



Rapport final du 12 août 2020

Système de pompe à chaleur sur capteurs solaires non-vitrés

Exploitation optimale de l'énergie solaire et de la récupération de chaleur sur la ventilation via un stock de glace



Source: photo toiture chemin du Velours 22 à Genève



Système de pompe à chaleur sur capteurs solaires non-vitrés



GANDOLFI CILACIAN ARCHITECTES



Perenzia

Date : 12 décembre 2019

Lieu : Chemin du Velours 22, Conches (GE)

Prestataire de subventions :

Confédération suisse, représentée par
L'Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme pilote, de démonstration et Programme-phare
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Fondation Arménia
Avenue de Champel 23
1206 Genève www.armenian.ch/index.php?id=foundation_armenia
(Maitre d'ouvrage)

Construction Perret SA
Route du Bois-de-Bay 38
1242 Satigny
www.cpsa.ch

Energie Solaire SA
ZI Ile Falcon
Rue des Sablons 8
3960 Sierre www.energie-solaire.com

Thermex SA
Route de Montfleury 46
1214 Vernier
www.thermex.ch

Amstein & Walthert SA
Rue du Grand-Pré 54-46
1211 Genève
www.amstein-walthert.ch

Perenzia Ingénieurs sàrl
Rte de Saint-Cergue 37
1260 Nyon
www.perenzia.ch



Auteurs :

Emile Martin, Perenzia Ingénieurs sàrl, emile.martin@perenzia.ch

Olivier Graf, Energie Solaire SA, o.graf@essa

Direction du programme de l'OFEN : Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

Suivi du projet pour l'OFEN : Vahé Nigolian, jv.nigolian@bluewin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501251-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport



Zusammenfassung

Die vorliegende Studie zielt darauf ab, die Leistung der Wärmeproduktion, die den Heiz- und Warmwasserbedarf eines 2016 in Genf gebauten Gebäudes mit 30 Wohnungen deckt, zu ermitteln und zu messen.

Das Gebäude befindet sich in einer verbotenen Zone, in der Bohrungen verboten sind, wobei die Möglichkeit der Installation von Erdwärmesonden ausgeschlossen ist. Die Alternative Luft-Wasser-Wärmepumpe könnte in Betracht gezogen werden, allerdings auf Kosten der Lärmbelästigung, die in der Stadt nur schwer zu bewältigen ist.

Die gespeicherte Wärmeproduktion besteht aus einer Wärmepumpe, die Energie aus der äußeren Umgebungsluft und der Sonneneinstrahlung mittels unverglaster Sonnenkollektoren auf dem Dach nutzt. Die problematische Phasendifferenz zwischen Wärmebedarf und Ressourcenverfügbarkeit wird mit Hilfe eines Phasenwechsel-Energiespeichers bewältigt, der bei niedrigen Temperaturen arbeitet. Dieses Konzept mit dem Namen ICESOL besteht seit einigen Jahren, und es wurden bereits andere Pilot- und Demonstrationsprojekte entwickelt (u.a. Minergie-P-Sanierung der "La Cigale"-Gebäude SI/500992).

Der innovative Aspekt des Projekts liegt in der Integration der Wärmerückgewinnung aus der Abluft der einflutigen Lüftung, die direkt mit diesem Kälteenergiespeicher verbunden ist. Der Vorteil ist die Maximierung der zurückgewonnenen Energie, ohne dass ein zusätzlicher Ventilator oder eine Wärmepumpe hinzugefügt werden muss. Bei ungünstigen Witterungsbedingungen vervollständigt ein Gaskessel als Hilfskessel die Wärmeerzeugung.

Die Motivation, das ICESOL-Konzept zu testen, rührt von der Tatsache her, dass es außer der Grundfläche der Solarpaneele auf dem Dach und den technischen Installationen im Keller (Phase-Change-Akkumulator) nur wenige Einschränkungen gibt. Die Effizienz und die Kosten der Wärmeerzeugung liegen zwischen denen von Erd- und aerothermischen Wärmepumpen. Dies scheint ein guter Kompromiss zwischen zwei Alternativen zu sein, die in direkter Konkurrenz zueinander stehen. Natürlich ist die Unterstützung des BFE unerlässlich, um einen Teil der zusätzlichen Kosten zu decken, die mit der technischen Entwicklung und Umsetzung dieses Pilotprojekts verbunden sind.

