



Optimiser les températures des réseaux et bâtiments pour intégrer les renouvelables: cas d'études et perspectives

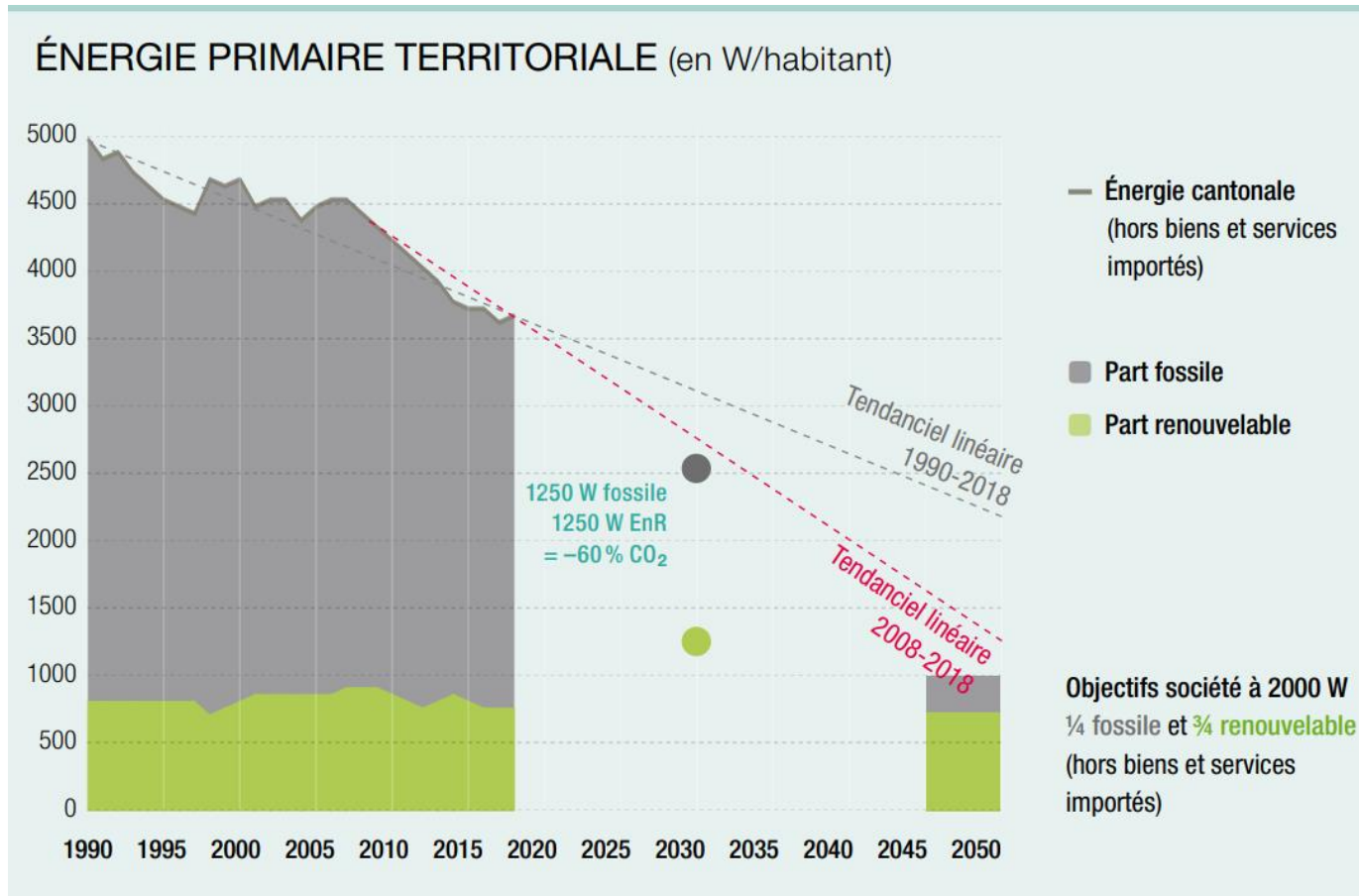
Séminaire Energie-environnement UNIGE

Groupe Systèmes énergétiques – Pauline Brischoux

14 novembre 2024

Contexte

Objectifs énergétiques genevois :

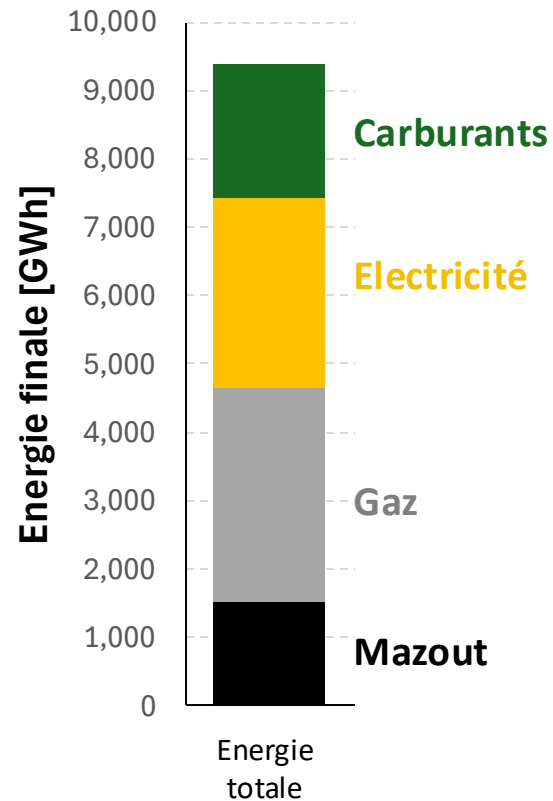


- ➔ Réduire la consommation d'énergie
- ➔ Substitution du fossile par du renouvelable

Source : OCEN, Plan directeur de l'énergie 2020-2030, <https://www.ge.ch/document/plan-directeur-energie-2020-2030>

Contexte

Consommation d'énergie dans le canton de Genève, par source :
(en 2019)



Mazout et gaz :

➔ 50% de la consommation d'énergie finale du canton

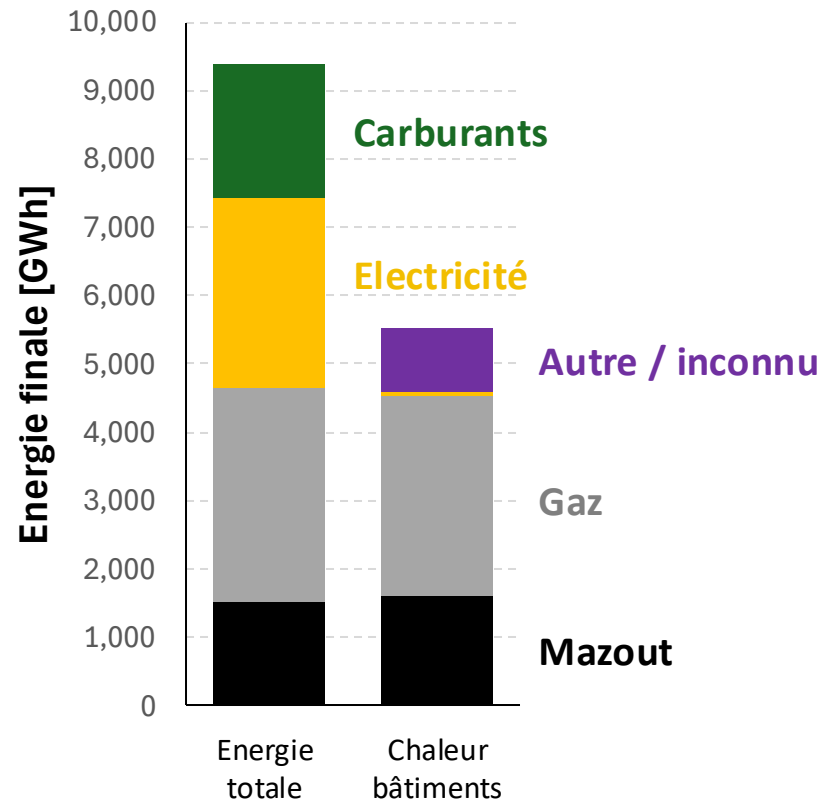
Note : Les carburants pour l'aviation et l'électricité consommée au CERN sont exclus

Source des données :

- Canton : Tableau 08.03.1.01 de l'OCSTAT
- Parc immobilier : Schneider et al., 2022, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:164877>

Contexte

Consommation d'énergie dans le canton de Genève, par source :
(en 2019)



Mazout et gaz :

- ➔ 50% de la consommation d'énergie finale du canton
- ➔ Plus de 80% de la production de chaleur des bâtiments

Note : Les carburants pour l'aviation et l'électricité consommée au CERN sont exclus

Source des données :

- Canton : Tableau 08.03.1.01 de l'OCSTAT
- Parc immobilier : Schneider et al., 2022, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:164877>

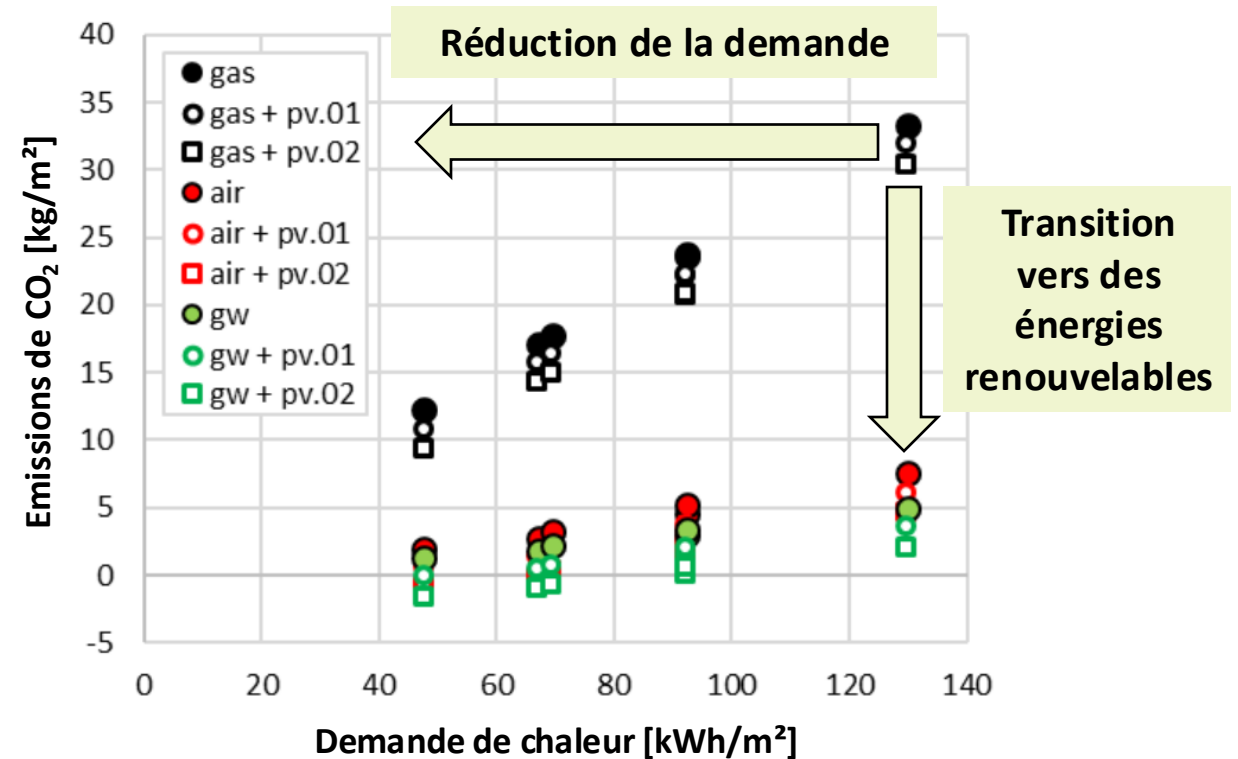
Contexte

Besoin de décarboner la production de chaleur pour les bâtiments :

- Réduction de la demande de chaleur
- Intégration d'énergies renouvelables

En zone dense, seules options possibles en général :

- PAC sur air
- Réseau CAD
(géothermie, PAC sur lac/nappe, PAC sur STEP,...)



