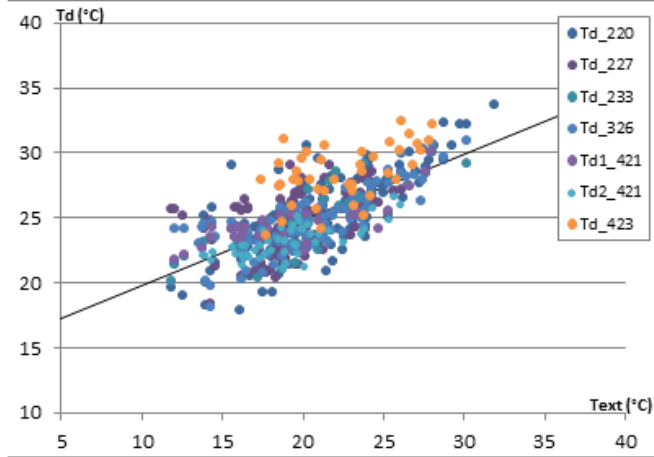
### Climatiseur



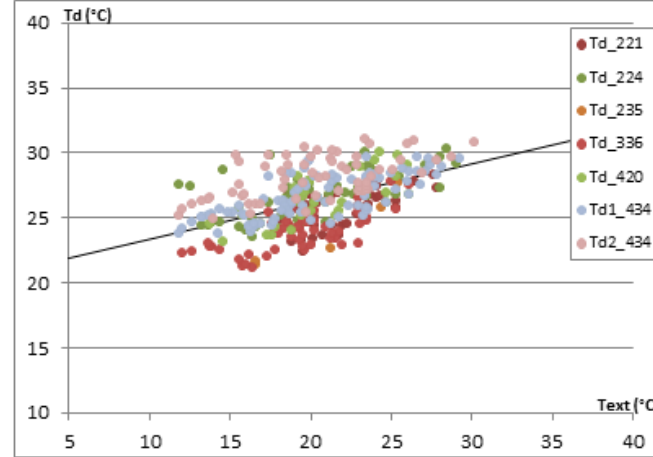
# Performance thermique

Température à la place de travail (valeurs horaires, pendant les heures de présence)

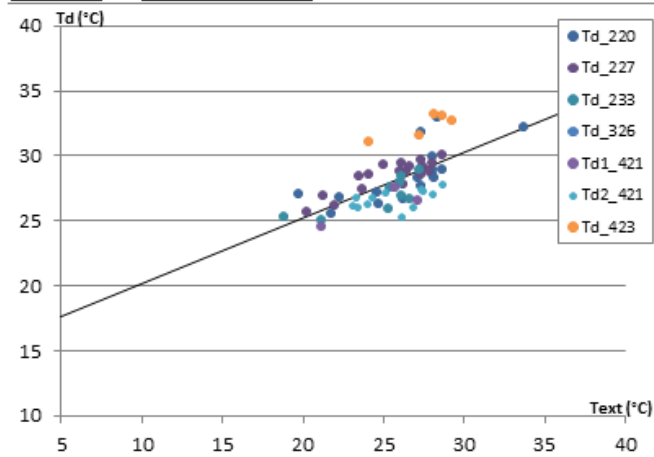
Groupe 1 Adiabatiques OFF



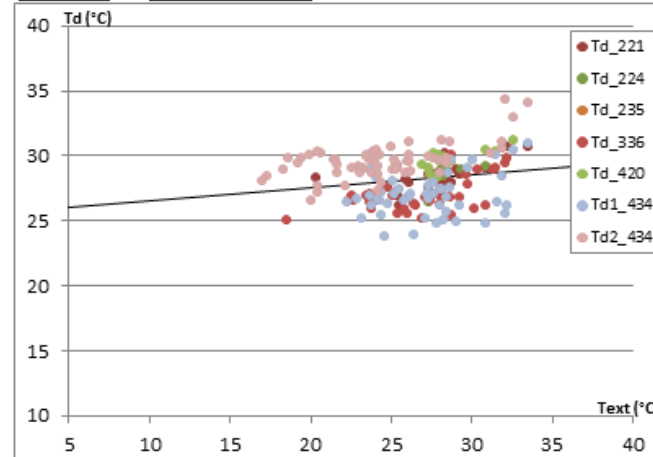
Groupe 2 Climatiseurs OFF



Groupe 1 Adiabatiques ON



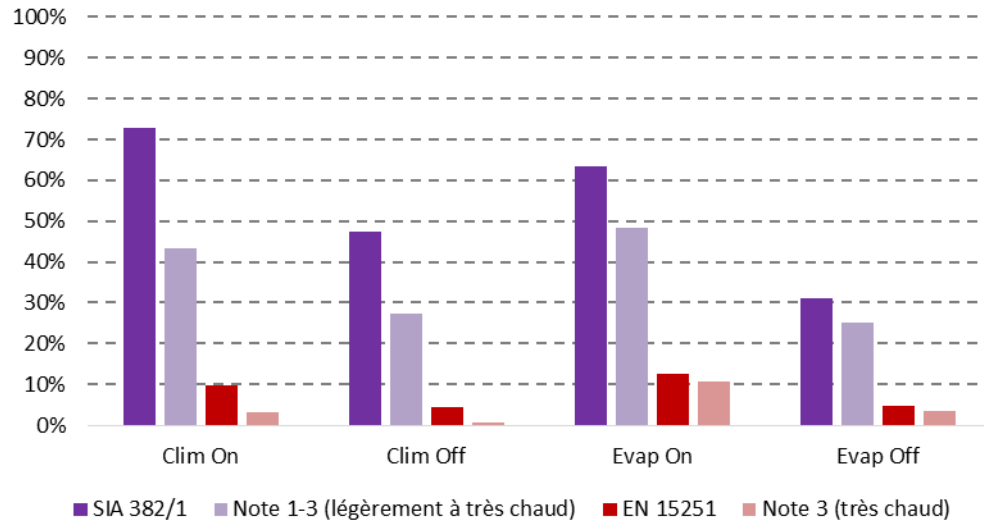
Groupe 2 Climatiseurs ON



# Performance et Ressenti

Fréquence de surchauffe des places de travail:

- selon les normes et mesures de température
- selon le ressenti des usagers



How do you feel?						
cold	cool	slightly cool	neither nor	slightly warm	warm	hot
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

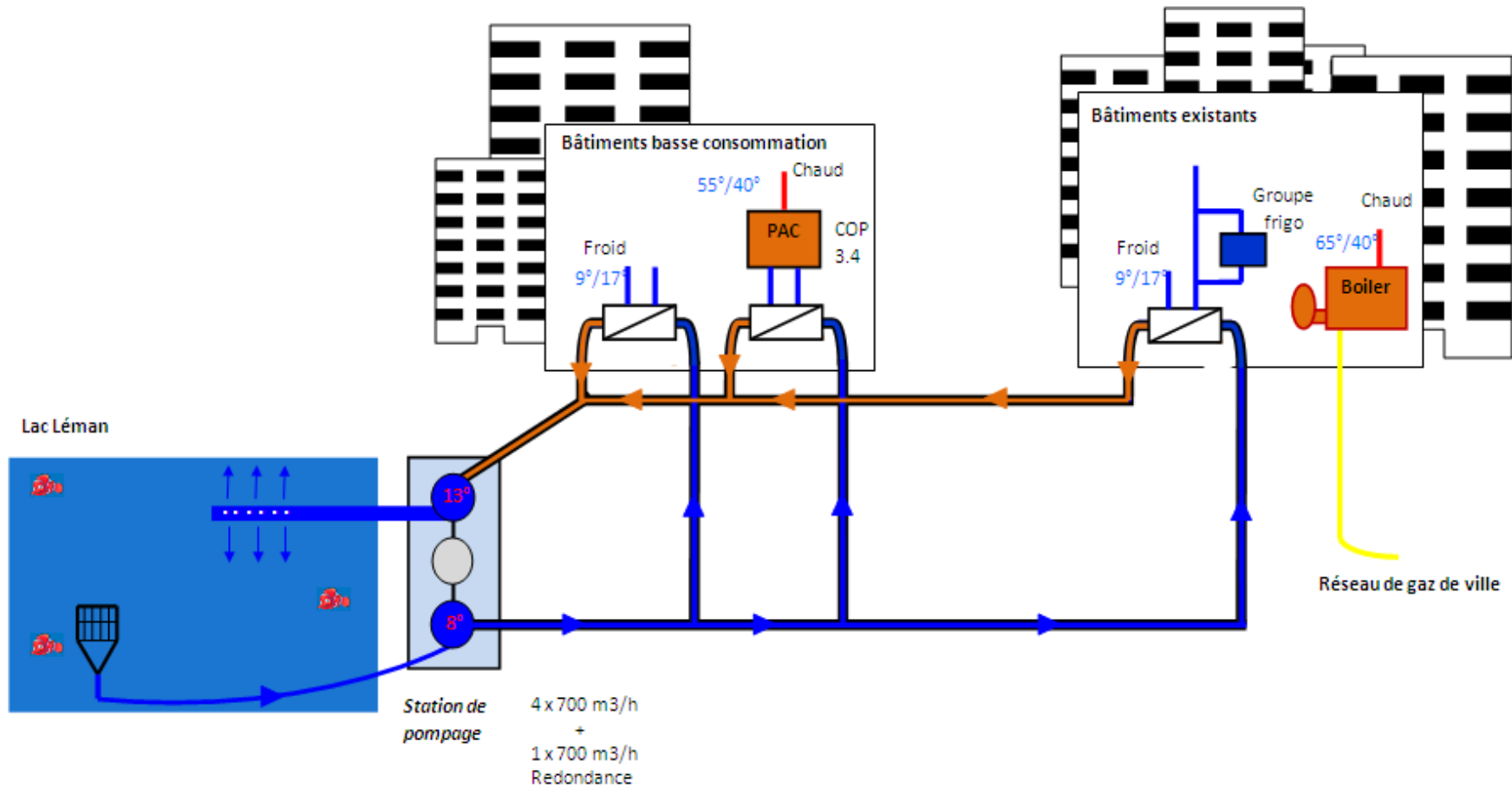
---

# Réseaux hydro-thermique GLN



# Réseaux hydro-thermique GLN (Genève-Lac-Nations)

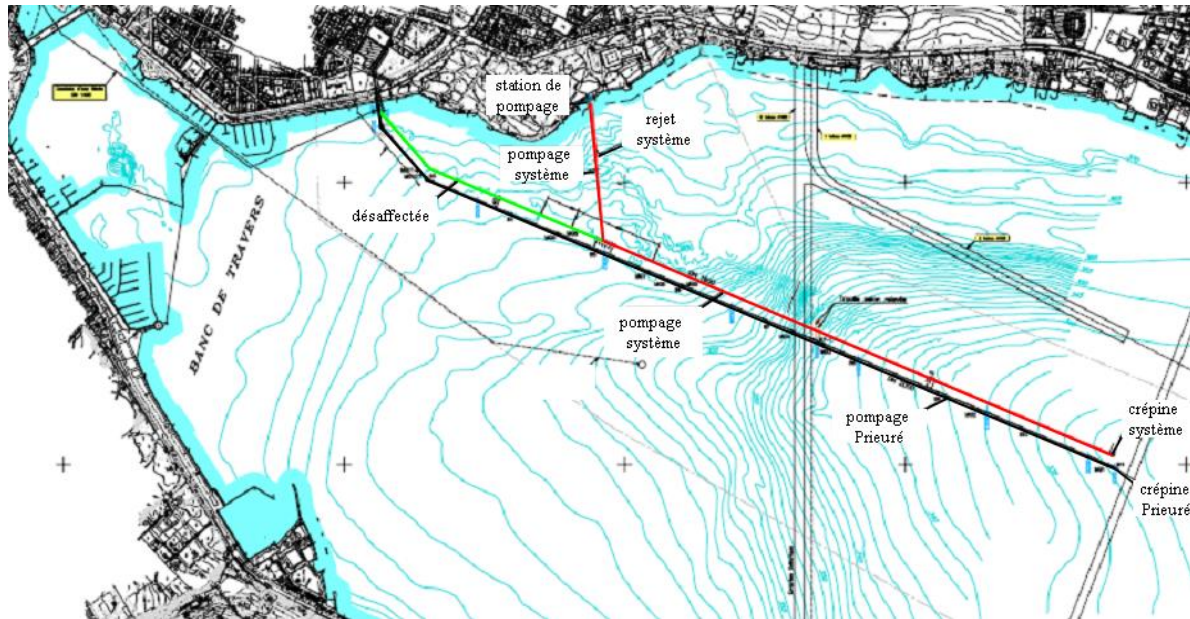
## Schéma de principe



1<sup>ère</sup> phase: développement connexions froid (bâtiments existants)