Eine Energieüberwachung der Wärmeerzeugungsanlage wurde 3 Jahre lang durchgeführt. Sie zeigte mehrere Probleme im Zusammenhang mit der Inbetriebnahme, dem Design und der Wartung des Gebäudes auf. In den meisten Fällen wurden Lösungen vorgeschlagen, um die Leistung der Wärmeerzeugungsanlage zu verbessern. Damit deckt die Wärmepumpe 60 bis 70 % des gesamten Wärmebedarfs des Gebäudes, der Rest entfällt auf Gas. Der Gaskessel wird mehr genutzt als erwartet, u.a. weil die Temperatur im Gebäude trotz Anpassungsversuchen auf 24°C überhitzt ist.

Nach mehreren Verbesserungen an der Anlage funktioniert die Wärmerückgewinnung aus der Abluft zufriedenstellend. Die Rückgewinnungseffizienz liegt in der gleichen Größenordnung wie bei einem traditionellen System, das aus einer unabhängigen Wärmepumpe zur Vorwärmung des Warmwassers besteht. Auf der anderen Seite sind die Kosten für die Installation niedriger. Die Installation eines Doppelstrom-Lüftungssystems anstelle des in das ICESOL-Konzept integrierten Einstrom-Wärmerückgewinnungssystems wäre aus ökologischer Sicht effizienter, aber teurer in der Investition.

Das ICESOL-System eignet sich, wenn das geplante Gebäude viel Dachfläche für die Installation von Kollektoren zur Verfügung hat. Eine 100%ige Deckung des Wärmebedarfs ist möglich, erfordert jedoch die Installation einer großen Kollektorfläche, wodurch die Kosten der Anlage mit denen einer geothermischen Anlage vergleichbar sind.



Résumé

La présente étude vise à mettre en place et mesurer les performances de la production chaleur qui assure les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire d'un bâtiment construit à Genève en 2016 et comprenant 30 appartements.

Le bâtiment est situé en zone interdite forage excluant la possibilité de mettre en place de sondes géothermiques. L'alternative pompe à chaleur air-eau serait envisageable, mais au prix de nuisances sonores délicates à gérer en ville.

La production de chaleur retenue est composée d'une pompe à chaleur qui exploite l'énergie de l'air ambiant extérieur et le rayonnement solaire au moyen de panneaux solaires non-vitrés disposés en toiture. Le déphasage problématique entre les besoins en chaleur et la disponibilité des ressources est géré au moyen d'un accumulateur énergétique à changement de phase qui travaille à basse température. Ce concept appelé ICESOL, existe depuis quelque années et d'autres projet pilote et démonstration ont déjà été développés (entre autres *Assainissement Minergie-P des immeubles «La Cigale»* SI/500992).

L'aspect novateur du projet réside en l'intégration de la récupération de chaleur sur l'air extrait de la ventilation à simple-flux qui est directement connectée à cet accumulateur énergétique froid. L'avantage est de maximiser l'énergie valorisée sans ajouter de ventilateur ou pompe à chaleur supplémentaire. Lors de conditions météorologiques défavorables une chaudière à gaz d'appoint complète la production de chaleur.

La motivation de tester le concept ICESOL provient du fait qu'il y a peu de contraintes autre que l'emprise des panneaux solaires en toiture et des installations techniques en sous-sol (accumulateur à changement de phase). Le rendement et le coût de la production de chaleur se situe entre ceux des pompes à chaleur géothermiques et aérothermiques. Ce qui paraît être un bon compromis entre deux alternatives qui se placent directement en concurrence. Naturellement le soutien de l'OFEN est essentiel pour couvrir une partie des surcoûts liés au développement technique et à la mise en place de ce projet pilote.