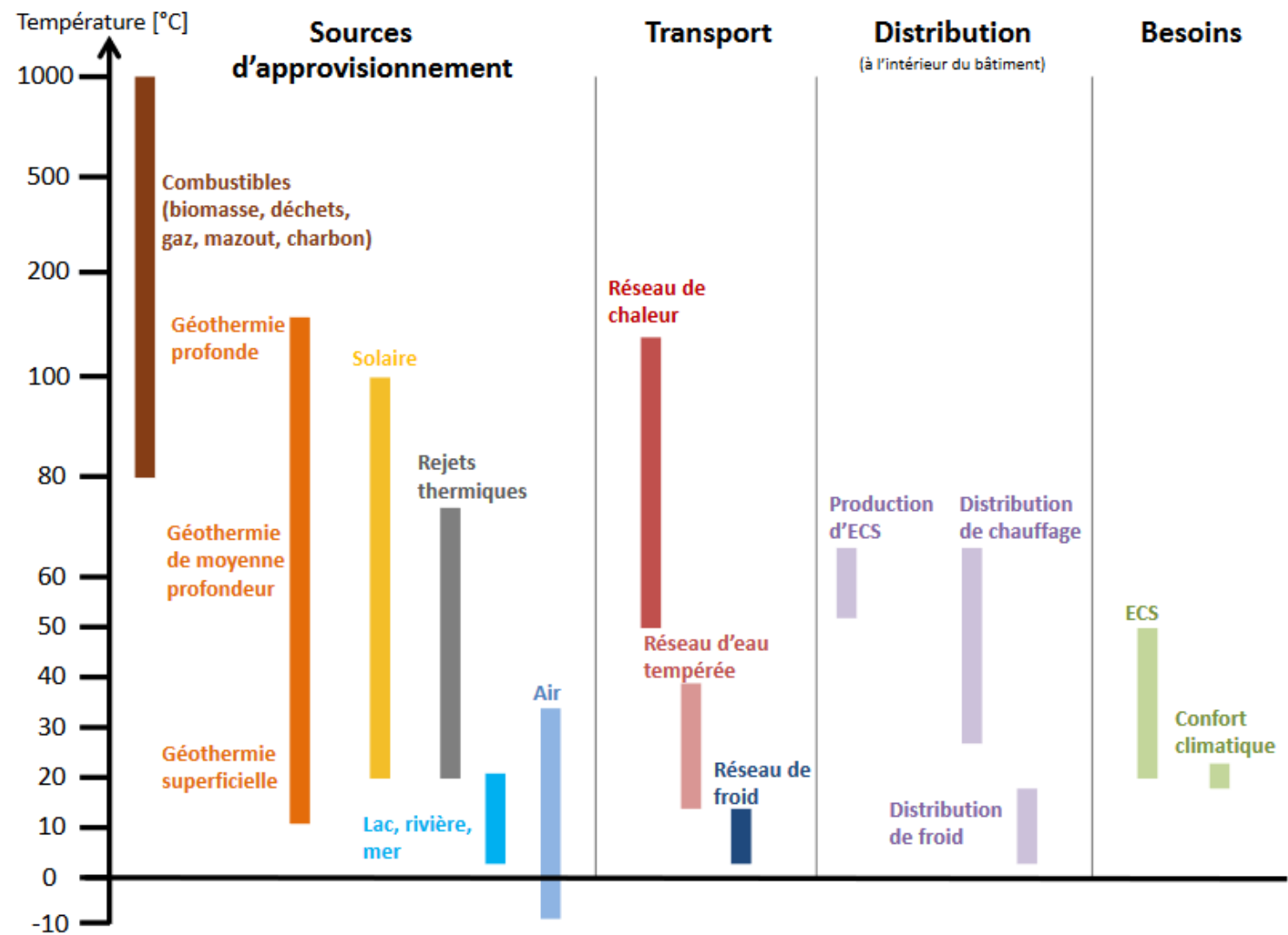
Area related CO_{2eq} emissions for various multifamily buildings vs heat production with gas boiler, air source HP or groundwater source HP (with and without PV), *Romano et al., 2020*

Source: Romano et al., 2020. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:136512>

Contexte

Enjeux des niveaux de température :

➔ Sources renouvelables basse température par rapport aux besoins, contrairement aux sources fossiles

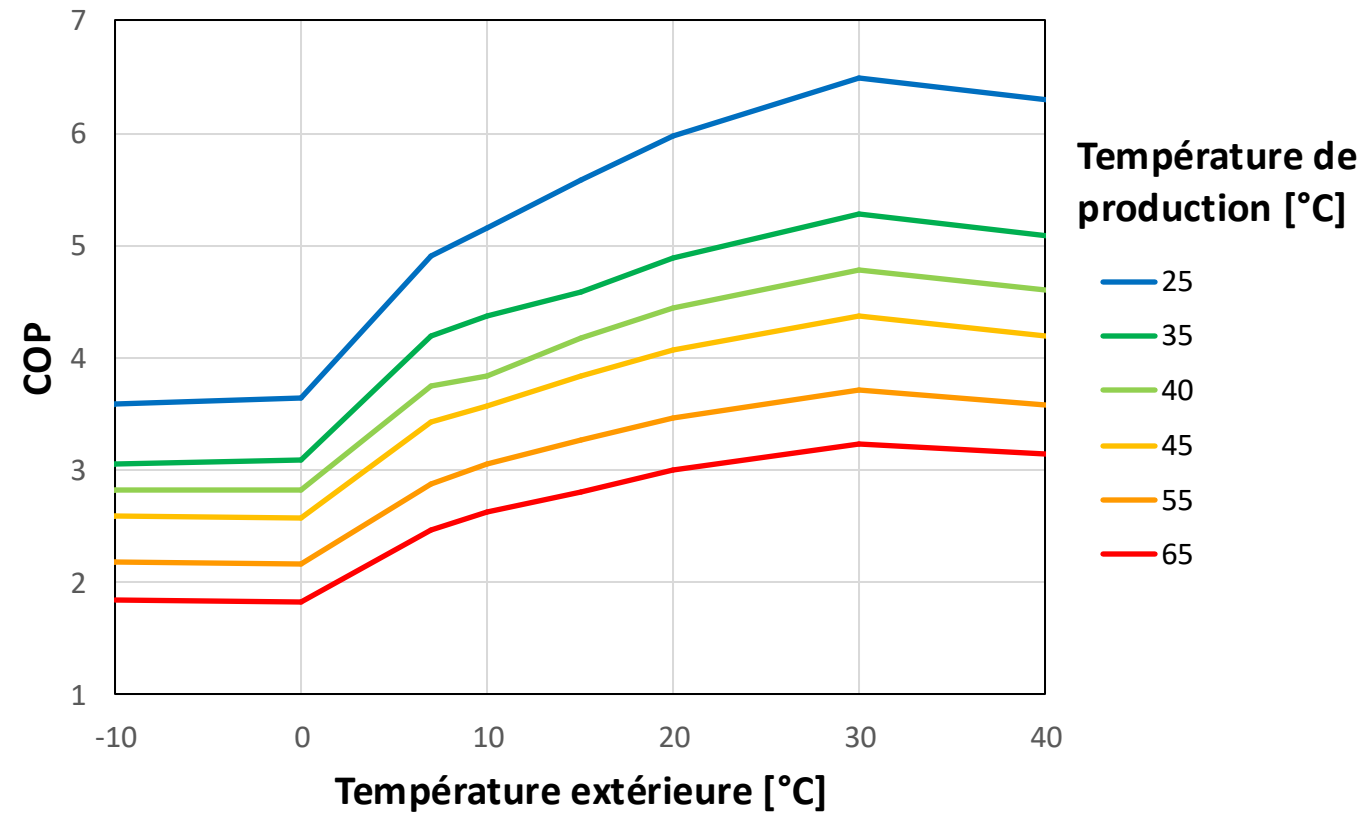


Source: Quiquerez, 2017, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:93380>

Contexte

→ Important d'avoir les températures de production les plus basses possibles

Niveaux de température et efficacité des PAC :
Exemple d'une PAC air-eau



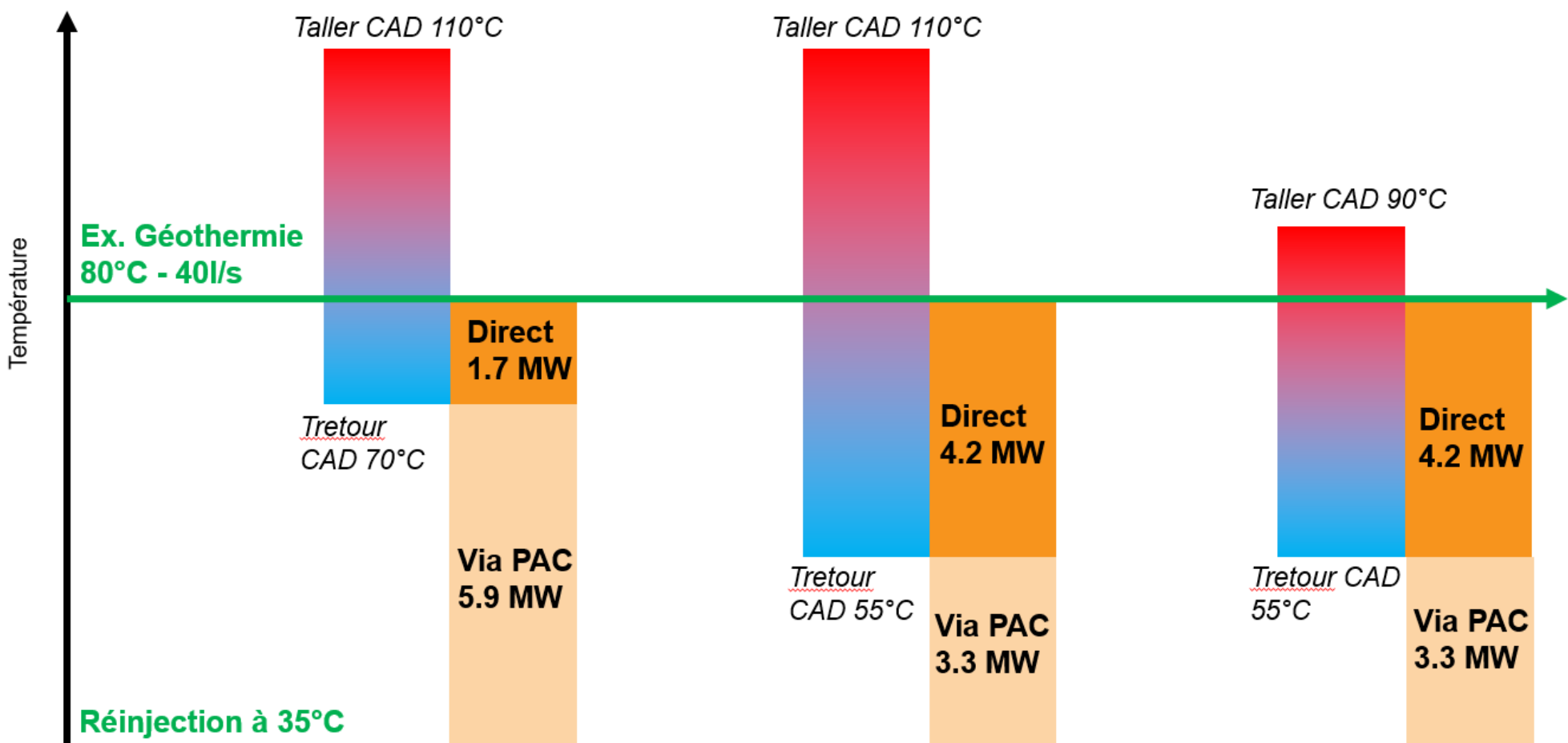
Source : AERMEC, Documentation technique, modèle NRK0650HE

Contexte

➔ Important d'avoir les températures aller/retour CAD les plus basses possibles

Niveaux de température et intégration des énergies renouvelable dans les CAD :

Exemple de la géothermie moyenne profondeur (directe + PAC)

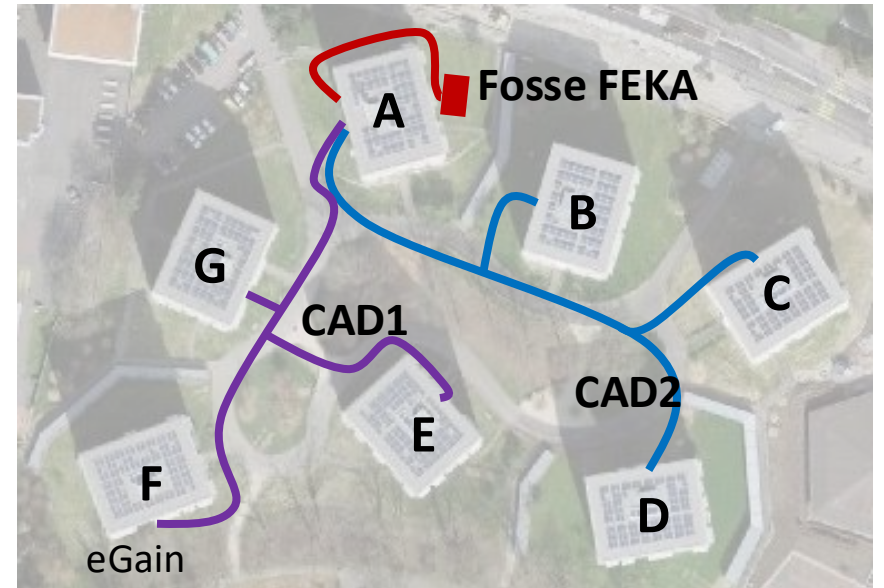
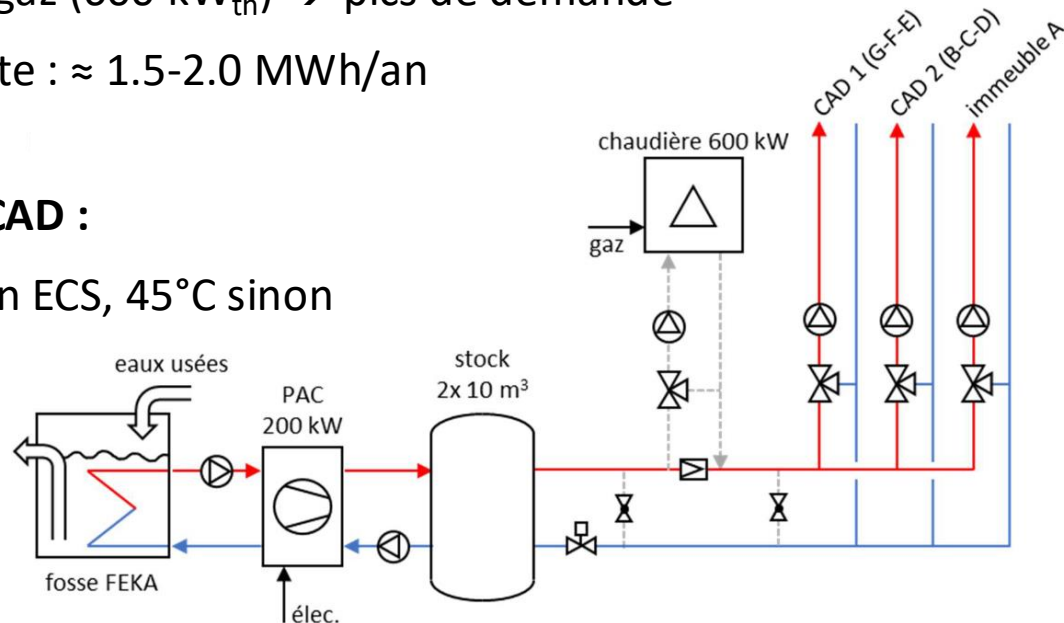