# Réseaux hydro-thermique GLN (Genève-Lac-Nations)

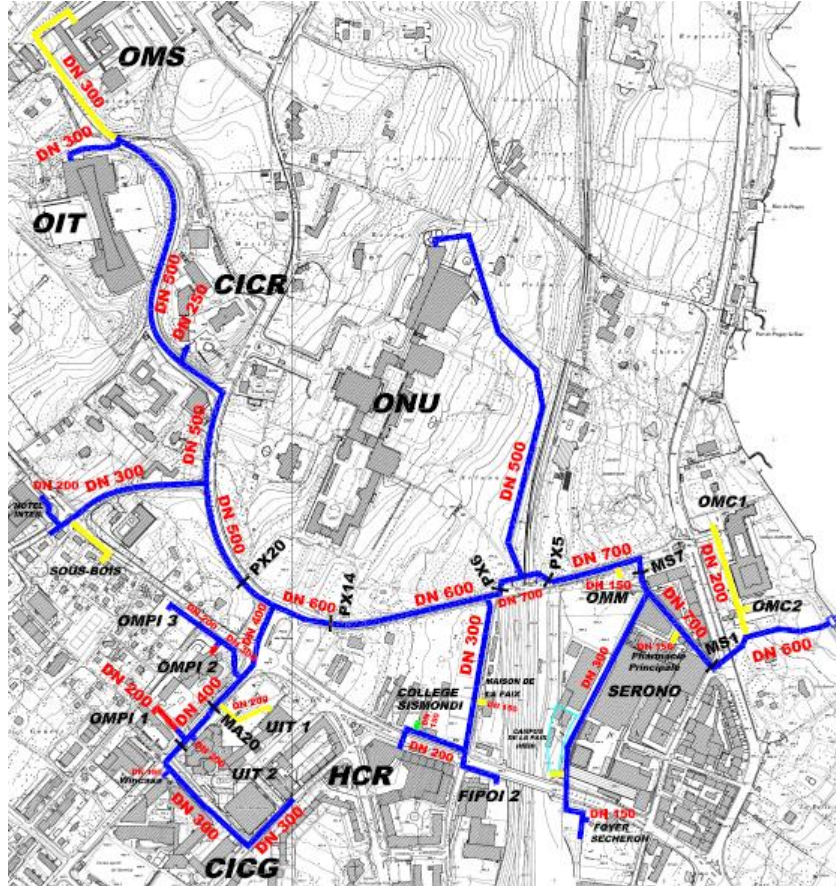
## Réseau lacustre (pompage / rejet)





# Réseaux hydro-thermique GLN (Genève-Lac-Nations)

## Réseau terrestre et sous-stations (GLN)



# Réseaux hydro-thermique GLN (Genève-Lac-Nations)

---

## Caractéristiques

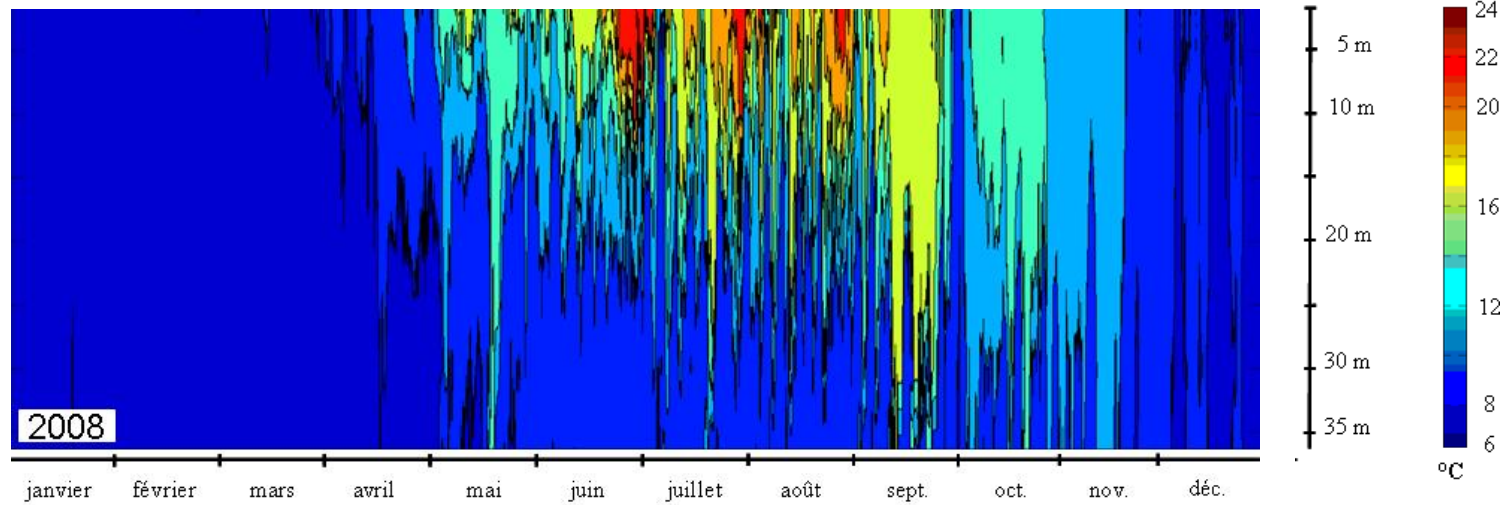
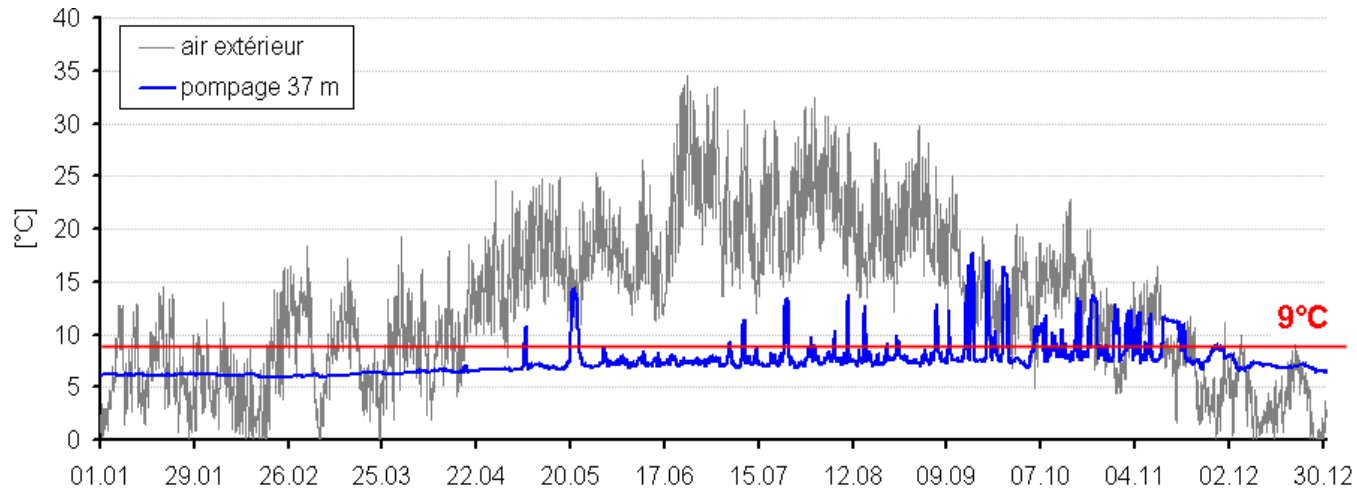
- Capacité: 18 MW (rafraîchissement) et 13 MW (chaleur)
- Débit nominal : 2'700 m<sup>3</sup>/h
- Longueur de réseau : ~ 6 km (longueur simple)
- Profondeur de la crépine : 37 m
- Coût : 36 millions de CHF

## Spécificités / caractère innovant

- Taille du réseau
- Mise en œuvre et exploitation commerciale (SIG) → vente de l'énergie (aspects commerciaux, problèmes de tarification, image verte du projet)
- Température de distribution du froid non contrôlée (pas de machines de froid sur le réseau, mais uniquement chez les clients)

# Ressource thermique du lac

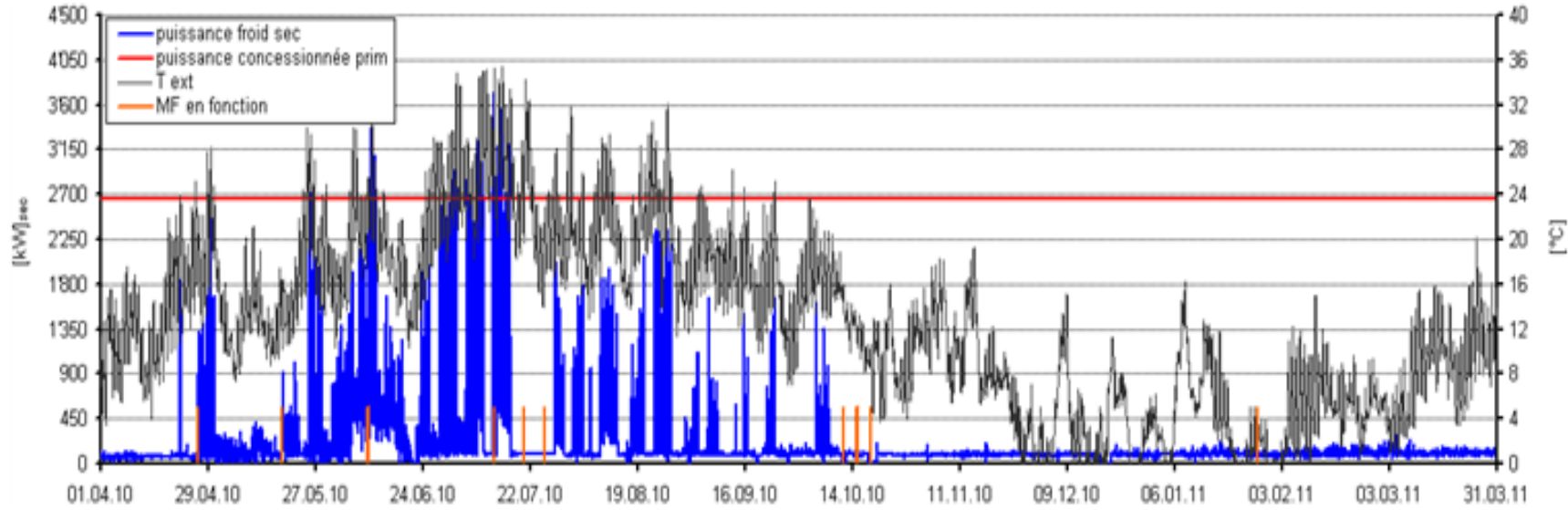
## Température de la ressource (2008)