Un suivi énergétique de l'installation de production de chaleur a été effectué pendant 3 ans. Il a permis de montrer plusieurs problèmes liés à la mise en service, la conception, ou l'entretien du bâtiment. Pour la plupart, des solutions ont été proposées pour améliorer la performance de l'installation de production de chaleur. Il en résulte que la pompe à chaleur couvre 60 à 70% des besoins en chaleur totaux du bâtiment, le gaz complétant le solde restant. La chaudière gaz est d'avantage sollicitée que prévu entre autres car la température dans l'immeuble est surchauffé à 24°C, malgré les tentatives de réglage.

Après plusieurs améliorations apportées à l'installation, la récupération de chaleur sur l'air extrait fonctionne à satisfaction. Le rendement de récupération est du même ordre de grandeur qu'un système traditionnel composé d'une pompe à chaleur indépendante et préchauffant l'ECS. Le coût de la mise en place est en revanche inférieur. Réaliser une installation de ventilation à double-flux en lieu et place du simple-flux à récupération de chaleur intégré au concept ICESOL serait plus efficace d'un point de vue environnemental, mais plus cher à l'investissement.

Le système ICESOL est adapté lorsque le bâtiment en projet a beaucoup de surface de toiture disponible pour mettre en place des capteurs. Couvrir 100% des besoins en chaleur est possible mais nécessite la mise en place d'une surface conséquente de capteurs, rendant le coût de l'installation comparable à celui d'une installation géothermique.



Summary

The present study aims to set up and measure the performance of the heat production that ensures the heating and domestic hot water needs of a building built in Geneva in 2016 and comprising 30 apartments.

The building is located in a forbidden zone where drilling is prohibited, excluding the possibility of installing geothermal probes. The air-water heat pump alternative could be considered, but at the cost of noise pollution that is difficult to manage in the city.

The retained heat production consists of a heat pump that uses energy from the outside ambient air and solar radiation by means of unglazed solar panels on the roof. The problematic phase difference between heat demand and resource availability is managed by means of a phase-change energy accumulator that works at low temperatures. This concept, called ICESOL, has been in existence for some years and other pilot and demonstration projects have already been developed (among others Minergie-P Sanitation of "La Cigale" buildings SI/500992).

The innovative aspect of the project lies in the integration of heat recovery from the air extracted from the single-flow ventilation which is directly connected to this cold energy accumulator. The advantage is to maximise the energy recovered without adding an additional fan or heat pump. In adverse weather conditions, a gas boiler as an auxiliary boiler completes the heat production.

The motivation to test the ICESOL concept comes from the fact that there are few constraints other than the footprint of the solar panels on the roof and the technical installations in the basement (phase-change accumulator). The efficiency and cost of heat production lies between those of ground and aerothermal heat pumps. This seems to be a good compromise between two alternatives that are in direct competition with each other. Naturally the support of the SFOE is essential to cover part of the additional costs associated with the technical development and implementation of this pilot project.

An energy monitoring of the heat production plant was carried out for 3 years. It showed several problems related to the commissioning, design and maintenance of the building. For the most part, solutions were proposed to improve the performance of the heat production plant. As a result, the heat pump covers 60 to 70% of the building's total heat requirements, with gas making up the remaining balance. The gas boiler is used more than expected, among other things because the temperature in the building is overheated to 24°C, despite attempts to adjust it.

After several improvements to the installation, the heat recovery from the exhaust air is working satisfactorily. The recovery efficiency is of the same order of magnitude as a traditional system consisting of an independent heat pump preheating the DHW. On the other hand, the cost of installation is lower. The installation of a double-flow ventilation system instead of the single-flow heat recovery system integrated in the ICESOL concept would be more efficient from an environmental point of view, but more expensive to invest.

The ICESOL system is suitable when the planned building has a lot of roof space available for the installation of collectors. Covering 100% of the heat needs is possible but requires the installation of a large surface area of collectors, making the cost of the installation comparable to that of a geothermal installation.