Retours d'expérience



Quartier «Les Auréa» (Carouge, GE)

- **Bâtiments :**
 - 7 bâtiments neufs (HPE ou THPE)
 - Logements (97%) et locaux parascolaires (3%)
 - SRE totale : 30'400 m²
 - **Production de chaleur :**
 - Pompe à chaleur sur eaux-usées (200 kW_{th}) → ruban
 - Chaudière à gaz (600 kW_{th}) → pics de demande
- Chaleur produite : ≈ 1.5-2.0 MWh/an
- **Température du CAD :**
 - 63°C si besoin ECS, 45°C sinon

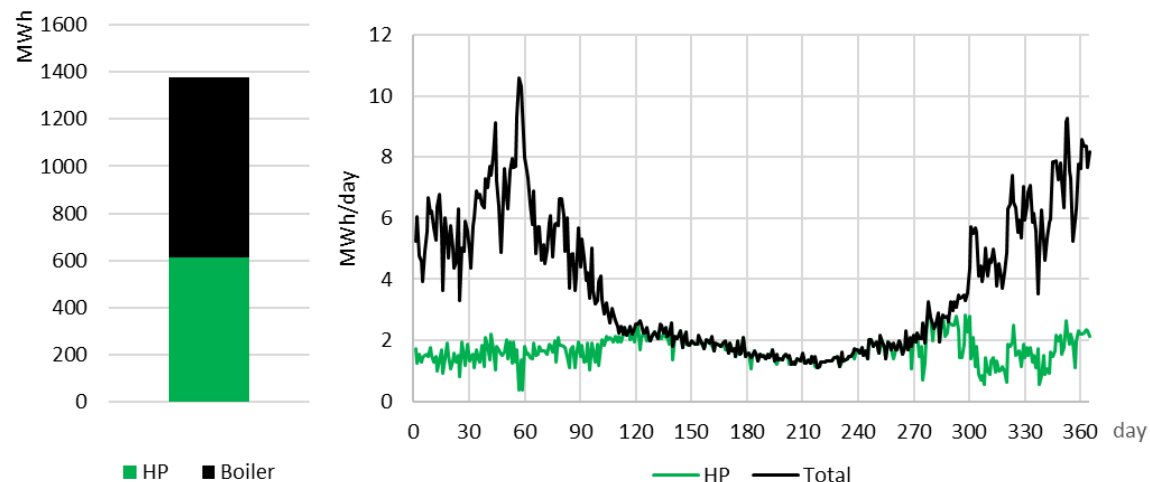


Rapport : Callegari et al., 2021, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:149374>

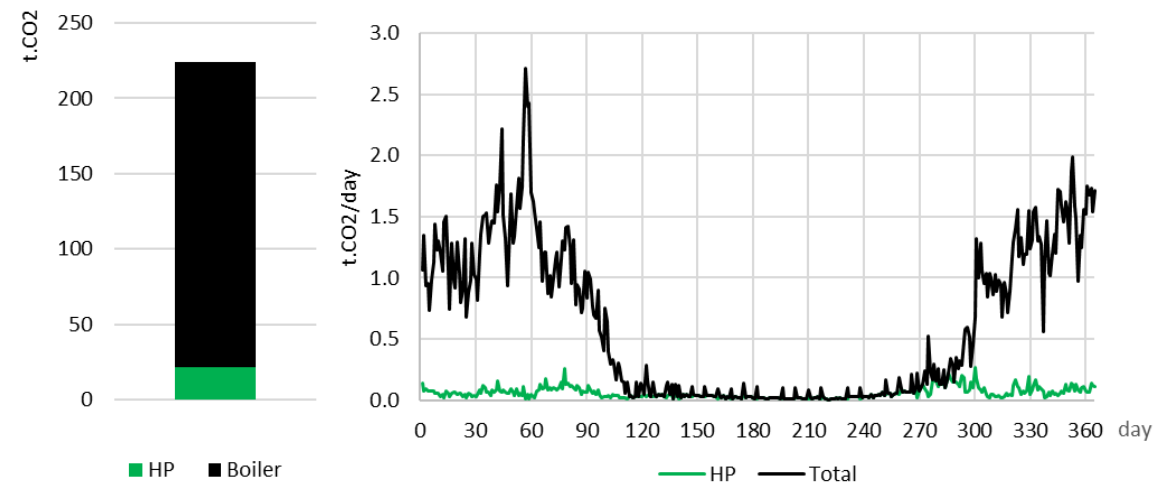
Quartier «Les Auréa» (Carouge, GE)

Bilans énergie et CO₂ pour 4 bâtiments :

Production de chaleur ➔ PAC : 45%



Emissions de CO₂ ➔ PAC : 10%



Mix électrique Suisse*:
107 gCO₂-eq/kWh.él (moy. annuelle)
Gaz :
228 gCO₂-eq/kWh (PCS)

Répartition des besoins de chaleur :

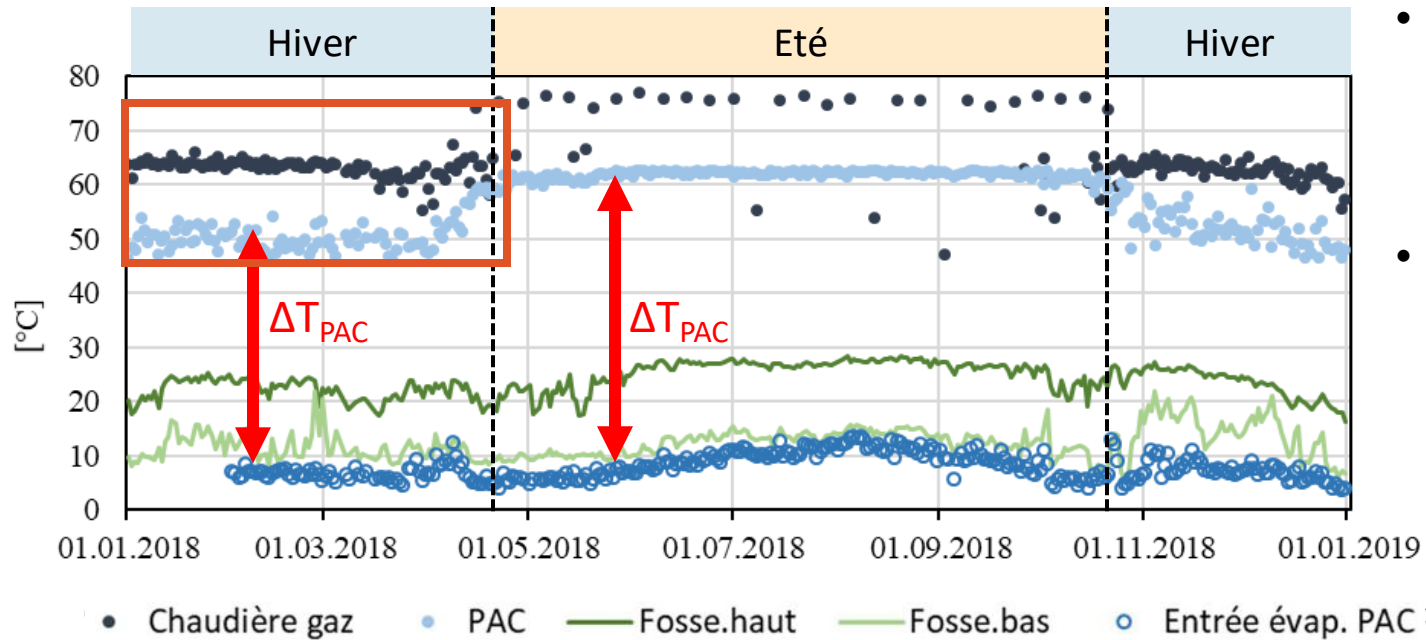
- ECS : 59% ➔ % ECS élevé !
- Chauffage : 41%

➔ Potentiel de réduction des émissions en augmentant la couverture PAC

* Contenu horaire en CO₂ du mix électrique suisse, issu de l'étude de Romano et al., 2018 (<https://archiveouverte.unige.ch/unige:131622>), tenant compte des imports/exports avec les pays voisins.

Quartier «Les Auréa» (Carouge, GE)

Niveaux de température été / hiver :
(valeurs journalières)



- **Eté :**
 - PAC : 63°C (ECS)
 - Chaudière : 75°C (anti-légionelles, 2h/semaine)
- **Hiver :**
 - PAC : 45°C (chauffage) ou 55°C (charge ballon)
 - Chaudière : 63°C (ECS) + 75°C (anti-légionelles, 2h/semaine)

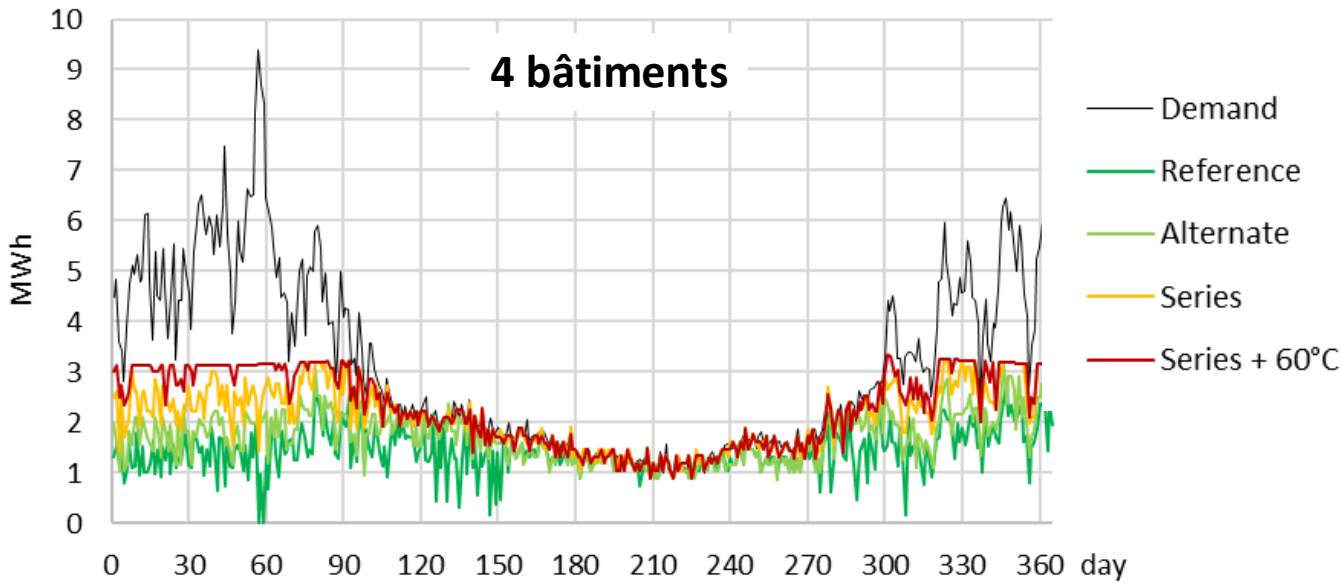
Possibilités d'augmentation de la couverture PAC :

- ➔ Consigne de production PAC en hiver
- ➔ Stratégie de régulation PAC / chaudière

Quartier «Les Auréa» (Carouge, GE)

Optimisation de la production de chaleur (simulations numériques) :

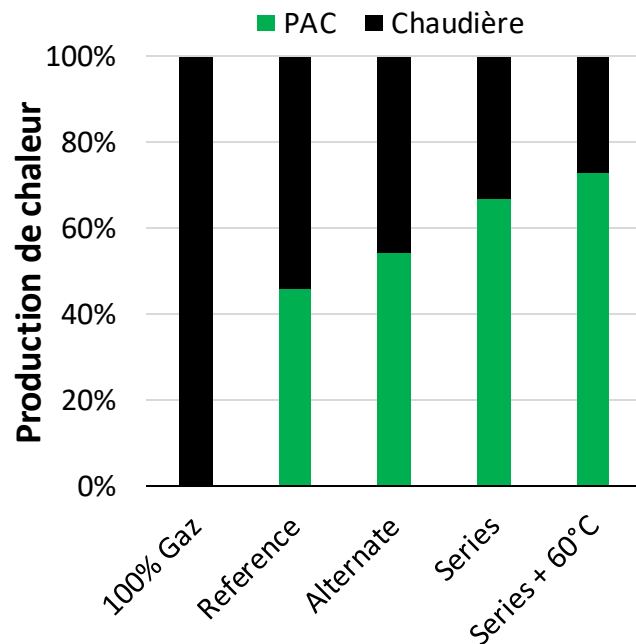
Scénario	T° PAC	PAC / chaudière	T° CAD
Référence	63°C / 45°C	Alternatif	≤ 65°C
Alternatif	63°C	Alternatif	≤ 65°C
Série	63°C	Série	≤ 65°C
Série + 60°C	63°C	Série	≤ 60°C



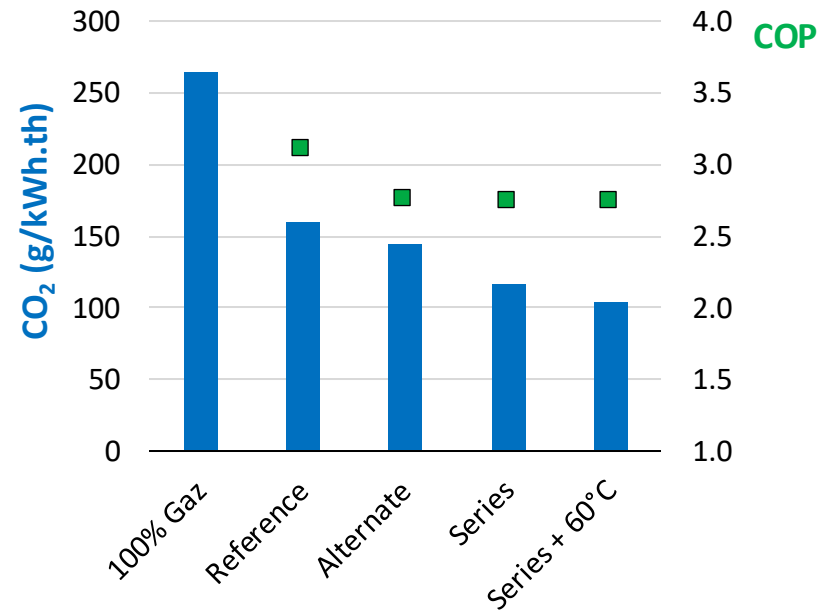
Quartier «Les Auréa» (Carouge, GE)