Source: Viquerat, UNIGE (2012)

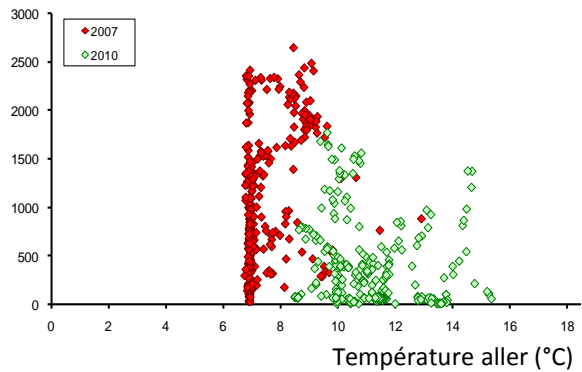
# Fonctionnement d'une sous-station

## Profil de la demande

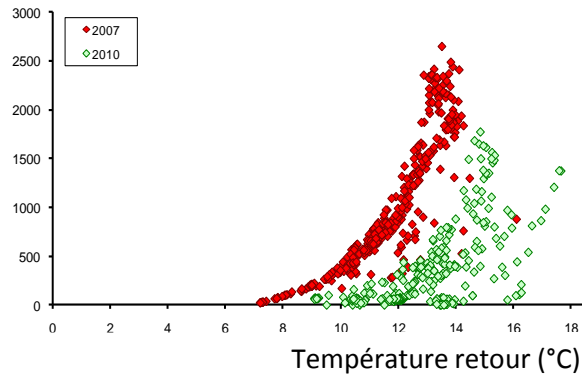


## Régimes de température circuit secondaire (bâtiment)

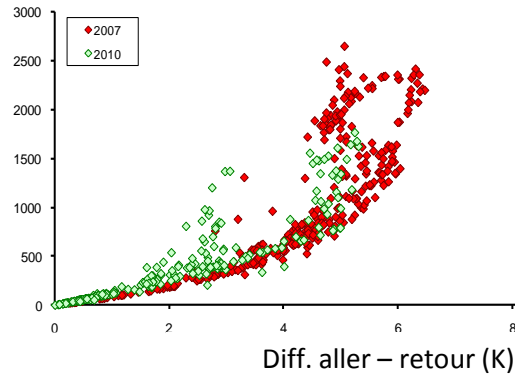
Puissance (kW)



Puissance (kW)



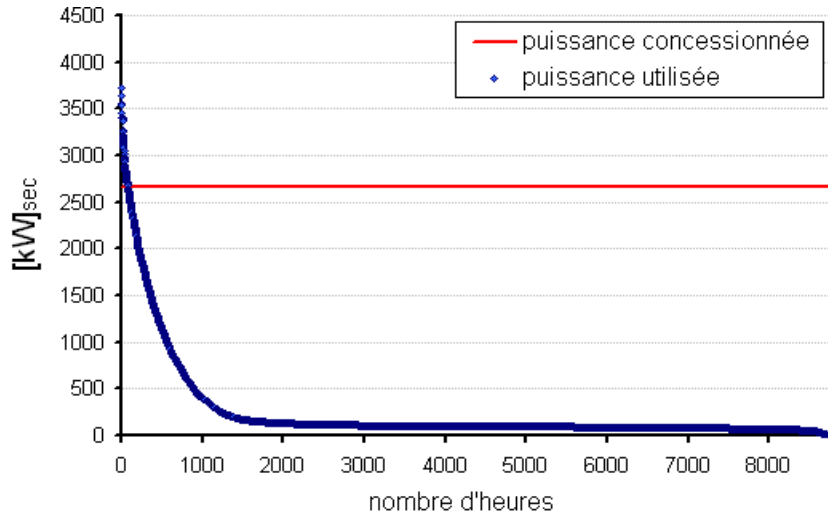
Puissance (kW)



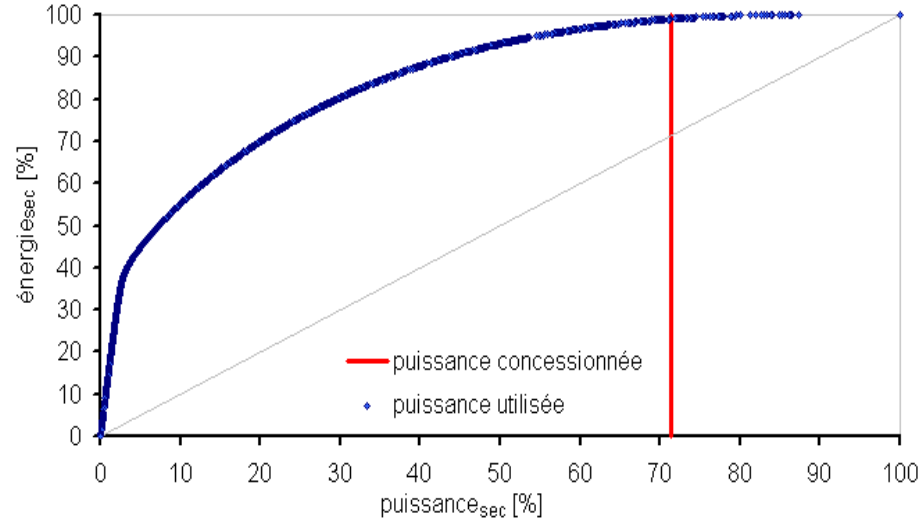
# Aspects dimensionnement

## Dimensionnement: 100% renouvelable ?

### Monotone de charge (ONU)



### Puissance / Energie (ONU)



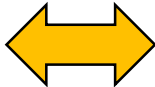
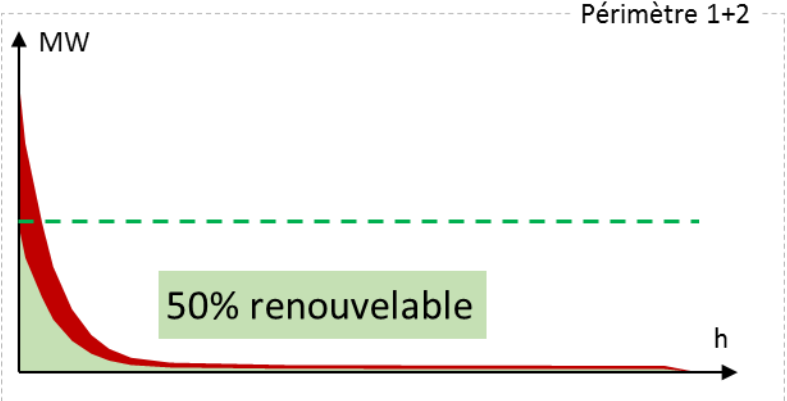
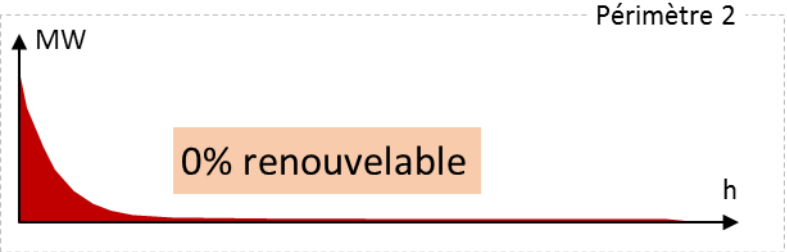
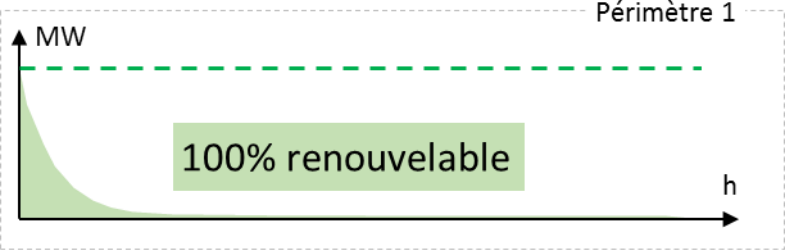
- Puissance ruban (130 kW): 3% de la pointe, 40% de la demande annuelle en énergie !
- Puissance concessionnée: 70% de la pointe, 99% de la demande annuelle en énergie
- Dimensionnement à 50% de la puissance concessionnée: 85% de la demande d'énergie annuelle



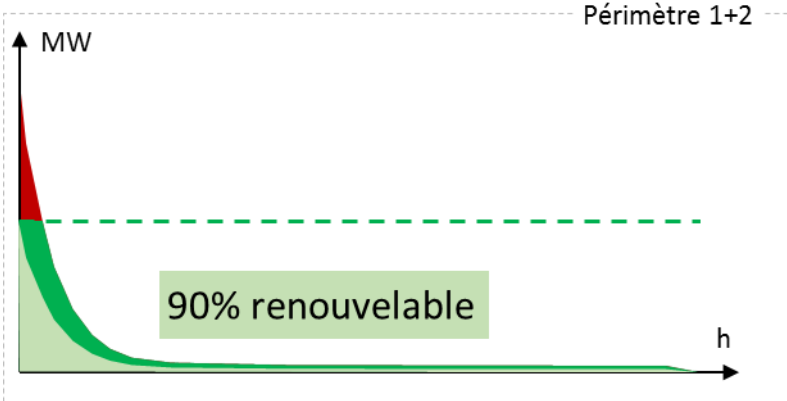
# Aspects dimensionnement

## Potentiel de mutualisation / extension (vue schématique)

Sans mutualisation



Avec mutualisation





# Consommation électrique

---

## Energy Efficiency Ratio (EER)

$$EER = \frac{\text{Energie froid}}{\text{Electricité}}$$

		2009	2010	2011	2012
Ventes de froid	[MWh]	2'005	5'428	11'166	14'119
Electricité pompage	[MWh]	377	854	1'218	1'003
EER	[-]	5.3	6.4	9.2	14.1

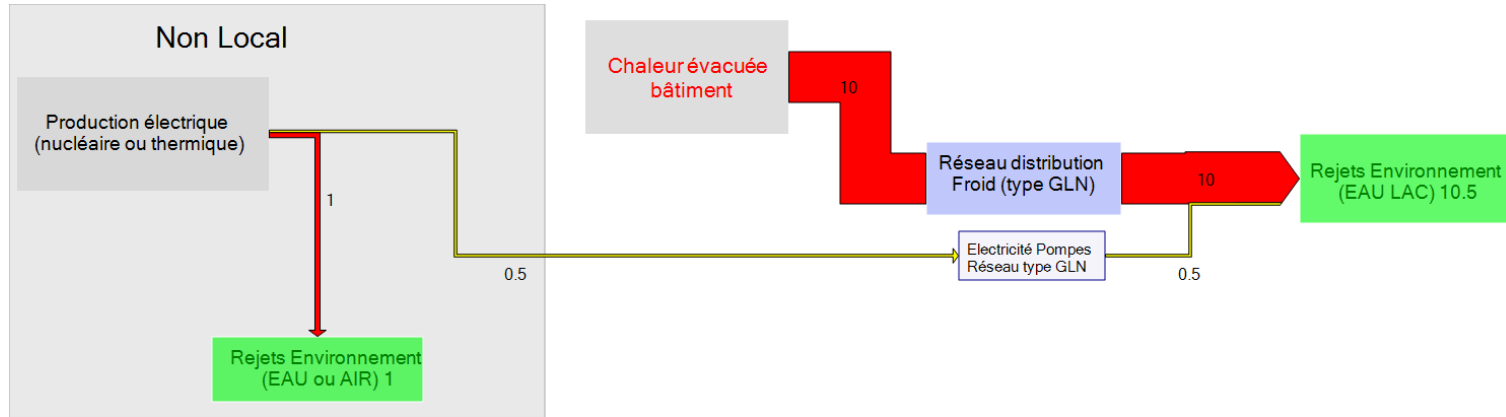
Source: SIG

- Optimisation du système en cours depuis fin 2011 (limitation température de consigne secondaire, coordination accrue entre SIG et clients, optimisation utilisation en boucle fermée, ...)
- Objectif: EER = 18