Take-home messages

La dernière année de fonctionnement, le système ICESOL étudié couvre 63% des besoins en chaleur du bâtiment avec un COP PAC de 3.4 et un SPF global (système de production de chaleur complet, y compris auxiliaires) d'environ 1.7. La performance théorique globale attendue était meilleure, mais basée sur des hypothèses de consommation énergétique de chauffage plus basses.

L'intégration de la récupération de chaleur sur l'air extrait joue un rôle important puisqu'elle a couvert environ 16% des besoins énergétiques totaux tout en consommant peu d'énergie électrique (SPF mesuré 3.9 cf §4.5.3). Pour arriver à ce niveau de performance, des corrections du système de filtration et du raccordement hydraulique du réseau de récupération de chaleur ont été nécessaires.

Une installation de ventilation à double-flux récupère la même quantité d'énergie thermique, mais consomme moins d'électricité (SPF mesuré 11.5 cf §4.5.3). En revanche elle coûte deux fois plus chère que son homologue à simple-flux.

Une installation de récupération de chaleur par PAC produisant uniquement de l'ECS est peu performante surtout si une installation solaire thermique couvre déjà une partie de l'ECS.

Le choix du type de récupération de chaleur dépend du projet, mais dans le cas d'une production de chaleur type ICESOL, l'intégration de la récupération de chaleur sur l'installation de ventilation à simple-flux est rationnel d'un point de vue financier et environnemental.



Table des matières

Zusammenfassung.....	4
Résumé.....	5
Summary	6
Take-home messages	7
Table des matières	8
Liste des abréviations.....	10
1 Introduction.....	11
1.1 Contexte et arrière-plan.....	11
1.2 Justification du projet.....	11
1.3 Objectifs du projet.....	12
2 Description des installations.....	13
2.1 Enveloppe thermique.....	13
2.2 Concept chauffage et ventilation	14
3 Procédure et méthode.....	18
3.1 Fonctionnement théorique	18
3.2 Instrumentation	20
4 Résultats et commentaire.....	21
4.1 Consommation énergétique	21
4.1.1 Ajustement des besoins en chauffage théoriques (bilan thermique)	21
4.1.2 Ajustement de la consommation en chauffage mesurée	22
4.1.3 Comparaison besoins en chauffage théoriques et mesurés	23
4.1.4 Comparaison besoins en chaude sanitaire théoriques et mesurés	25
4.1.5 Simulation corrigée avec paramètres de fonctionnement mesurés	27
4.2 Production de chaleur.....	29
4.2.1 Production solaire « indirect »	29
4.2.2 Récupération de chaleur sur l'air extrait.....	30
4.2.3 Compteur sources froides évaporateur PAC.....	31
4.2.4 Bilan sources froides évaporateur PAC	32
4.2.5 Consommation électrique PAC	33
4.2.6 Production de chaleur condenseur PAC	34
4.2.7 Bilan énergétique PAC	35
4.2.8 Production solaire « directe »	36
4.2.9 Production chaudière à gaz.....	37
4.3 Comparaison production de chaleur et consommation	38
4.4 Interprétation des résultats	40
4.4.1 Ecart de production-consommation en période estivale	40