Optimisation de la production de chaleur (simulations numériques) :

Couverture PAC



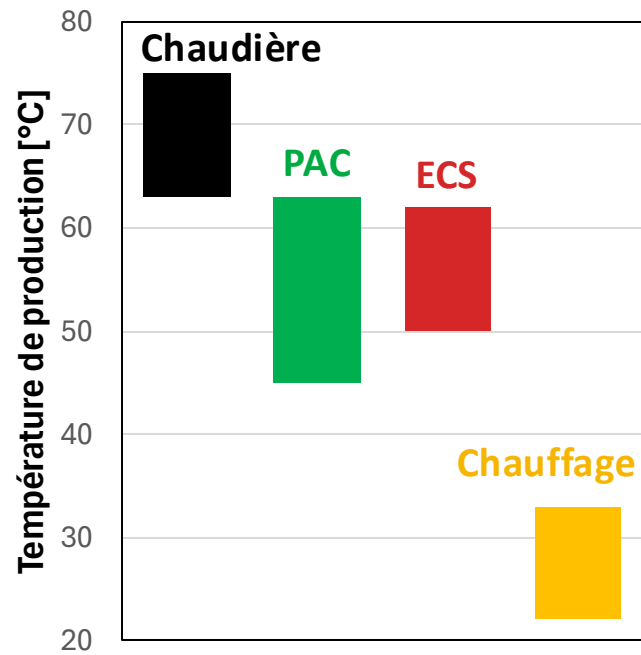
Emissions (g.CO₂-eq/kWh_{th})



- ➔ Jusqu'à 70% de couverture PAC
- ➔ Réduction des émissions de CO₂, malgré la diminution du COP
- ➔ Réduction importante des émissions par rapport à un système 100% gaz

Quartier «Les Auréa» (Carouge, GE)

Températures de production de chaleur :



Température aller du CAD contrainte par la production d'ECS
➔ Quelles alternatives pour abaisser la température du CAD ?

Quartier «Les Vergers» (Meyrin, GE)

- **Bâtiments :**

- 33 bâtiments neufs (Minergie A et/ou P)
- Logements, commerces,...
- SRE totale : 170'400 m²

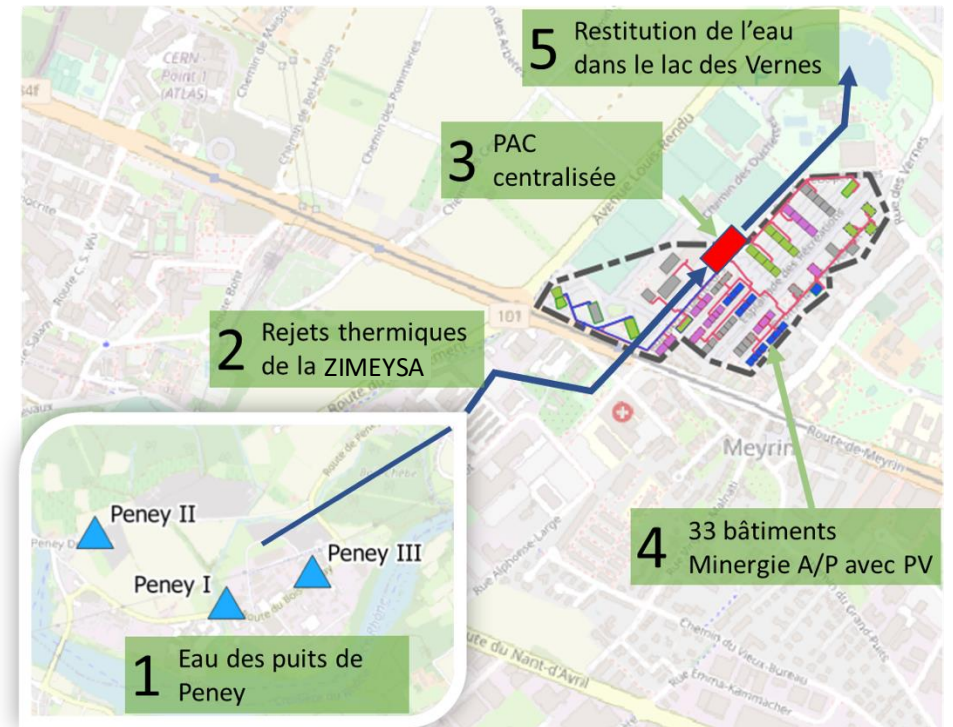
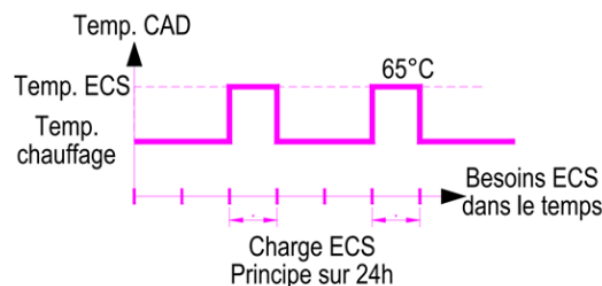
- **Production de chaleur :**

- Pompe à chaleur sur nappe (5 MW_{th})
→ Objectif de couverture > 80%
- Réseau structurant CADSIG
→ Appoint/secours

→ Chaleur produite : ≈ 8-10 GWh/an

- **Température du CAD :**

- Mode ECS : 65°C (2 x 2h / jour)
- Mode chauffage : 50°C



Rapport : Schneider et al., 2022, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:164877>

Quartier «Les Vergers» (Meyrin, GE)

Production de chaleur (en 2019-2020) :

- Mode ECS (65°C) : 4.1 GWh (52%)
- Mode Chauffage (50°C) : 3.9 GWh (48%)
- Couverture PAC = 85%
(pannes, utilisation chaleur fatale CADSIG en été)

Efficacité de la PAC centralisée (valeurs annuelles) :

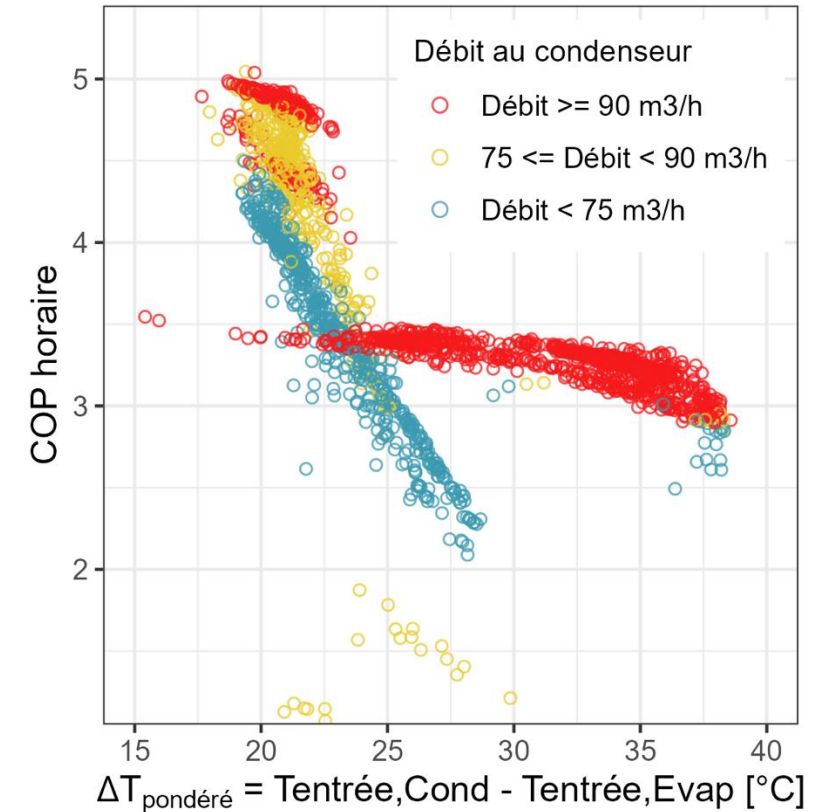
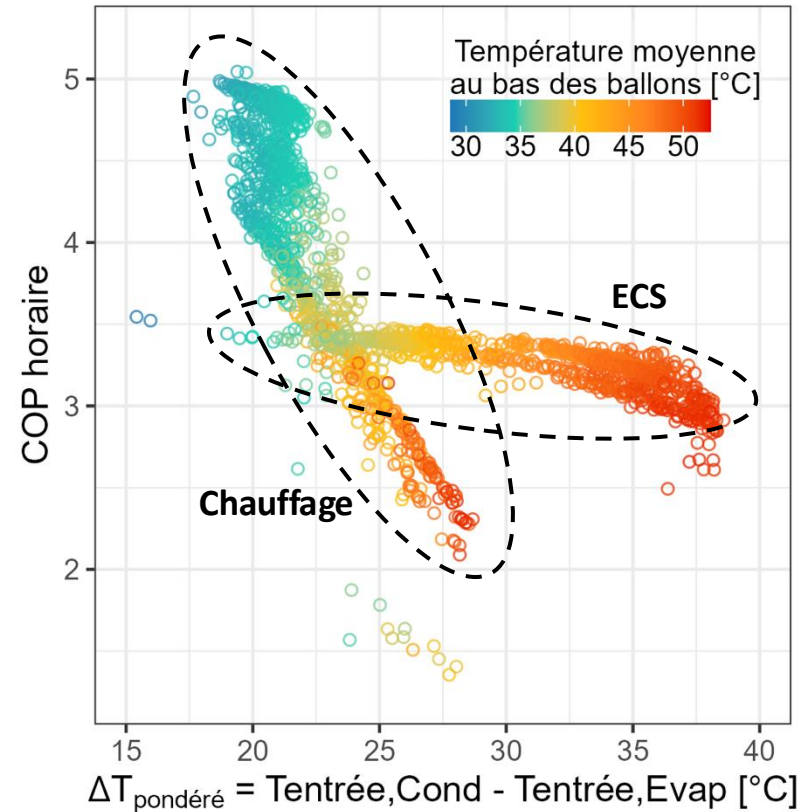
- COP ECS : 3.3
- COP Chauffage : 4.3
- ➔ **COP ECS + Chauffage $\approx$ 3.8**
($\approx$ +15% par rapport à un CAD à 65°C sans batchs ECS)

Batchs ECS :

- ➔ Réduction de la consommation d'électricité de la PAC
- ➔ Stratégie peut poser des problèmes d'inconfort pour les habitants

Quartier «Les Vergers» (Meyrin, GE)

Efficacité de la PAC centralisée :
(valeurs horaires)

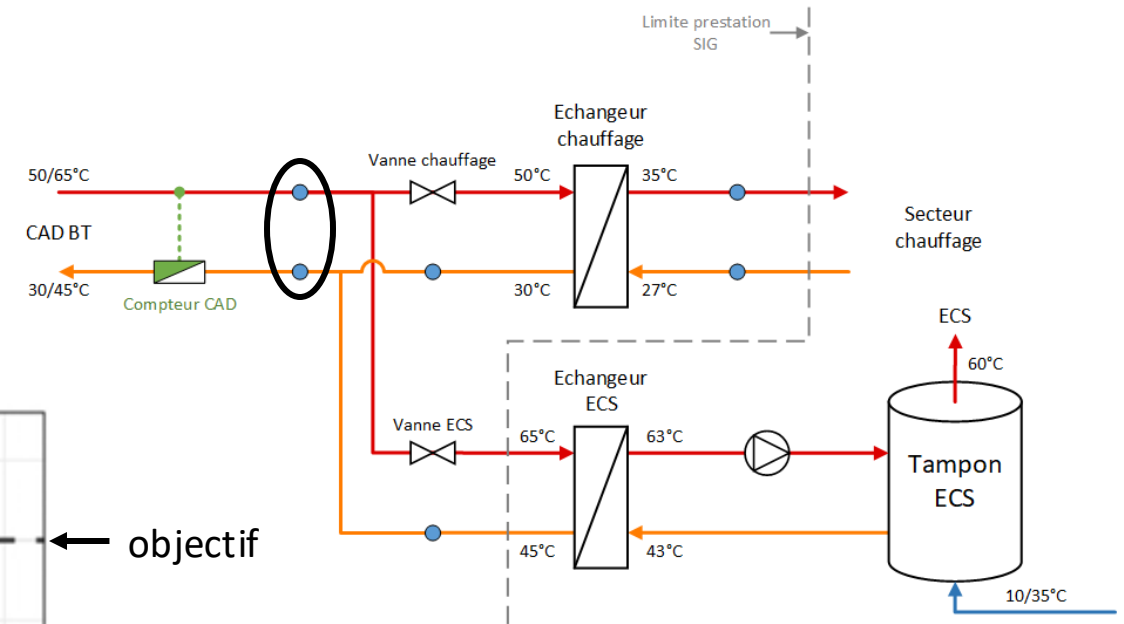
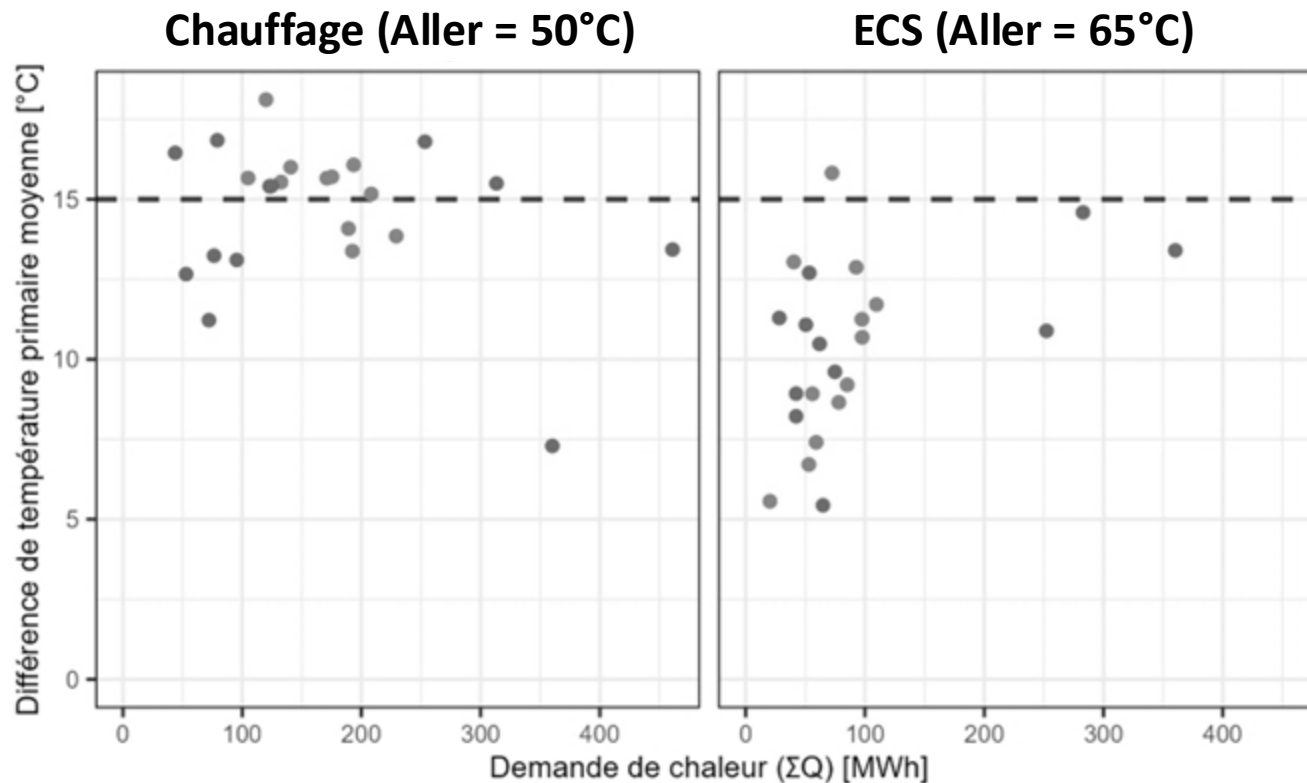