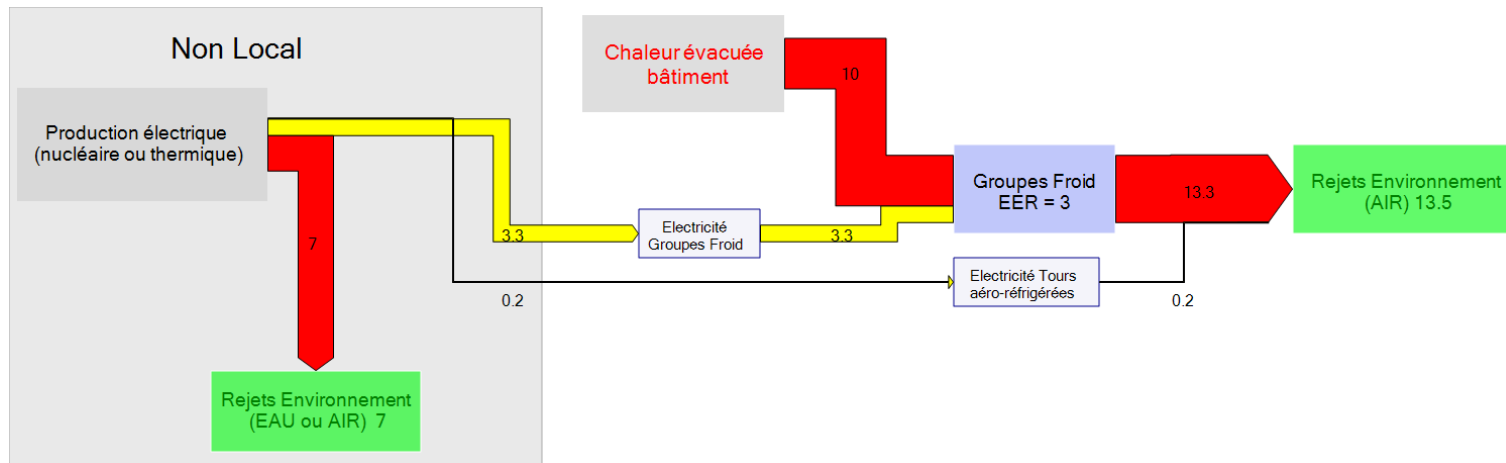
# Réseau hydro-thermique vs groupes de froid

## Consommation électrique et rejets thermiques

### Réseau hydro-thermique vs groupes de froid



### Groupes de froid



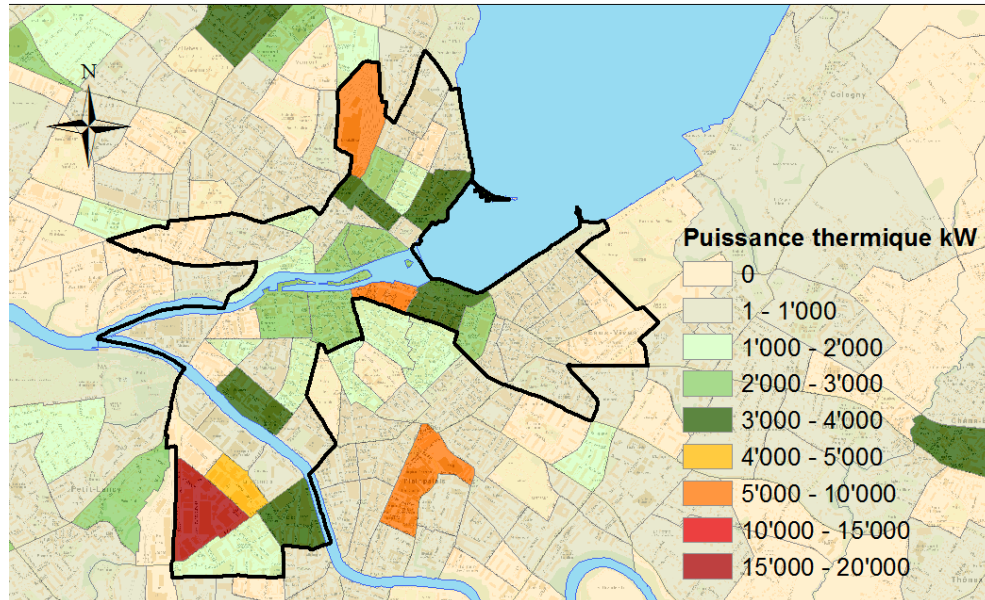
# Potentiel hydro-thermique

## Zoom sur le Centre Ville (projet Génilac)

- 2% du territoire du Canton
- 29 % de la surface de locaux non résidentiels

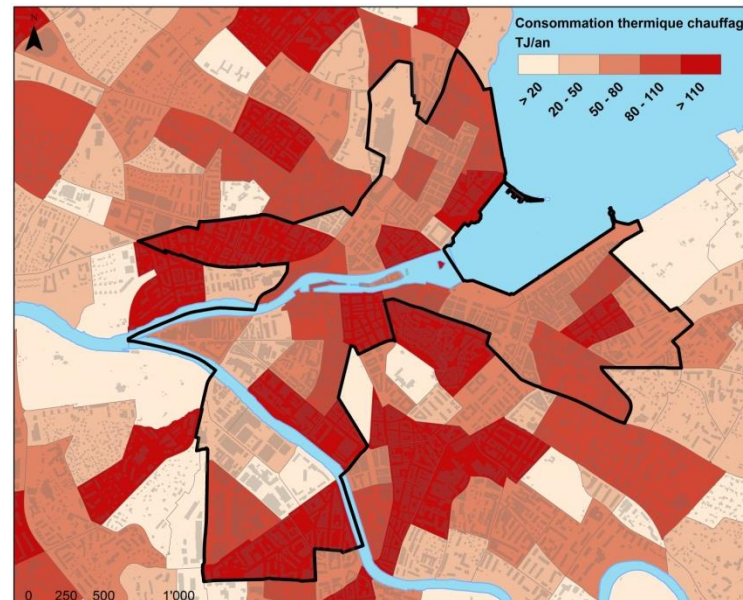
### Demande de froid

- 78 MW<sub>th</sub> / 60 GWh<sub>th</sub>
- 27% de la demande du canton



### Demande de chaud

- 1000 GWh<sub>th</sub>
- 17% de la demande du canton



Evolution de la demande de froid (avec le taux de croissance actuel de 3.4 MWth/an):

- 146 MWth en 2030 (18% des locaux non résidentiels)
- 214 MWth en 2050 (26% des locaux non résidentiels).

---

## Conclusions

# Synthèse

---

## Climatisation à Genève:

- Enjeu actuel: facteur 10 par rapport au chauffage
- Forte croissance, mais peu dans le résidentiel
- Poids des datacenters
- Décompte à priori délicat, mais corrélation robuste entre les approches bottom-up et top-down → méthode potentiellement reproductible

## Confort d'été

- Normalisation délicate, importance du ressenti
- Forte variation interannuelle de la contrainte météo
- Importance primordiale des protections solaires

# Synthèse

---

## Appareils portables de refroidissement:

- Enclenchement différé (par rapport à climatisation centralisée)
- Gestion individualisée / plus grande acceptabilité de surchauffe

## Evaporative cooling:

- Potentiel important
- Mise en œuvre sous forme centralisée, avec double étage ?

## Réseaux hydrothermiques:

- Ressource de très bonne qualité
- Parfaitement intégrable dans les systèmes de distribution classiques
- Quantité plus que suffisante
- Consommation électrique divisée par 6
- Rejets thermiques divisés par 2 + impact local minime / positif

Disponibles sous <http://unige.ch/energie/fr/publications/>

Projet TETRAENER (Projet Européen CONCERTO): 2005– 2010

- Viquerat P-A. (2012). Utilisation des réseaux d'eau lacustre profonde pour la climatisation et le chauffage des bâtiments; bilan énergétique et impacts environnementaux: Etude de cas: le projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève. Université de Genève. Thèse.

Dans le cadre du Partenariat SIG – UNIGE:

- Hollmuller P. et al. (2011). Enjeux de la climatisation au niveau genevois et tour d'horizon de possibles alternatives.
- Viquerat P.A. et al. (2012). Connexion des bâtiments de l'ONU au réseau GLN : analyse de la première année de fonctionnement. 2012
- Veyrat S. et al. (2014). Climatisation du datacenter de l'Office des Nations Unies à Genève : Comparaison entre une climatisation via le réseau Genève-Lac-Nations et une climatisation via un groupe de froid classique.
- Faessler J. (2012). Valorisation thermique des eaux profondes lacustres : le réseau genevois GLN et quelques considérations générales sur ces systèmes. In: Archives des Sciences, 2012, vol. 65, p. 215-228.
- Veyrat S. et al. (2014). Appareils portables de refroidissement par cycle frigorifique et par évaporation : étude de cas sur 14 places de travail d'un bâtiment de bureaux à Genève.





# Energy efficiency and Passive cooling

---

## Efficient building design / Prevention of heat loads

- Microclimate and site design
- Building form and layout
- Solar control
- Thermal insulation
- Internal gain control
- ...

## Passive cooling / Heat dissipation with natural sinks

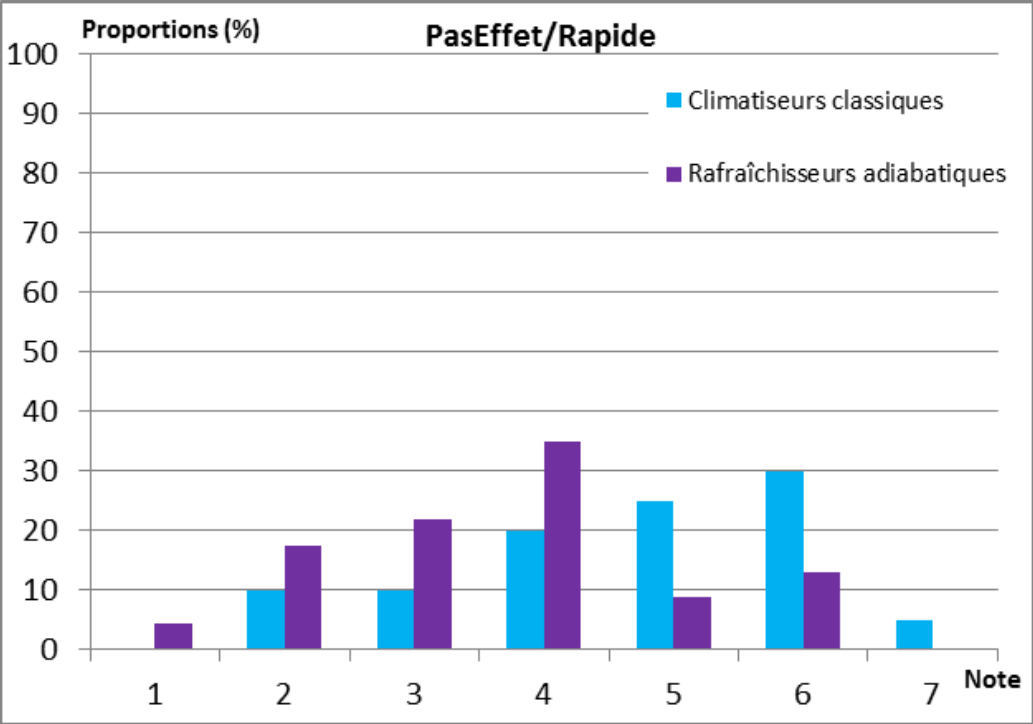
- Night ventilation
- Radiative cooling
- • Evaporative cooling
- Earth coupling
- • Water source cooling (sea, lake, river)
- ...