4.4.2	Ecart de consommation théorique-mesurée en période hivernale.....	42
4.5	Etude spécifique récupération de chaleur sur l'air extrait	44
4.5.1	Performance de récupération de chaleur intégrée au système ICESOL comparaison simulation-mesures	44
4.5.2	Récupération de chaleur sur ventilation à simple-flux - retour d'expérience pratique	45
4.5.3	Comparatif de performance système de récupération de chaleur concurrents	46
4.5.4	Comparatif performance environnementale et financière d'un système de récupération de chaleur à simple-flux ou double-flux	49
4.6	Clé de dimensionnement système ICESOL	51
4.6.1	Contexte	51
4.6.2	Immeuble considéré	51
4.6.3	Résultats de l'analyse de sensibilité	51
4.6.4	Cas 1 : Immeuble neuf avec ventilation simple-flux	52
4.6.5	Cas 2 : Immeuble neuf avec ventilation double-flux	53
4.6.6	Cas 3 : Immeuble rénové avec ventilation simple-flux	54
4.6.7	Cas 4 immeuble rénové avec ventilation double-flux	55
4.6.8	Règles de dimensionnement	56
4.7	Coûts système ICESOL avec récupération de chaleur sur l'air extrait	58
5	Conclusions et résumé	59
6	Aperçu et mise en œuvre prochaine	60
6.1	Mesure d'amélioration et de corrections	60
6.2	Propositions de mesure d'amélioration	61
6.2.1	Protection arrière des capteurs solaires	61
6.2.2	Implantation et nombre de capteurs solaires	62
6.2.3	Récupération de chaleur sur l'air extrait	64
6.2.4	Gestion de la bivalence chaudière gaz et pompe à chaleur	65
6.3	Développement futurs possibles	66
7	Coopération nationale et internationale	66
8	Communication	66
9	Publications	66
10	Bibliographie	67
11	Annexes	67



Liste des abréviations

ESSA :	Energie Solaire SA
CPSA :	Construction Perret SA
SPF :	Facteur de performance saisonnier
ECS :	Eau chaude sanitaire
ICESOL :	Système de production de chaleur basé sur une pompe à chaleur exploitant l'énergie contenue dans l'air extérieur, le rayonnement solaire via un accumulateur à changement de phase
PAC :	Pompe à chaleur
SIA :	Société des ingénieurs et architectes



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

Les pompes à chaleur (PAC) sont de plus en plus employées pour assurer les besoins en chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et chauffage des bâtiments neufs ou rénovés. Plusieurs types de PAC existent, on les différencie par le type de ressource qu'elles exploitent:

- Air extérieur
- Géothermie
- Air extrait de l'installation de ventilation d'un bâtiment
- Eau souterrain (nappe)
- Eau de surface (rivière, lac)

Chaque système possède des caractéristiques de fonctionnement différentes qui dépendent principalement de la température de la source froide. Plus cette dernière est froide, et plus le coefficient de performance (COP) est faible. Ce qui se traduit par une diminution de la puissance thermique de la PAC et une augmentation de la consommation électrique. Le contexte énergétique actuel encourage l'amélioration des performances des PAC en vue de contenir la consommation électrique et donc réduire l'impact sur l'environnement.

La mise en place de pompe à chaleur se heurte à plusieurs problèmes :

- Emprise des installations
- Emission de bruit
- Manque de ressource naturelle
- Prix

Le développement de nouveau système de PAC exploitant de nouvelles ressources à un prix abordable a le vent en poupe. Et c'est dans ce cadre que le présent Pilote et démonstration s'intègre.

1.2 Justification du projet

Le projet propose d'étudier un système de pompe à chaleur basé sur le concept Icesol. Développé par la société Energie Solaire SA, le principe est de raccorder le côté froid de la PAC à un accumulateur énergétique à changement de phase qui travaille entre -10°C et $+20^{\circ}\text{C}$. Ce stock est simplement rempli d'eau en circuit ouvert (pression atmosphérique) et dès que la température passe sous les 0°C , la chaleur latente de glaciation se libère. Ce qui augmente la quantité d'énergie stockée. Ce dernier est chauffé directement par des capteurs solaires thermiques non vitrés qui travaillent donc à basse température. De la sorte la productivité solaire est maximale. Ce principe a déjà fait l'objet de deux projets pilotes et démonstration :

- Chauffage par pompe à chaleur solaire avec des capteurs sélectifs non vitrés et accumulateur à changement de phase daté d'octobre 2012
- Rapport technique et de communication du projet d'assainissement Minergie-P des immeubles « La Cigale » (GE) – Chauffage par pompes à chaleur solaires couplées à des stocks à changement de phase daté de décembre 2016 [1]



Dans le cas de la Cigale, le système ICESOL a été mis en œuvre dans le cadre d'une rénovation. Le système de distribution de chaleur se fait à haute température (radiateurs) et le renouvellement d'air est assuré par un système de ventilation à double-flux.