COP en chauffage parfois fortement pénalisé par :

- ➔ Température de retour élevées
- ➔ Débit condenseur faible (= faible demande de chaleur)

Quartier «Les Vergers» (Meyrin, GE)

Niveaux de température des sous-stations :

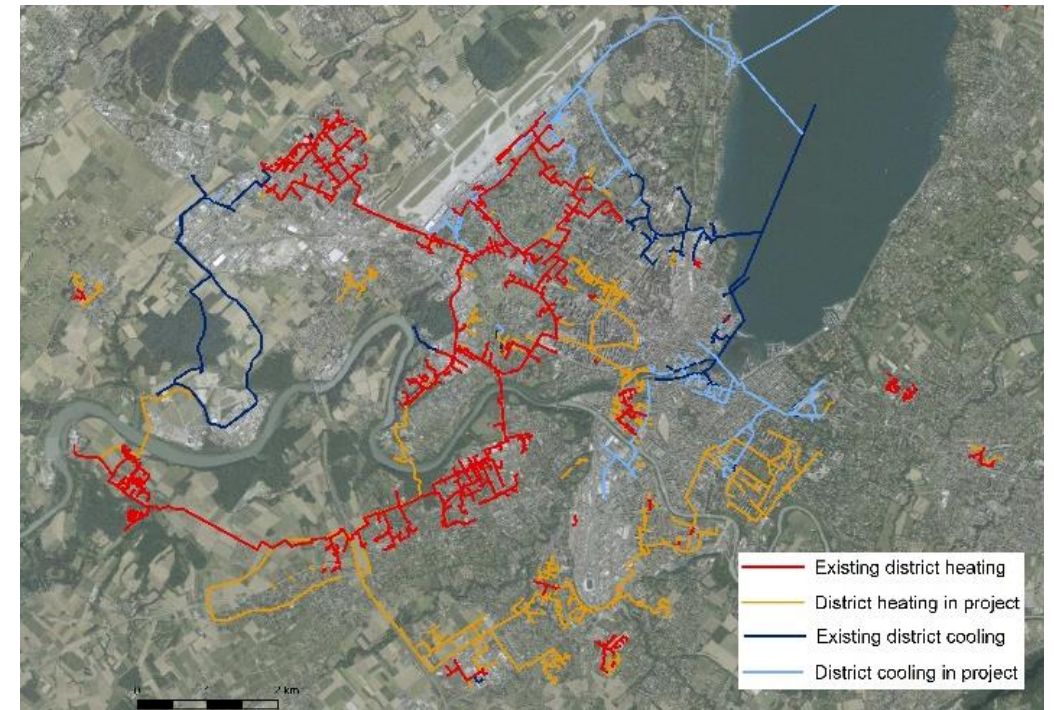


- ➔ **Chauffage** : Globalement satisfaisant
- ➔ **ECS** : Optimisation permettrait d'éviter les interruptions de la PAC centralisée et d'améliorer son COP

Réseau de chaleur CADSIG (GE)

- **Bâtiments :**
 - Bâtiments existants (> 90%) et neufs
→ 214 sous-stations
 - Logements, commerces, administration,...
 - SRE totale : 3'300'000 m²
- **Production de chaleur :**
 - Récupération chaleur fatale incinération déchets (60 MW)
 - Chaudières à gaz (160 MW)

→ Chaleur produite : 359 GWh (en 2021)
- **Température du CAD (aller/retour) :**
 - Actuelles : 110/70°C
 - Objectif : 90/45°C



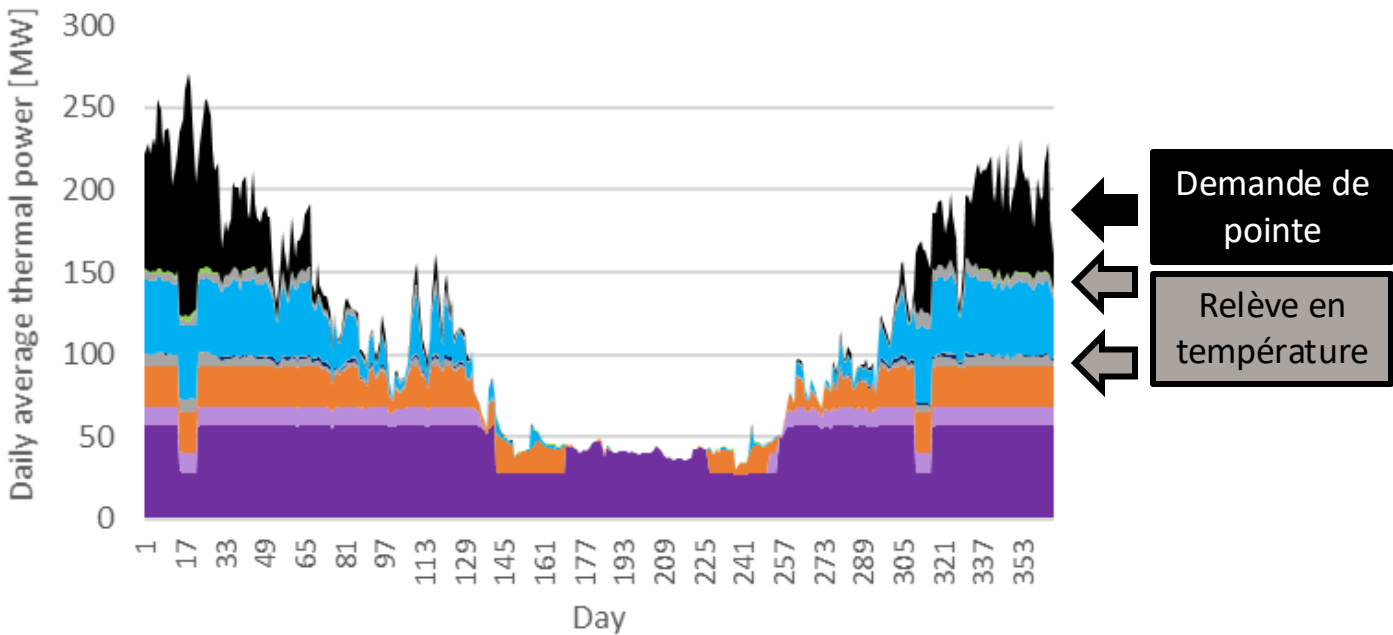
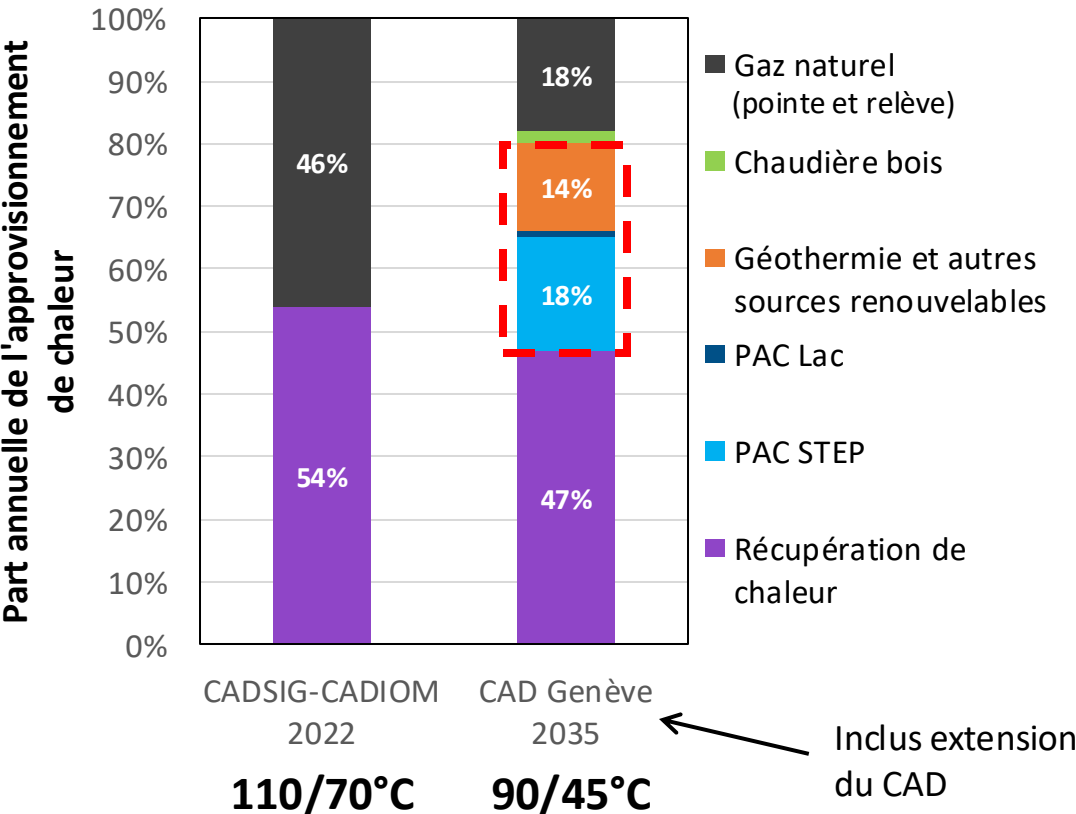
Rapport : Callegari et al., 2023, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:172333>

Réseau de chaleur CADSIG (GE)

Objectifs pour la production de chaleur :

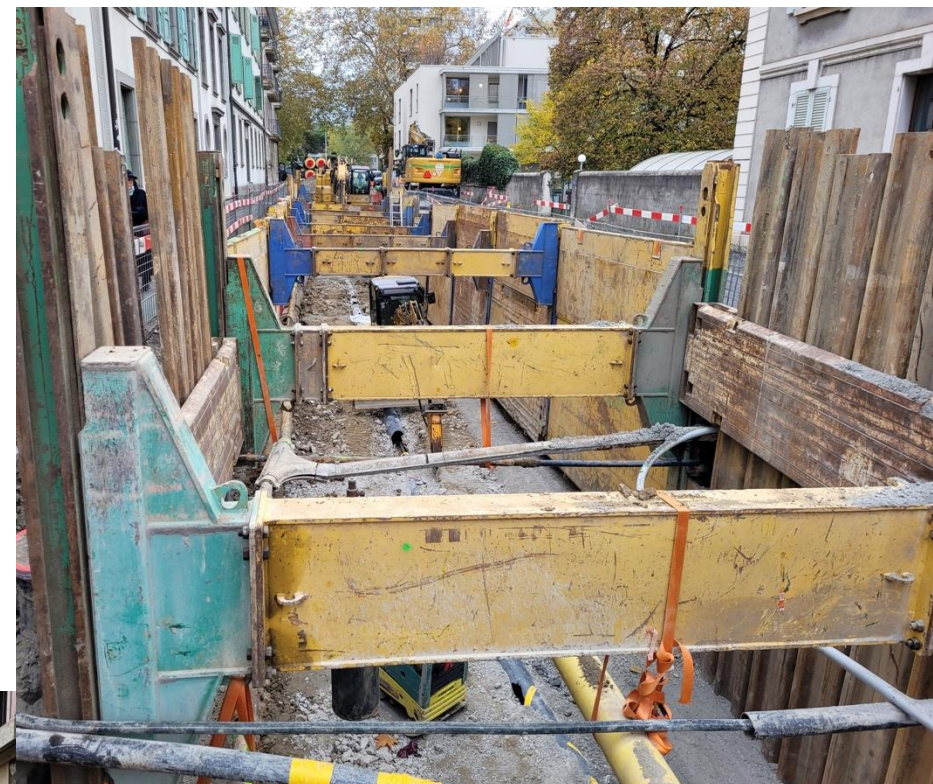
CAD existant	Extension CAD	Part renouvelable*
> 100°C	> 100°C	71%
> 100°C	< 100°C	80%
< 100°C	< 100°C	82%