## Efficient air-conditioning

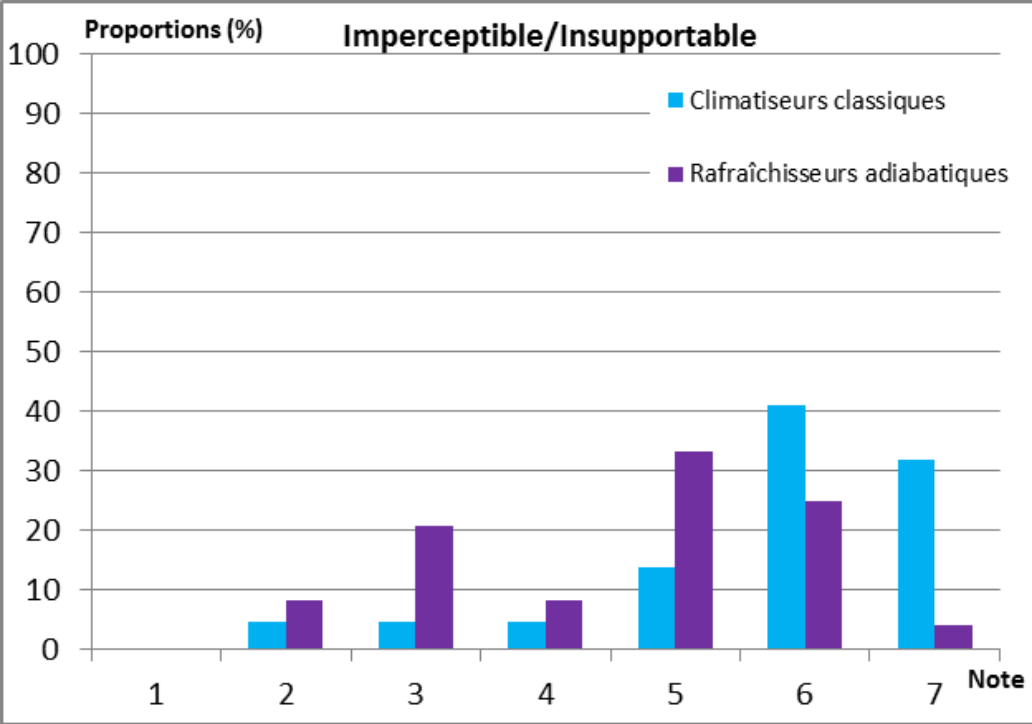
- Water cooling instead of air cooling
- VAV air systems
- Enthalpy recovery

# Appareils portables de refroidissement / Ressenti des usagers

## Effet de rafraîchissement

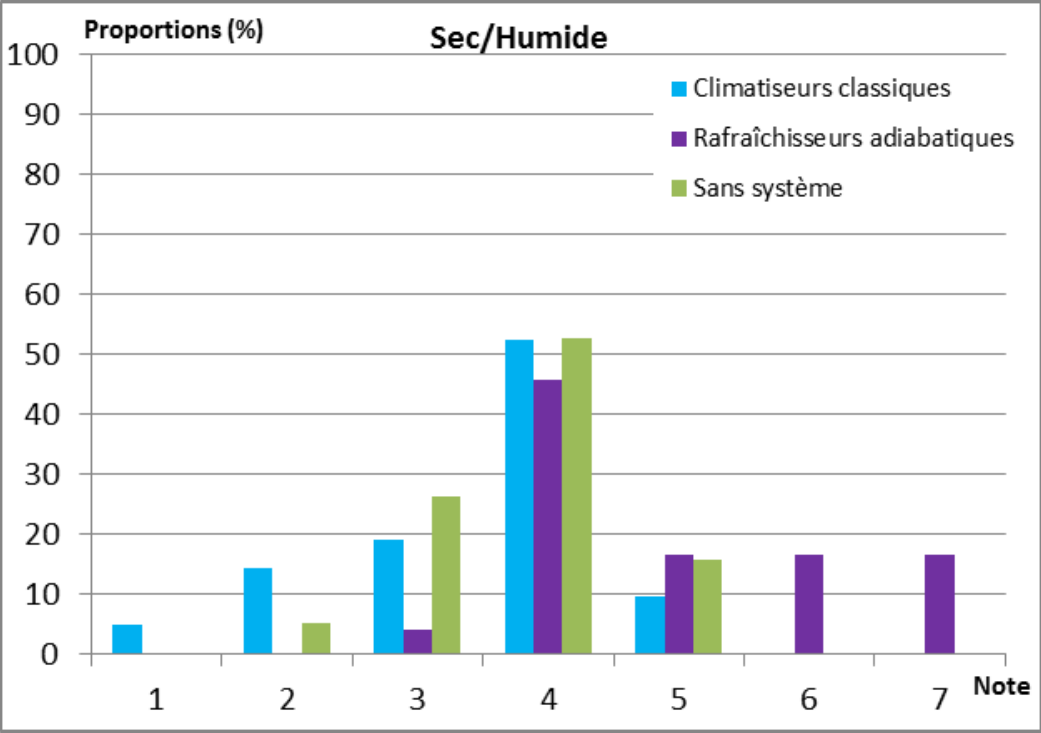


## Bruit

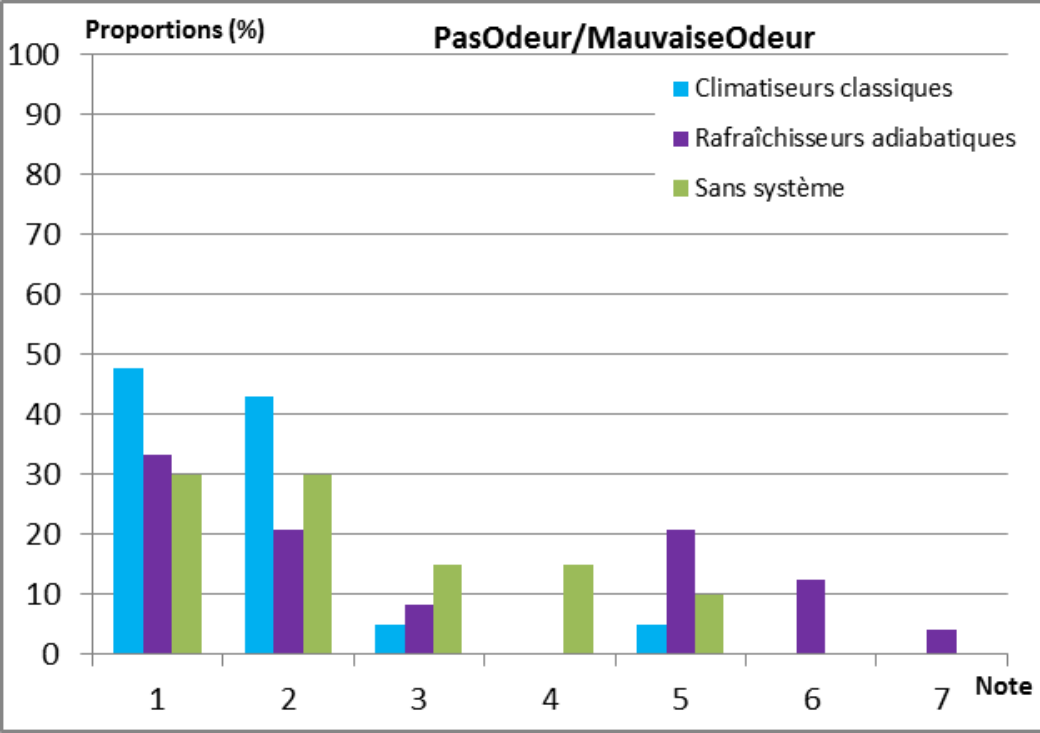


# Appareils portables de refroidissement / Ressenti des usagers

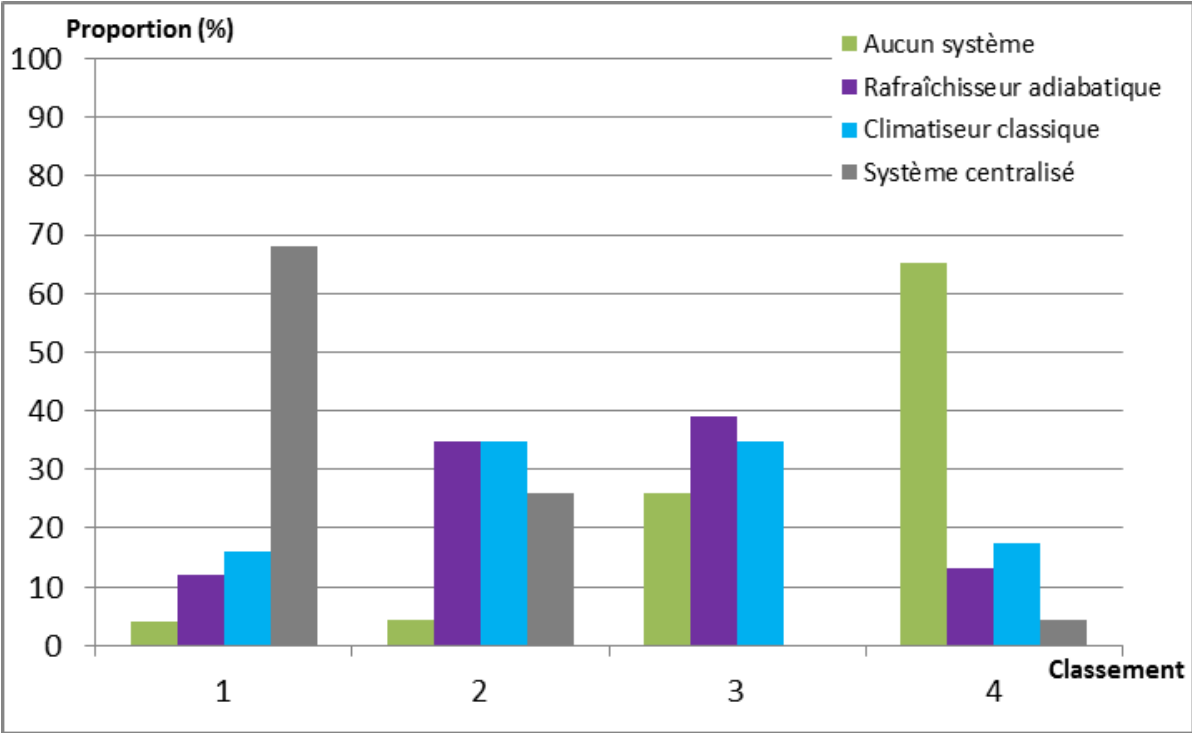
## Qualité de l'air (sec/humide)