La particularité innovante du concept présenté dans ce rapport réside dans l'intégration de la récupération de chaleur via une batterie de récupération installée dans le flux d'air extrait du bâtiment et rechargeant le stock de glace.

1.3 Objectifs du projet

L'objectif du projet est de :

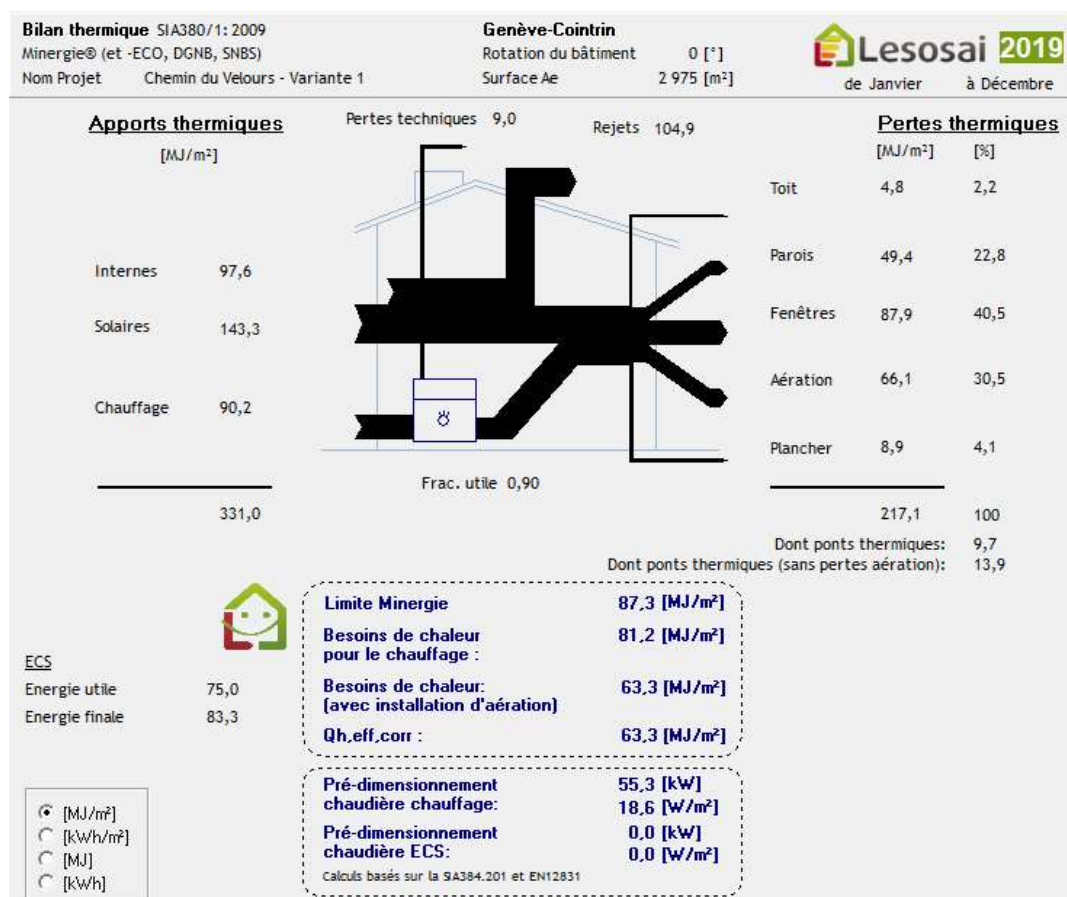
- Conception d'un système de chauffage par pompe à chaleur branchée sur des capteurs solaires non vitrés et un stock à changement de phase couplé à une ventilation simple flux avec récupération de chaleur. L'objectif étant de mettre en place une production de chaleur silencieuse et la plus efficace possible en exploitant au maximum les ressources disponibles du projet.
- Modélisation théorique et évaluation du rendement des différents appareils nécessaires au bon fonctionnement du système.
- Mise en œuvre du concept chauffage/ventilation dans un bâtiment à construire comprenant 30 appartements.
- Validation théorique du modèle par des mesures in situ.
- Etude financière de différentes phases (honoraires, investissement, maintenances et charges d'utilisation) et comparaison avec des solutions traditionnelles (double-flux, simple-flux avec récupération de chaleur par PAC)
- Etablissement de tables de dimensionnement pour des bâtiments génériques