* Incluant élec. PAC



➔ Abaissement des températures aller/retour essentiel pour intégrer les renouvelables

Réseau de chaleur CADSIG (GE)

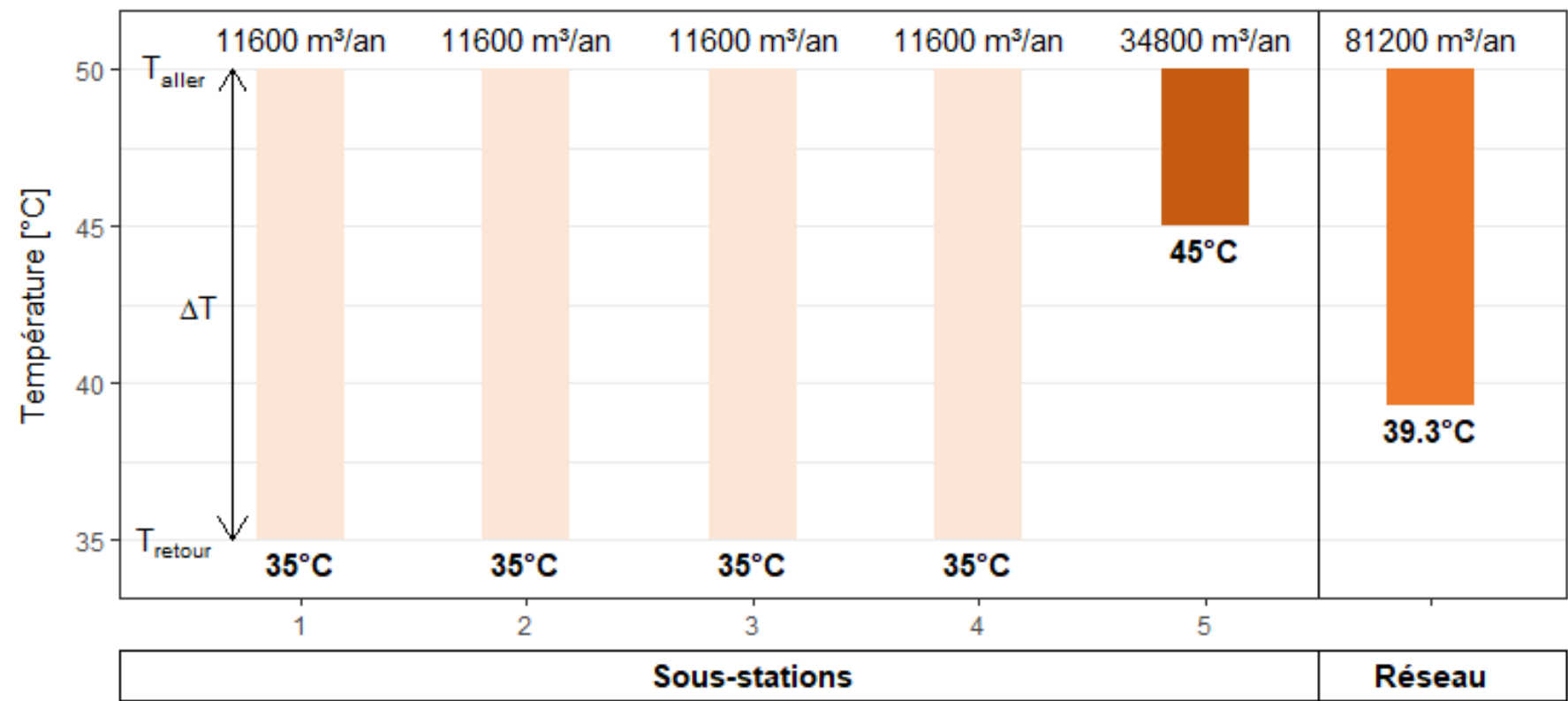


Réseau de chaleur CADSIG (GE)

Identification des sous-stations à optimiser : méthode

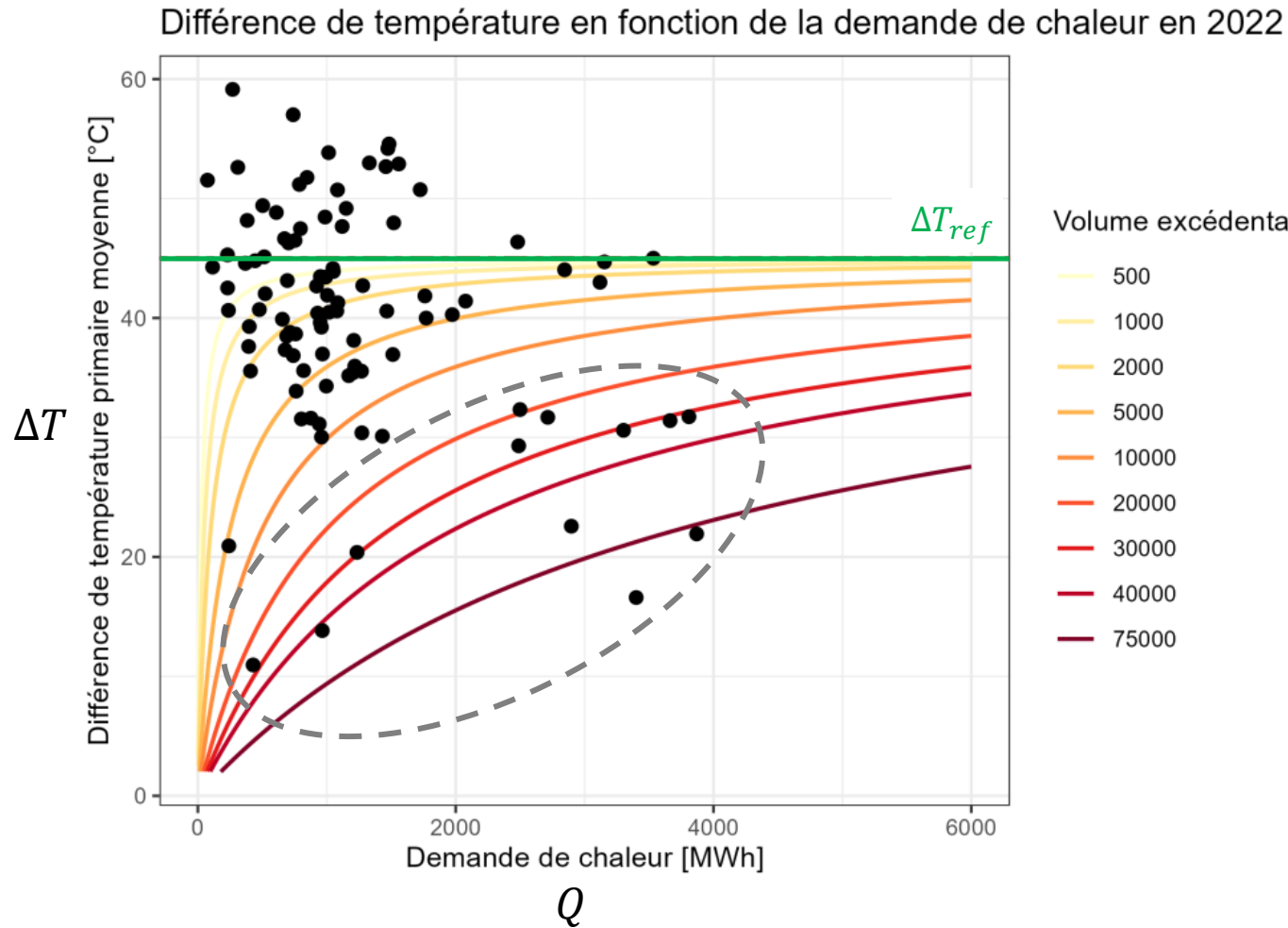
Exemple d'un réseau de 5 SST avec le même demande chaleur

➔ Comparer les volumes consommés et ΔT des SST pour identifier celles qui réchauffent le retour du CAD



Réseau de chaleur CADSIG (GE)

Identification des sous-stations à optimiser : classement



Données du compteur de
facturation de la SST

$$Q = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T = V_{ref} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T_{ref}$$

$$\Rightarrow V_{excédentaire} = V - V_{ref}$$

➔ Visiter les SST qui posent problème pour identifier la cause des températures élevées

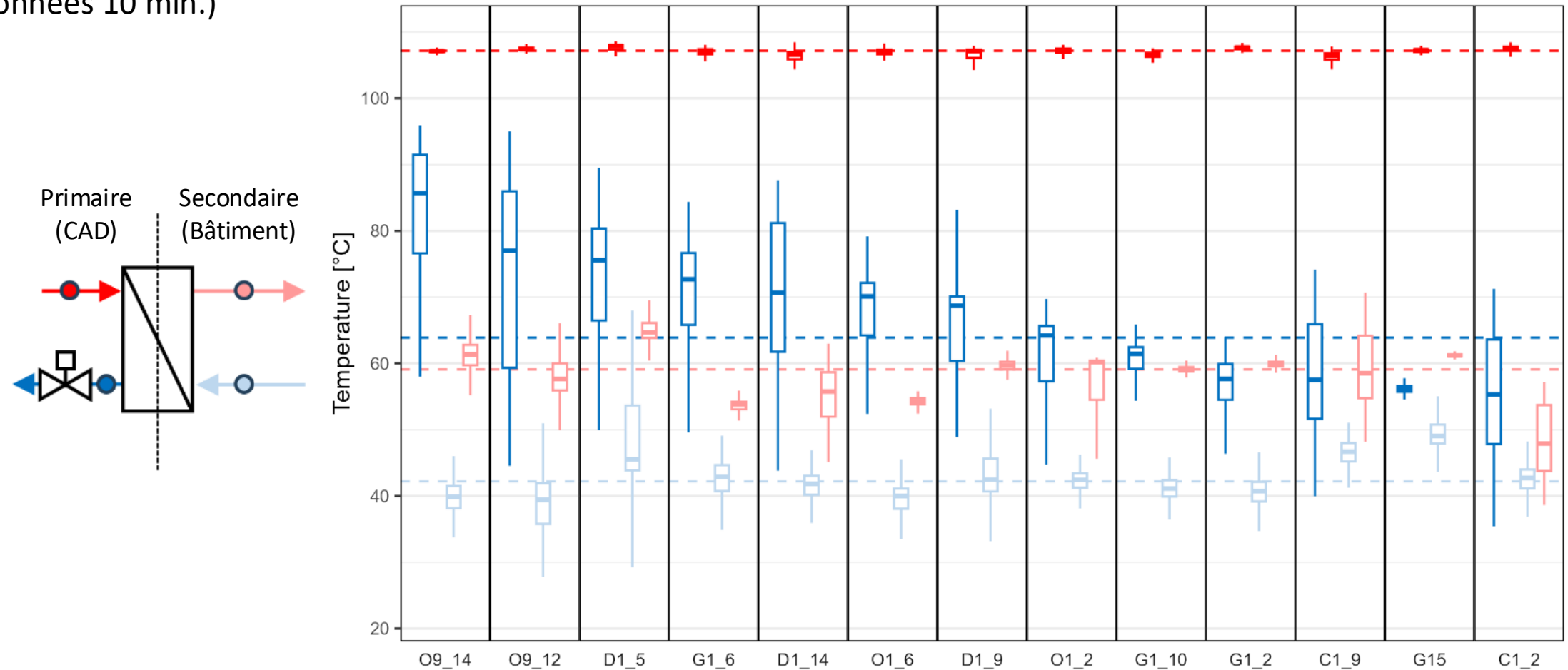
Réseau de chaleur CADSIG (GE)

Campagne de mesures de sous-stations :

Avanchets – décembre 2022

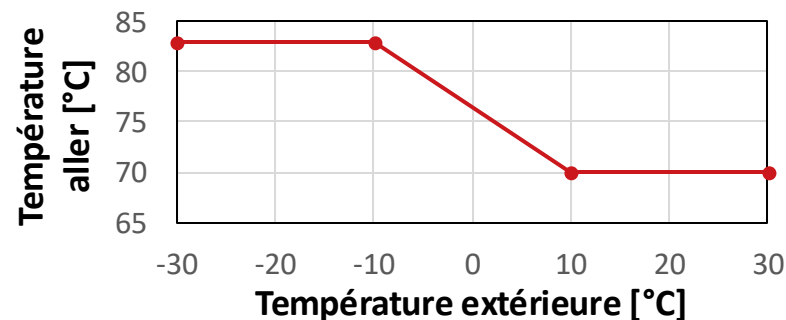
(données 10 min.)