## Qualité de l'air (odeur)



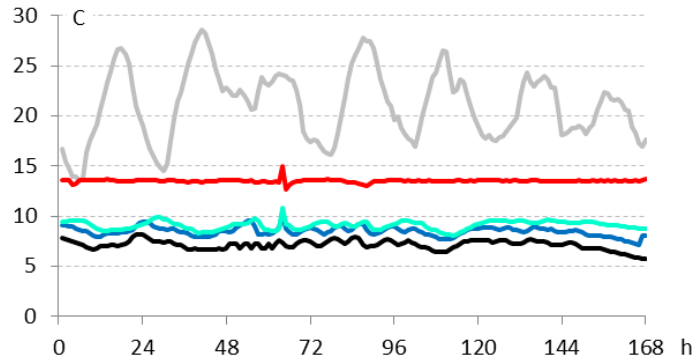
## Préférence



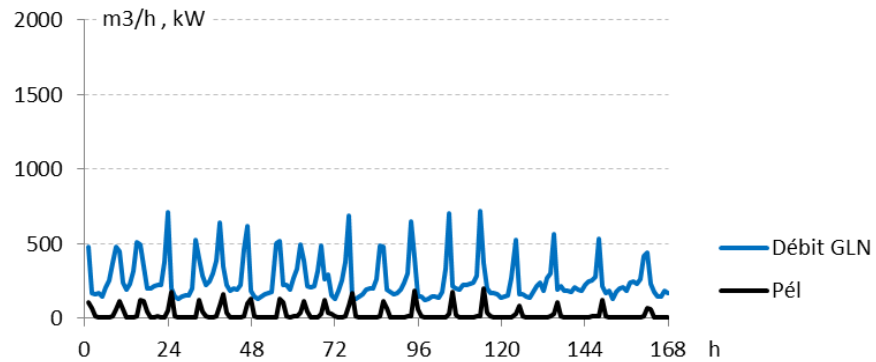
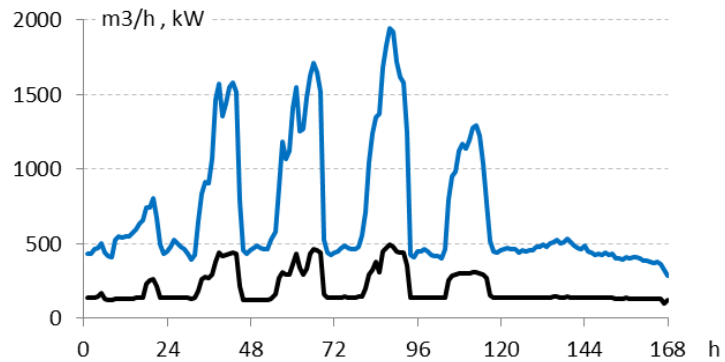
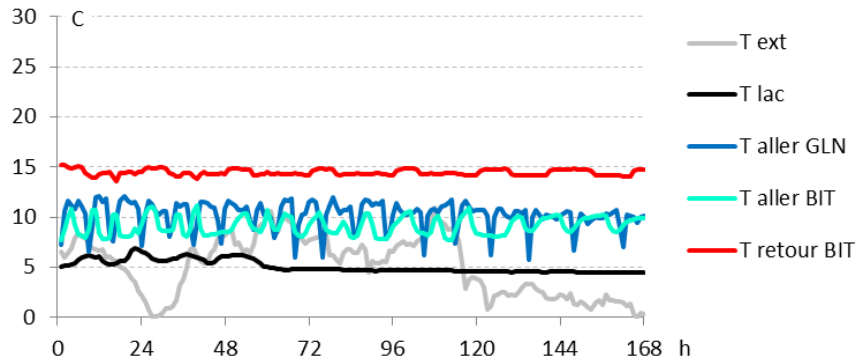
# Consommation électrique

## Electricité de pompage : boucle ouverte/fermée

### Fonctionnement estival

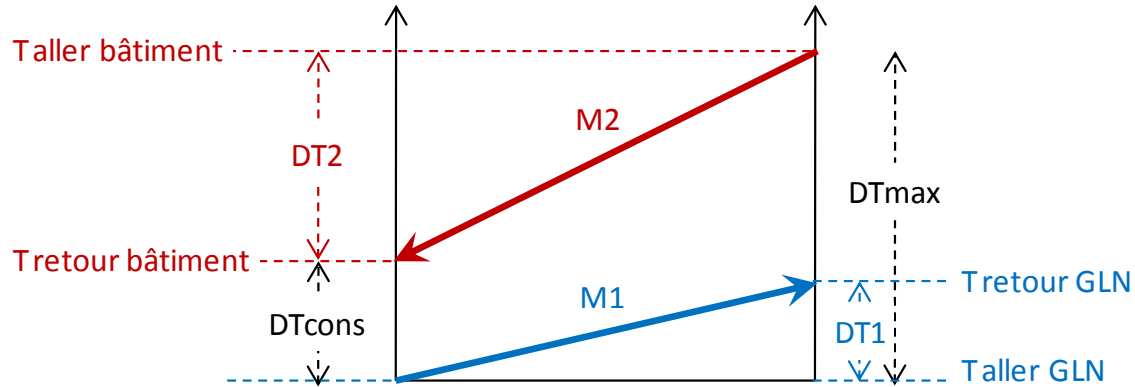


### Fonctionnement hivernal



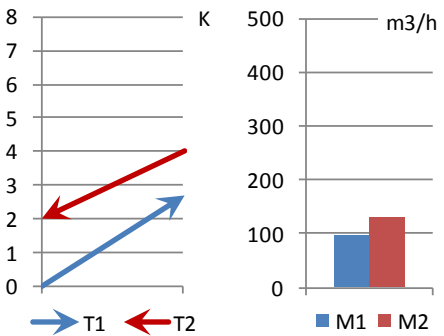
# Aspect régulation

## Echangeur de chaleur GLN – bâtiment

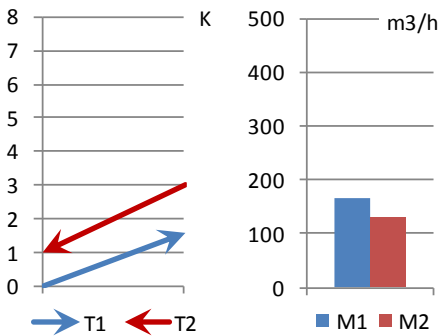


## Exemple (demande de 300 kW = 2 K sur le réseau de distribution bâtiment)

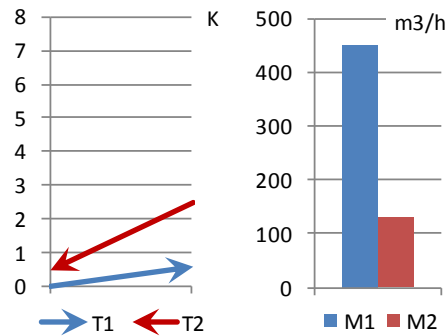
$DT_{cons} = 2K$



$DT_{cons} = 1K$



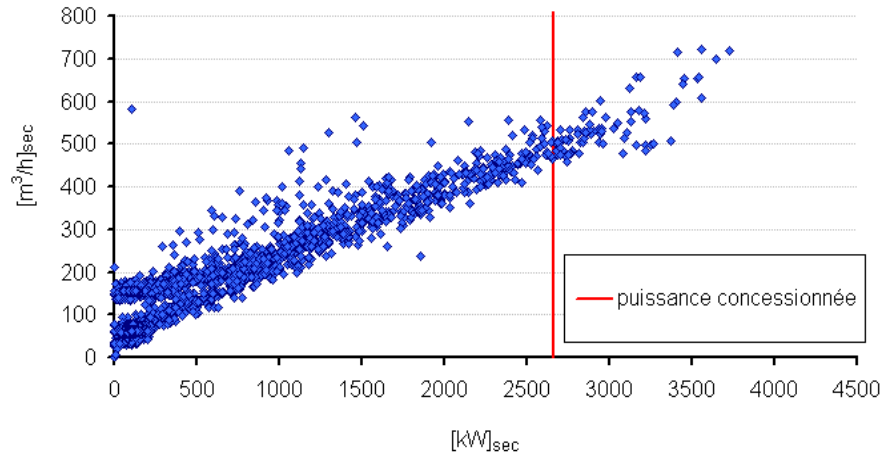
$DT_{cons} = 0.5K$



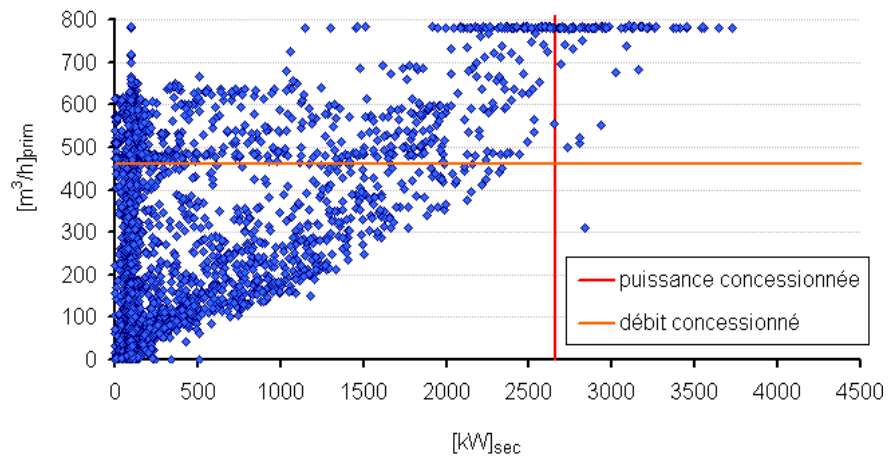
# Aspect régulation

## Gestion des débits

### Côté secondaire (bâtiment)



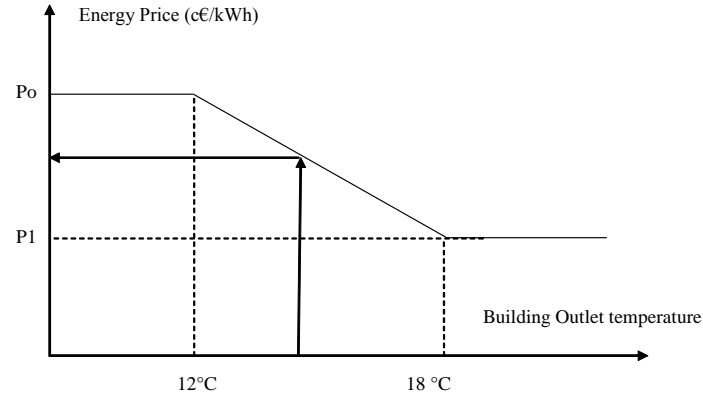
### Côté primaire (GLN)



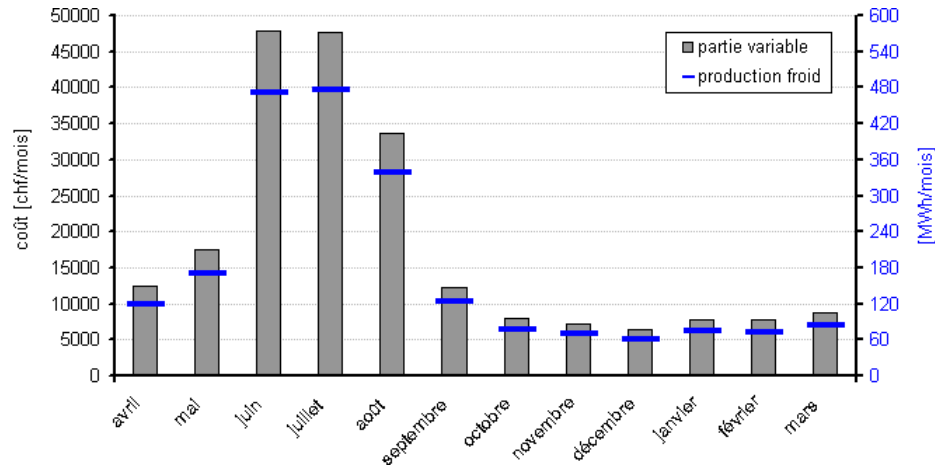
# Aspects économiques

## Tarification

- Coût fixe (prime de puissance): 40 CHF/kW par an
- Coût variable (énergie): fonction de la température de retour  
Façon indirecte de tenir compte du débit d'eau utilisé  
(grand débit = petit  $\Delta T$  = Tretour élevée)