- **Retours secondaires** relativement faibles, donc problème pas toujours lié au secondaire
- **Retour primaire** parfois trop élevé pour intégration facile du renouvelable



Réseau «Le Marais-Rouge» (Ponts-de-Martel, NE)

- **Bâtiments :**
 - Bâtiments existants (> 98%) et neufs
→ 88 sous-stations
 - Logements, commerces, administration,...
- **Production de chaleur :**
 - Chaudière à bois (2.25 MW) avec récupération de chaleur des fumées
→ Chaleur produite : 5.8 GWh (en 2019)
- **Température du CAD (aller/retour) :**
 - En hiver : 80/40°C
 - En été : 70/55°C



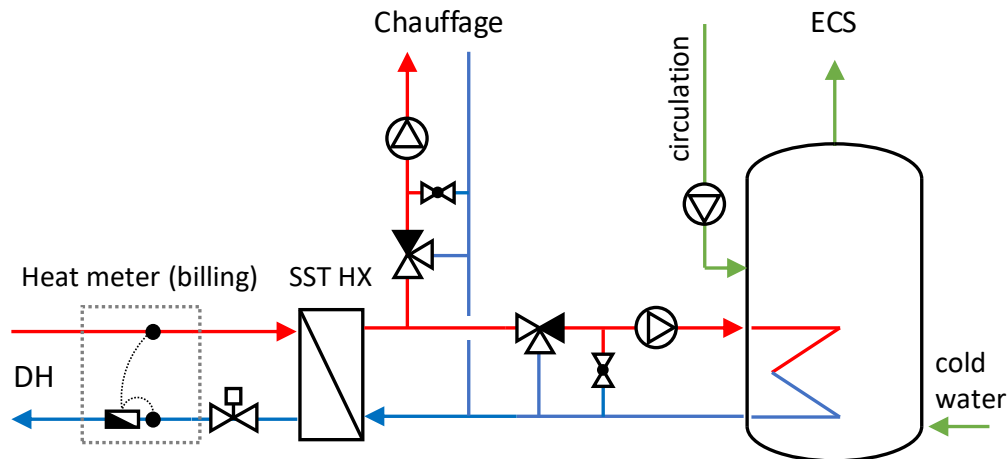
Rapport : Callegari et al., 2023, <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:172333>

Réseau «Le Marais-Rouge» (Ponts-de-Martel, NE)

Architecture des sous-stations :

SST type CADSIG

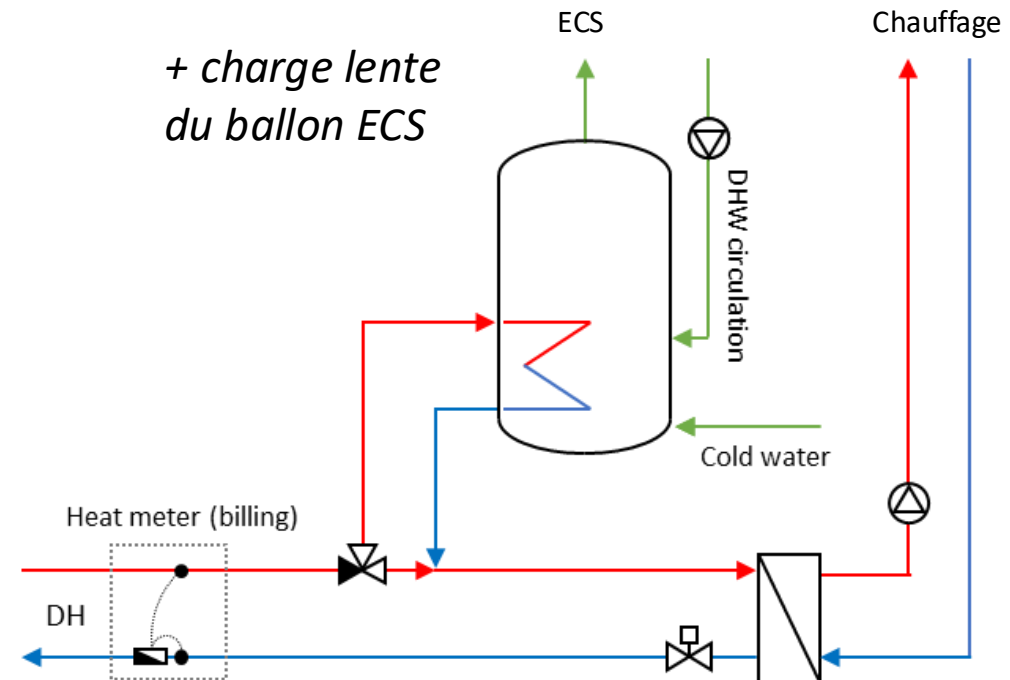
Un HX principal et un HX en série pour l'ECS



SST type Marais-Rouge

Deux HX en cascade pour l'ECS et le chauffage

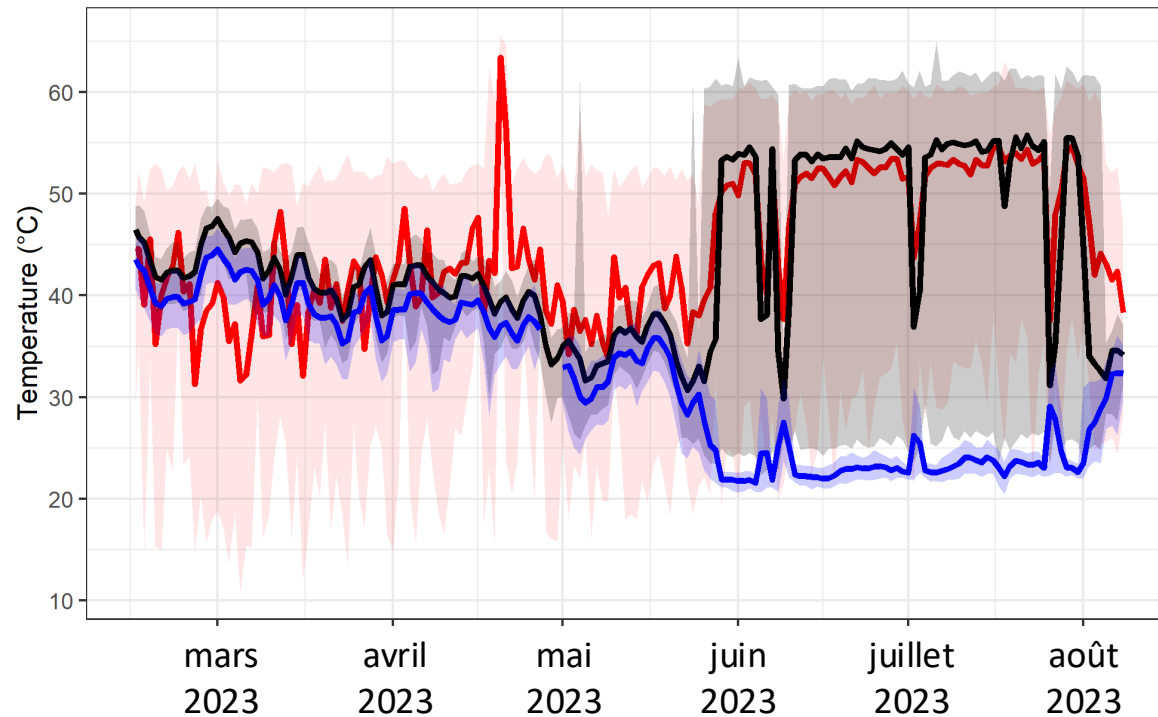
*+ charge lente
du ballon ECS*



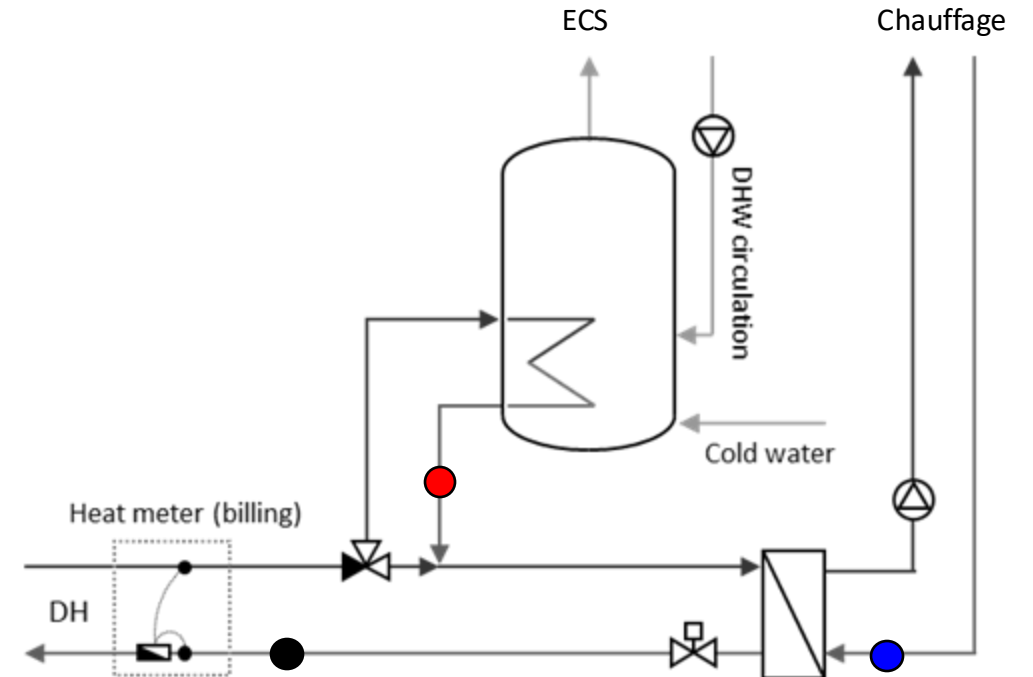
➔ Quel effet sur les températures de retour ?

Réseau «Le Marais-Rouge» (Ponts-de-Martel, NE)

Températures de retour mesurées sur une SST :



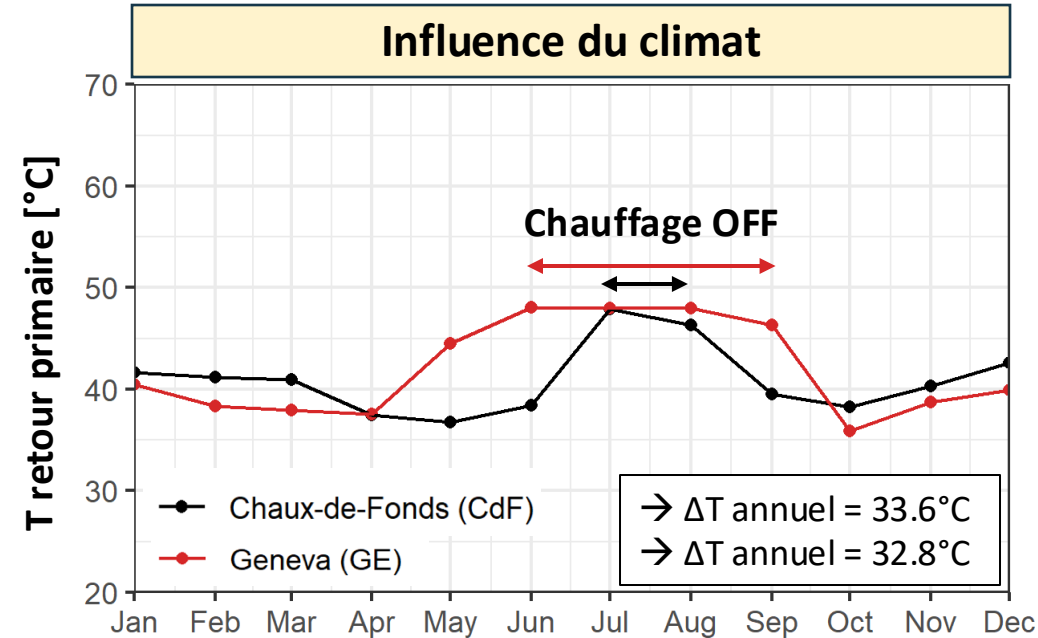
(Moyennes journalières pondérées et min/max)



- ➔ **Température sortie ballon** relativement faible (32-48°C), surtout en hiver
- ➔ **Température retour CAD** suit la **température retour chauffage**

Réseau «Le Marais-Rouge» (Ponts-de-Martel, NE)

Comparaison de la SST pour le climat de Genève (simulations numériques) :



- ➔ Architecture de SST particulièrement intéressante pour les climats froids
- ➔ Limite les retours chauds liés à l'ECS
- ➔ ECS à ne pas négliger hors saison de chauffe

Perspectives

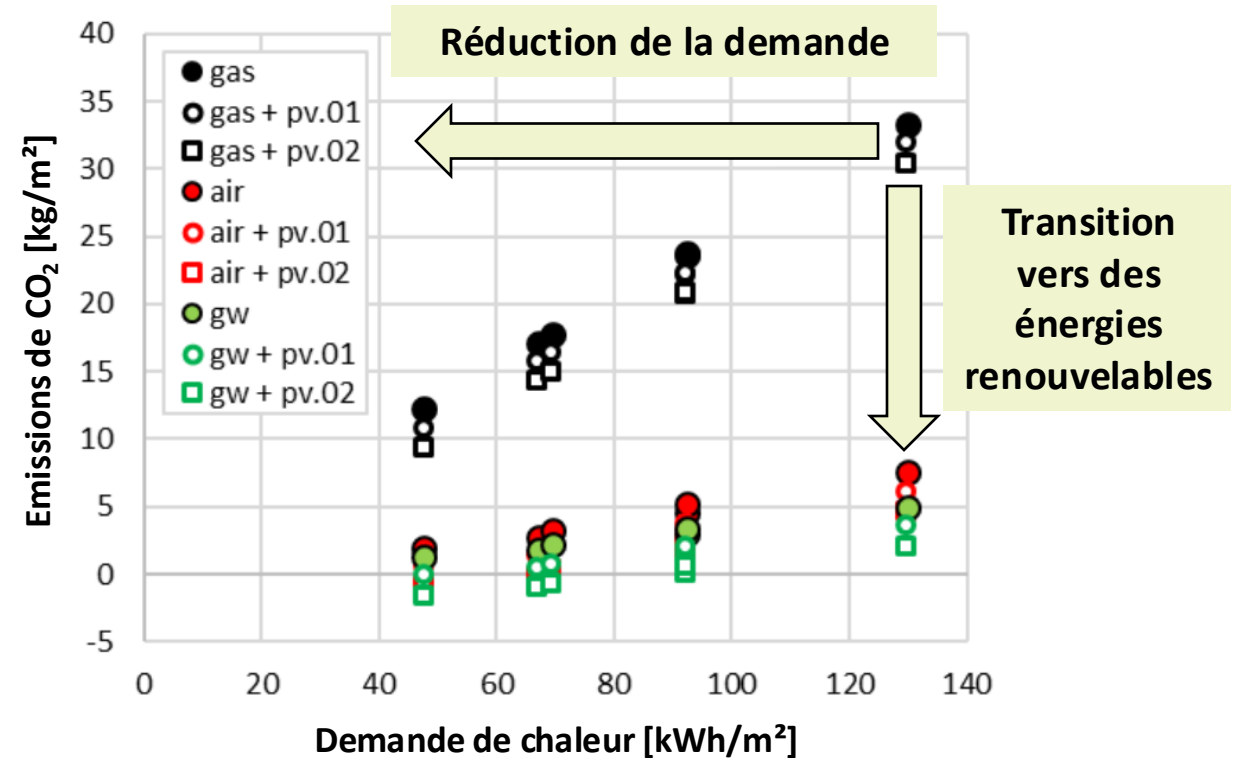
Besoin de décarboner la production de chaleur pour les bâtiments :