## Coûts pour une sous-station

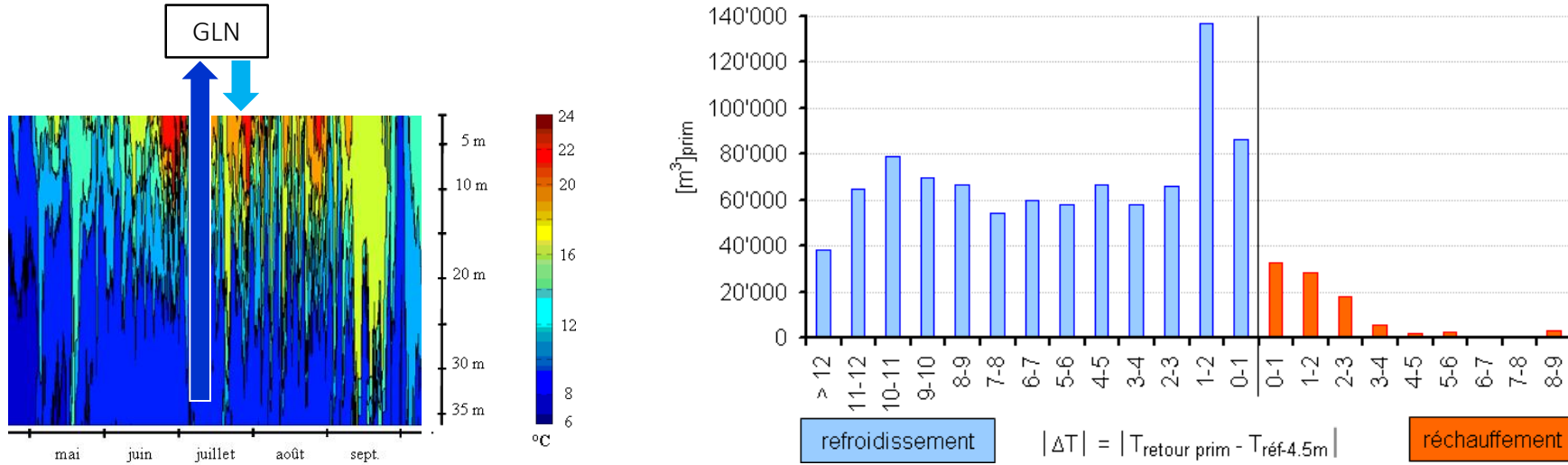


- Coût annuel moyen: 14.6 ct/kWh
- 70% en coût variable, 30% en coût fixe



# Effet thermique du rejet

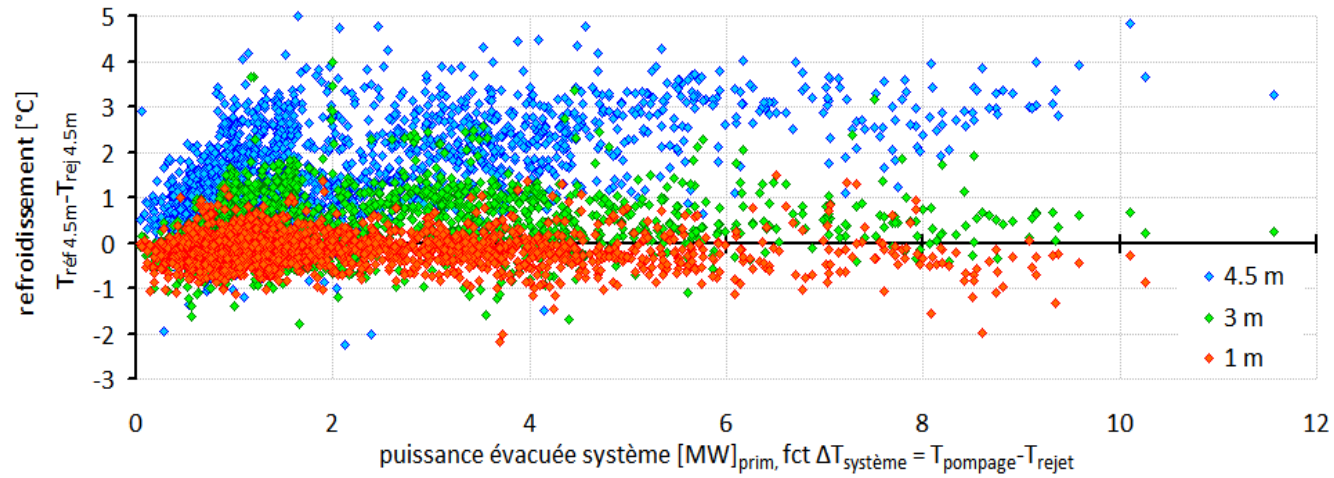
## Effet global



- Transfert des couches profondes vers les couches superficielles
- Eau rejetée réchauffée, mais plus froide que le milieu récepteur
- Refroidissement localisé (« plume ») dans la couche superficielle
- Augmentation du volume de la couche intermédiaire (métalimnion) et diminution de la couche inférieure qui constitue la ressource

# Effet thermique du rejet

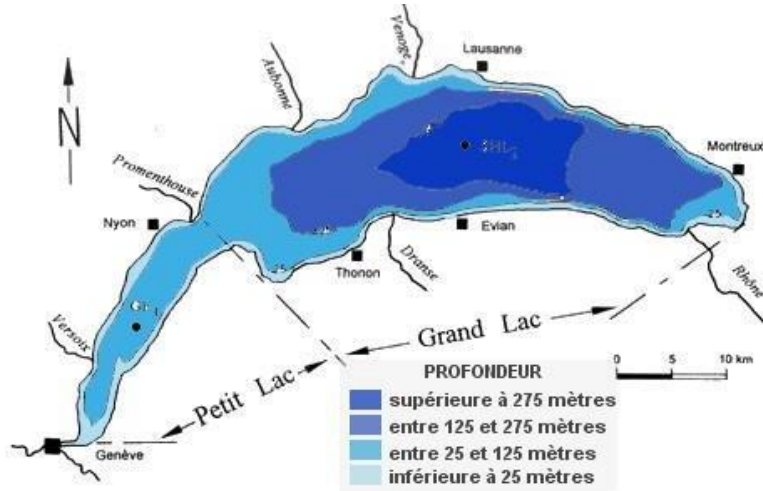
## Effet local (plume)



- Refroidissement local, uniquement sur les couches situées plus bas que 4m de profondeur
- Dans un rayon de 50 m, les effets thermiques sont le plus souvent du temps confondus avec la fluctuation thermique spontanée du milieu

# Potentiel hydro-thermique

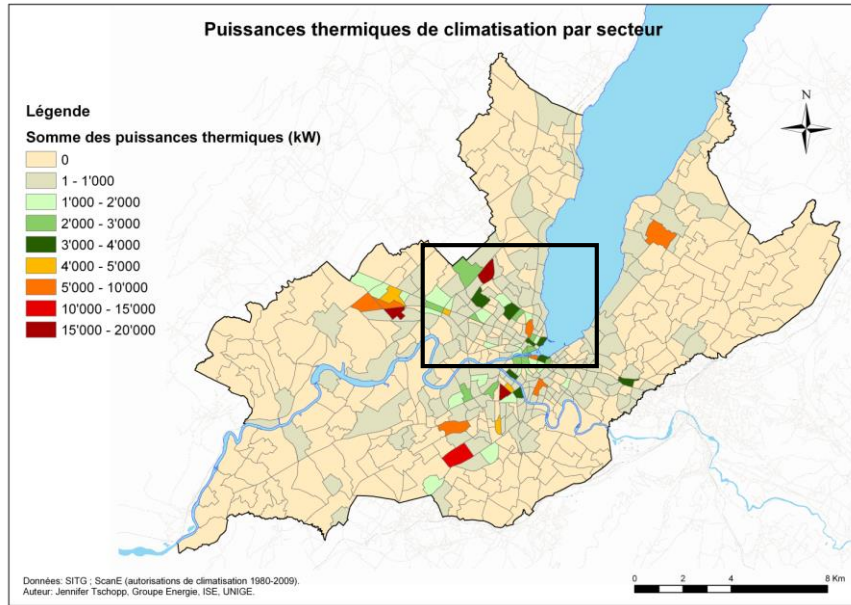
## Potentiel régional brut (ressource)



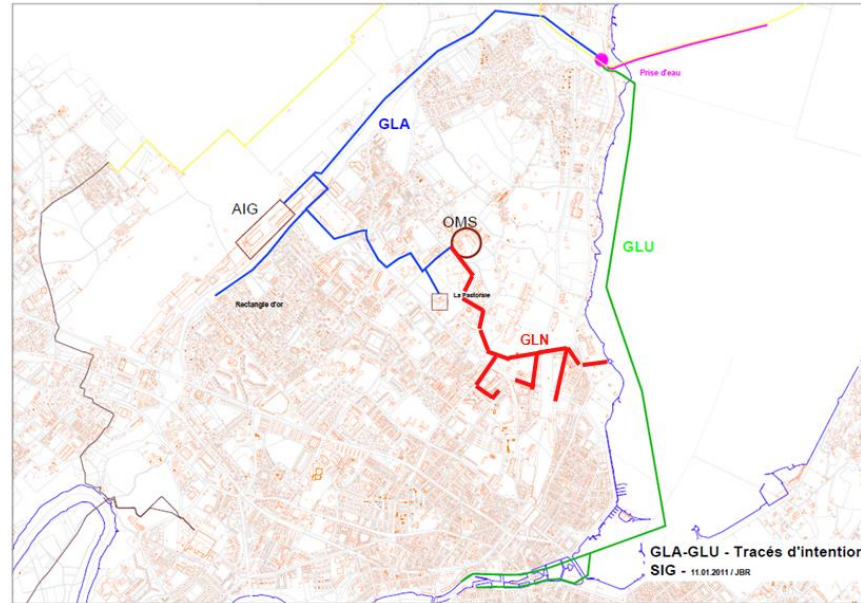
- Volume d'eau du Petit Lac < 40 m: 0.95 km<sup>3</sup>
- Débit nominal potentiel: 1 millions de m<sup>3</sup>/h pendant 1000 h (= débit moyen Rhône)
- Potentiel froid: 5 GW / 5000 GWh (= 10 x la demande de climatisation régionale)

# Potentiel hydro-thermique

## Localisation de la demande de froid



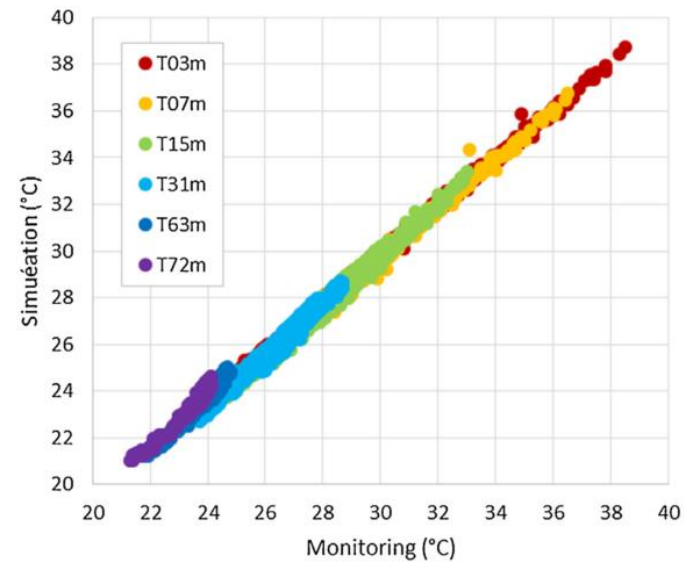
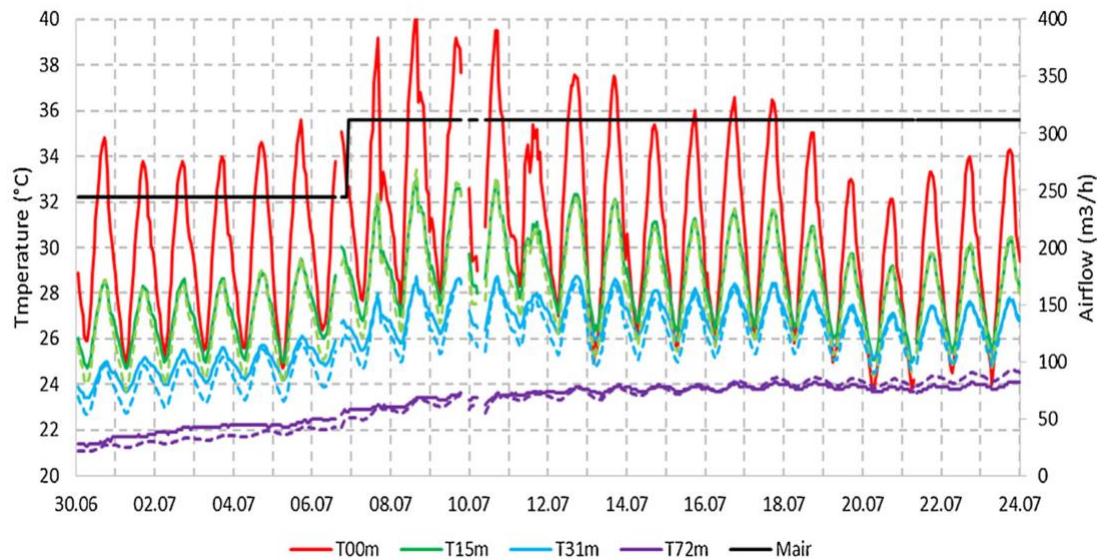
## Projets d'extension de GLN



# Earth-Air heat exchanger: case study

## Single family house (Morocco)

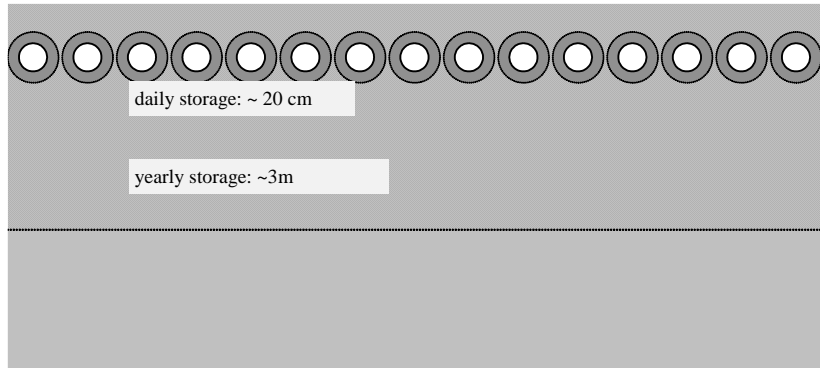
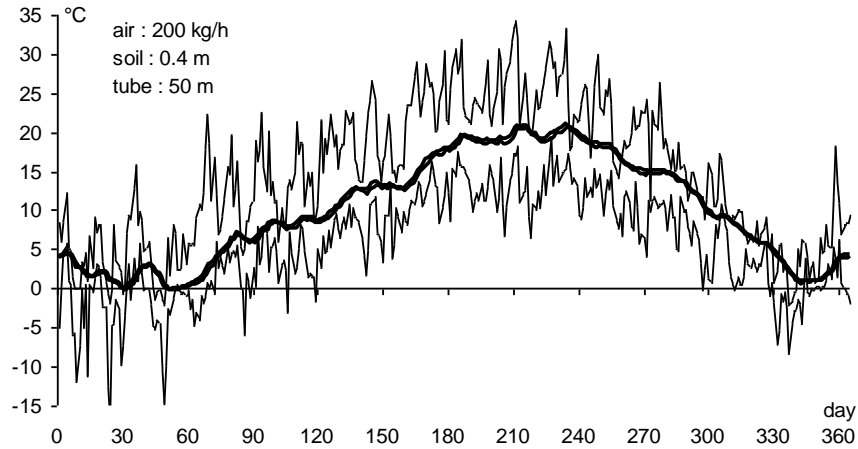
- Airflow: 750 – 930 m<sup>3</sup>/h
- 3 pipes (length: 72 m, diameter: 15 cm, depth: 2.2 – 3.5 m)
- Design factor: 1 m<sup>2</sup> per 9 m<sup>3</sup>/h



# Earth-Air heat exchanger: design guidelines

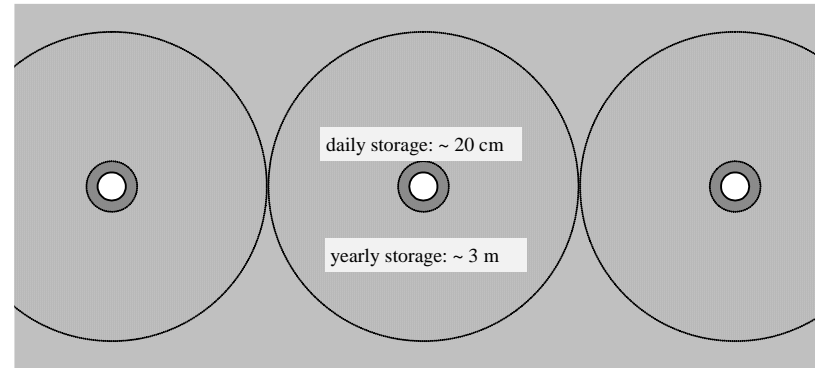
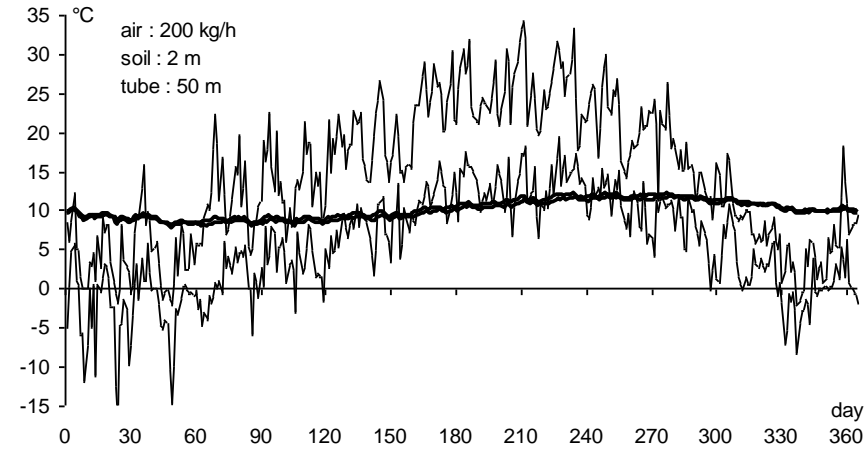
## Reduction of daily oscillation

- Soil : 20 - 30 cm around each pipe
- Length: 10 - 20 m per 100 m<sup>3</sup>/h



## Reduction of annual oscillation

- Soil: 200 - 300 cm around each pipe
- Length: 20 - 40 m per 100 m<sup>3</sup>/h

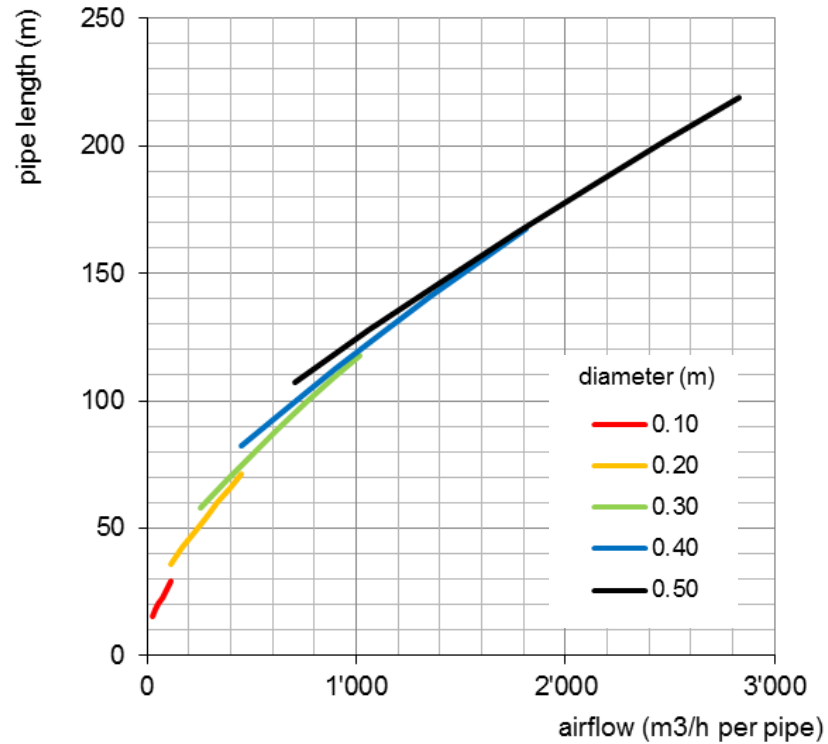




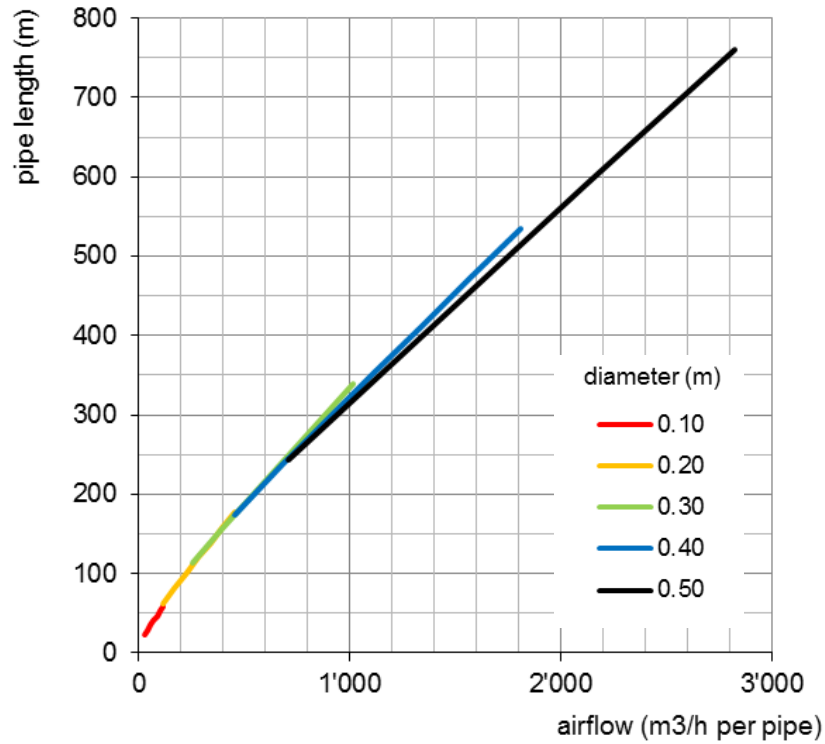
# Earth-Air heat exchanger: design guidelines

## Nomographs for daily and annual amplitude reduction

Reduction of daily oscillation (15% amplitude)  
Soil around pipe: 20 - 30 cm



Annual oscillation reduction (15% amplitude)  
Soil around pipe: 200 - 300 cm



Valid for dry soil (conductivity: 1.1 W/K.m, specific heat: 1.6 MJ/K.m<sup>3</sup>)