- Hautes températures pénalisent ou empêchent l'opération des producteurs de chaleur renouvelables
- Coûts élevés de la rénovation de l'enveloppe

Projet T-DROP (en cours) :

- ➔ Identifier les mesures clés pour réduire les niveaux de température de distribution de chaleur (selon le système et la typologie de bâtiment)
- ➔ Evaluer l'impact de ces mesures (part renouvelable, émissions de CO₂, coûts)

Lien vers le projet : <https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=51847>



Area related CO_{2eq} emissions for various multifamily buildings vs heat production with gas boiler, air source HP or groundwater source HP (with and without PV), *Romano et al., 2020*

Source: Romano et al., 2020. <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:136512>

Conclusions

Retours d'expérience :

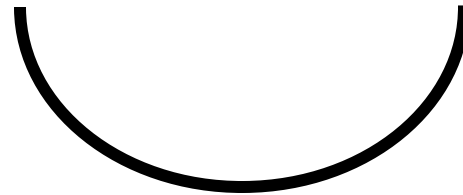
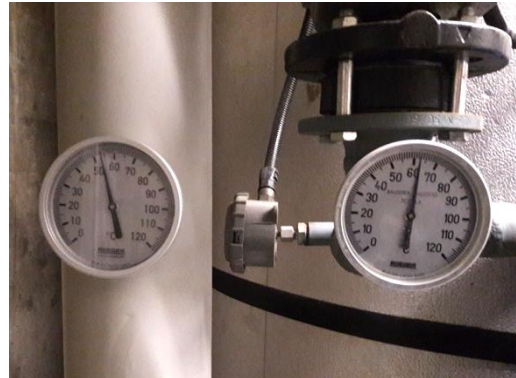
- Problèmes liés aux niveaux de température **dans l'existant comme dans le neuf**
- **ECS contraignant** et pénalisant → à ne pas négliger
- **Optimisations** parfois possibles en modifiant seulement la **régulation**
- **Assurer un suivi** pour identifier et résoudre rapidement les problèmes

Les solutions existantes permettent en principe déjà d'opérer à des températures relativement faibles.

Besoin de :

- Prise de conscience
- Clarification des bonnes pratiques
- Priorisation des mesures à implémenter
- Partage d'expérience
- Formation
- Suivi

Merci



pauline.brischoux@unige.ch

Sources



La Fontenette – « Les Auréa » :

Analyse technique et sociale d'un complexe d'immeubles
HBM de haut standard énergétique, équipé d'une PAC
centralisée sur eaux usées

Simon Callegari
Raphaël Pieroni
Fleury de Oliveira
Patrick Naef
Pierre Hollmüller

Université de Genève
Février 2021

Étude réalisée sur proposition de la Commission Énergie de la Commission
Administrative des Fondations Immobilières (CAFI)

Sous mandat de
Fondation HBM Emma Kar
Office cantonal de l'énergie de
Services Industriels de G



Optimization of SPF or CO₂ emissions? Impact of control strategies on a bivalent waste water heat pump system for high energy standard buildings

Simon Callegari¹, Fleury de Oliveira, Pauline Brischoux, Pierre Hollmüller

Grupos System Energéticos, Universidade de Oporto, Bd. Camões 66, CH - 1211 Genève 4, Switzerland

Abstract

While heat pump (HP) systems could be a main solution to achieve the energy transition, their operation in actual condition of use still face specific issues, in particular when integrated in multi-energy systems with fossil complement. Based on detailed monitoring (hourly data, entire year), this paper concerns the monitoring and simulation of the heat production system of a new low energy multifamily buildings complex in Geneva - Switzerland, comparing a centralized HP on waste water (200 kW_{th}) and complementary gas boiler (600 kW_{th}). For SPF optimization reasons and in order to take advantage of the lower space heating temperatures, a seasonally differentiated operation mode was planned for the HP, with a lower temperature production setpoint to winter than in summer (when only domestic hot water is needed). However, this does in fact limit the operation of the HP to short periods, and leads to a lower HP share (45%) than expected. By way of numerical simulation, we show that alternative operation modes could induce a higher share of HP production, up to 70%. Despite a possible drop in SPF from 3.2 in the current situation to 2.7 when maximizing the heat pump production, we highlight that this could actually lead to a better system performance in terms of CO₂ emissions, when taking into account the related reduction in gas consumption of the complementary gas boiler, as well as the actual hourly electricity mix for the HP.

© HPC2023.

Selection and/or peer-review under the responsibility of the organizers of the 14th IEA Heat Pump Conference 2023.

Keywords: waste water; heat recovery; HP performance; bivalent system; in-situ monitoring; simulation; system analysis; CO₂ emissions.

1. Introduction

1.1. Context and issues

In the canton of Geneva, CO₂ emissions from the energy system represent about 4.2 t/capita, of which 2.2 are emitted by the building heat supply sector, 1.1 by the transport sector (excluding the airport), and 0.8 by the electricity sector [1]. As a result, the greatest potential for reducing CO₂ emissions lies in the building heat supply sector, which also accounts for nearly half of the final energy consumption delivered to consumers. In 2018, the energy consumption of this sector (climate adjusted) amounted to 5'300 GWh or 10.6 MWh/capita, and was mainly based on fossil fuels.

One of the options to valorize local renewable resources is the use of heat pumps (HP). In 2018, this technology covered 1.7% of heat demand of the Canton of Geneva [3]. However, a lot of recent prospective scenarios [1, 2] shows that the development of HPs, in combination with other production methods such as medium-depth geothermal energy, the development of district heating networks, as well as the reduction of the demand for the building stock, would allow a reduction of CO₂ emissions related to this sector to about 1 t/capita by 2035, respectively 0.2 t/capita by 2050.

¹ Corresponding author
E-mail address: simon.callegari@unige.ch



Retour d'expérience énergétique sur le quartier des Vergers à Meyrin (Genève)

Rapport final

Stefan SCHNEIDER

Pauline BRISCHOUX

Pierre HOLLMÜLLER

Septembre 2021

Case Studies Heat Pumps in Multi Family Buildings

La Fontenette, Geneva – Switzerland

A centralized wastewater HP with a complementary gas boiler, for a high performance multifamily buildings complex, with heat distribution via a dedicated district heating system.

Key facts

Building
Location: Geneva, Switzerland
Construction: 2015-2020
Type: Multifamily building
Heat distribution: Underfloor heating
Heated area: 30'640 m²
Level of insulation: High performance
Heat production: 2 GWh_{th}/y (67 kWh/m²/y)

Heat pump and source
Number of HP: 1
Installed capacity: 200 kW_{th}
Operation mode: Bivalent with a 600 kW gas boiler
Heat source: Wastewater from the buildings

Heating system
SH share, demand: 37%, 22 kWh/m²/y
Heating temperature: Max. 35°C at -5°C

Domestic hot water
DHW share, demand: 63%, 43 kWh/m²/y
Type of system: Central per building
Max. temperature: 63°C
Circulation system: Yes

Other information
HP share, SPF: 53%, measured: 1.0
Investment costs: CHF 92 /m²
Heat cost (LCOE): CHF 10 /m²/year
PV installation: 210 kW
Double-flow vent: 80% efficiency

Lessons learned

- Use of innovative HP source (wastewater) in combination with fossil fuels needs careful cooperation of stakeholders regarding the system's regulation and its optimization.
- HP covers a high share of the heat production with this local heat source.

Delivered by: Energy systems group (University of Geneva)

<https://www.unige.ch/ysener>



While heat pump systems control the CO₂ emissions of Geneva's district heating network, we monitored their performance in real time. We monitored this new low energy system. SH demand and DHW supply are For SH that can be explained by the norm (higher indoor temperature supply is certainly high, but buildings in Geneva.



In-situ monitoring of a groundwater heat pump for a low-temperature district heating network: energy performance, issues and challenges

Pauline Brischoux^{1,*}, Stefan Schneider², Pierre Hollmüller³

¹University of Geneva, 66 Bd Carl-Vogt, 1205 Geneva, Switzerland

Abstract

With the development of district heating networks and the need for decarbonization, heat pumps in district heating are expected to play a major role in the upcoming years. To facilitate the implementation of such systems by sharing lessons learned, this study presents monitoring results of a large-scale heat pump supplying a low-temperature district heating network (LTDH) in Switzerland. Detailed monitoring over a whole year of operation reveals an annual heat production of 1 GWh_{th}, of which 57% is covered by the heat pump with an annual SPF of 3.0 (pumping and auxiliary excluded). However, about 25% of the heat for space heating is produced with very low energy performance. Analyzing the influence of temperatures and flow rates on the heat pump energy performance brings to light potential optimizations of the system and improvements for future LTDHs. In particular, the results raise critical questions related to heat pump sizing and domestic hot water production methods with LTDHs, as well as the need for decarbonization. HP are expected to play a major role in the upcoming years. Heat Readmap Europe 2050 (HRE2050) prospective scenario [2] shows that DH could cost-effectively cover 50% of the total heat demand by 2050, compared to 12% currently, with 25% of the heat supplied by large-scale HP (200 TWh/year with a COP of 3 and a total capacity of 40 GW_{th}).

Large-scale HP are already in use across Europe for the supply of DH networks. A study made in 2017 [3] identifies 149 units (1.1 GW_{th}) across 11 European countries, installed between 1991 and 2016, for a total capacity of 1.4 GW_{th} (71 times lower than the HRE2050 scenario). This study also shows that even large-scale HP were commissioned in the last decade in several countries such as Finland, France, Denmark and Italy.

1. Introduction

1.1. Context

In 2015, around 45% of the total European energy consumption was due to the heat supply of buildings for space heating and domestic hot water, and was based at 66% on fossil fuels [1]. This sector hence represents a huge potential for the reduction of greenhouse gas emissions. District heating networks (DHN) have long been recognized as a means to decarbonize the heat supply in dense urban areas, as it allows the use of waste heat, which would otherwise be rejected in the environment, and facilitates the integration of renewable energies.

However, renewable energy sources such as geothermal heat, solar surface or underground water are often available at low temperature, unfit for direct use. Thus, their integration into building heat supply often requires a temperature lift with a heat pump (HP), either centralized or decentralized.

Therefore, with the development of DH and the need for decarbonization, HP are expected to play a major role in the upcoming years. Heat Readmap Europe 2050 (HRE2050) prospective scenario [2] shows that DH could cost-effectively cover 50% of the total heat demand by 2050, compared to 12% currently, with 25% of the heat supplied by large-scale HP (200 TWh/year with a COP of 3 and a total capacity of 40 GW_{th}).

Large-scale HP are already in use across Europe for the supply of DH networks. A study made in 2017 [3] identifies 149 units (1.1 GW_{th}) across 11 European countries, installed between 1991 and 2016, for a total capacity of 1.4 GW_{th} (71 times lower than the HRE2050 scenario). This study also shows that even large-scale HP were commissioned in the last decade in several countries such as Finland, France, Denmark and Italy.

^{*} Corresponding author
E-mail address: pauline.brischoux@unige.ch

Case Studies
Heat Pumps in Multi Family Buildings

Annex 62 IEA EBC

Les Vergers, Geneva – Switzerland

An eco-district including 33 high performance buildings heated by a 5 MW_{th} HP on shallow groundwater.

Key facts

Building
Location: Geneva, Switzerland
Construction: 2015-2020
Type: Multifamily building
Heat distribution: Underfloor heating
Heated area: 17'070 m²
Level of insulation: High performance

Heat pump and source
Number of HP: 1
Installed capacity: 5000 kW_{th}
Operation mode: Monovalent
Heat source: Ground water & heat recovery
Heat source: Geneva's main DH (gas boilers & waste incineration)

Heating system
SH share, demand: 64%, 46 kWh/m²/y
Heating temperature: Max. 35°C at -5°C

Domestic hot water
DHW share, demand: 36%, 26 kWh/m²/y
Type of system: Central per building
Max. temperature: 60°C
Circulation system: Yes

Other information
HP share, SPF: 85%, measured: 3.7
Investment costs (LCOE): CHF 15 /m²
Heat cost (LCOE): CHF 12 /m²/year
PV installation: Double
Double-flow vent: Single
Double-flow vent: decent
exhaust heat

Keywords
waste water; return temperature; season in SH mode, at 15°C (at 15°C) causes a drop in SPF, or causes HP to be oversized

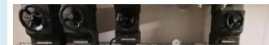
Keywords
waste water; return temperature; season in SH mode, at 15°C (at 15°C) causes a drop in SPF, or causes HP to be oversized

Energy systems group



"Les Vergers" is an eco-district composed of 33 high performance buildings, whose main heat source is a low temperature district heating network. This network is mainly supplied by a water-to-water HP using two resources: groundwater from the Rhone River and waste heat from the neighboring industries.

The results show that this eco-district is in line with the cantonal energy master plan, both in terms of building energy efficiency and massive integration of renewable energies.



Strategies and potentials of temperature reduction on existing district heating substations: two case studies

SWEET DeCarbCH
Deliverable D7.1.2



S. Callegari¹, R. Novoa-Herzog², S. Schneider¹, P. Brischoux¹, A. Duret², X. Jobard², P. Hollmüller¹

¹ Université de Genève, Groupe Systèmes Énergétiques
² Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Laboratoire d'Énergétique Solaire et de Physique du Bâtiment

October 2023



UNIVERSITÉ DE GENÈVE