2 Description des installations

2.1 Enveloppe thermique

La forme relativement compacte du bâtiment lui confère un bon facteur de forme (0.97). Le sous-sol, les dalles et les murs intérieurs porteurs sont construits en béton coulé en place et les façades sont composées de sandwichs préfabriqués en béton et isolés avec 14cm de polyuréthane. La toiture plate est isolée par l'extérieur avec 24cm de polystyrène expansé. Les fenêtres généreuses en bois/alu comportent un verre double performant. Le bilan thermique a été établi par la société Amstein & Waltherth selon les conditions standardisées de la norme SIA 380/1 édition 2019 (débit d'air neuf = $0.7 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$) et indique que la consommation en chauffage du bâtiment est de $Q_h = 81.2 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{an}$ ($241'570 \text{ MJ}/\text{an}$). Ce qui respecte les exigences du label minergie ($Q_h = 90\% Q_{h,li} = 87.3 \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{an}$). Le diagramme de Sankey du bâtiment figure ci-dessous avec les paramètres des simulations standards SIA 380/1:





2.2 Concept chauffage et ventilation

Le concept de chauffage (appelé ICESOL) s'articule autour d'une pompe à chaleur saumure/eau branchée en direct sur des panneaux solaires thermiques non vitrés implantés en toiture. Le plan d'implantation des panneaux en toiture est joint à l'annexe 1.

L'hiver, ces derniers servent également d'échangeur air/eau, ce qui permet à la pompe à chaleur d'assurer les besoins en chauffage et eau chaude sanitaire du bâtiment. Lorsque la température extérieure est trop basse et/ou l'ensoleillement insuffisant pour que le rendement du système soit suffisant, la pompe à chaleur puise alors son énergie dans un stock à changement de phase composé simplement d'eau en circuit ouvert (à pression atmosphérique). En s'abaissant à 0°C le stock commence à geler et libère toute la chaleur latente contenue dans l'eau. Si le stock venait à se congeler complètement et la température à l'entrée de l'évaporateur de la PAC de descendre sous sa température limite de fonctionnement, un complément d'énergie par une chaudière à gaz d'appoint est fourni. Le stock se régénère également via une batterie de récupération de chaleur connectée à l'extraction d'air vicié du bâtiment.

L'été, les panneaux solaires produisent de l'eau chaude sanitaire directement si l'ensoleillement le permet ou indirectement avec la pompe à chaleur dans le cas contraire.

Le système de ventilation à simple-flux est équipé d'entrées d'air et de soupapes d'aspiration pilotées par des membranes hygro-régulantes de manière à limiter le débit de ventilation au stricte nécessaire. Le débit de dimensionnement (débit d'extraction maximum atteignable par l'installation d'extraction d'air) a été calculé par le ventiliste, Thermex SA est de 3'420m³/h. Les appareils principaux de la production de chaleur sont décrits ci-après :

Pompe à chaleur Watterkotte DS5095.5T (bi-compresseur scroll, fluide frigorigène R410A), Puissance : 71.4kw (B0/W35), COP (En 14511) : 4.7 (B0/W35)





42 panneaux solaires Energie Solaires SA non vitrés de 2m² chacun soit 84m² au total. Inclinaison 15° orienté S-SO.



Accumulateur à changement de phase, volume utile 5m³ (eau pure)





Echangeur immergé dans l'eau constitué de panneaux solaires Energie Solaire (eau liquide à gauche et gelée à droite)



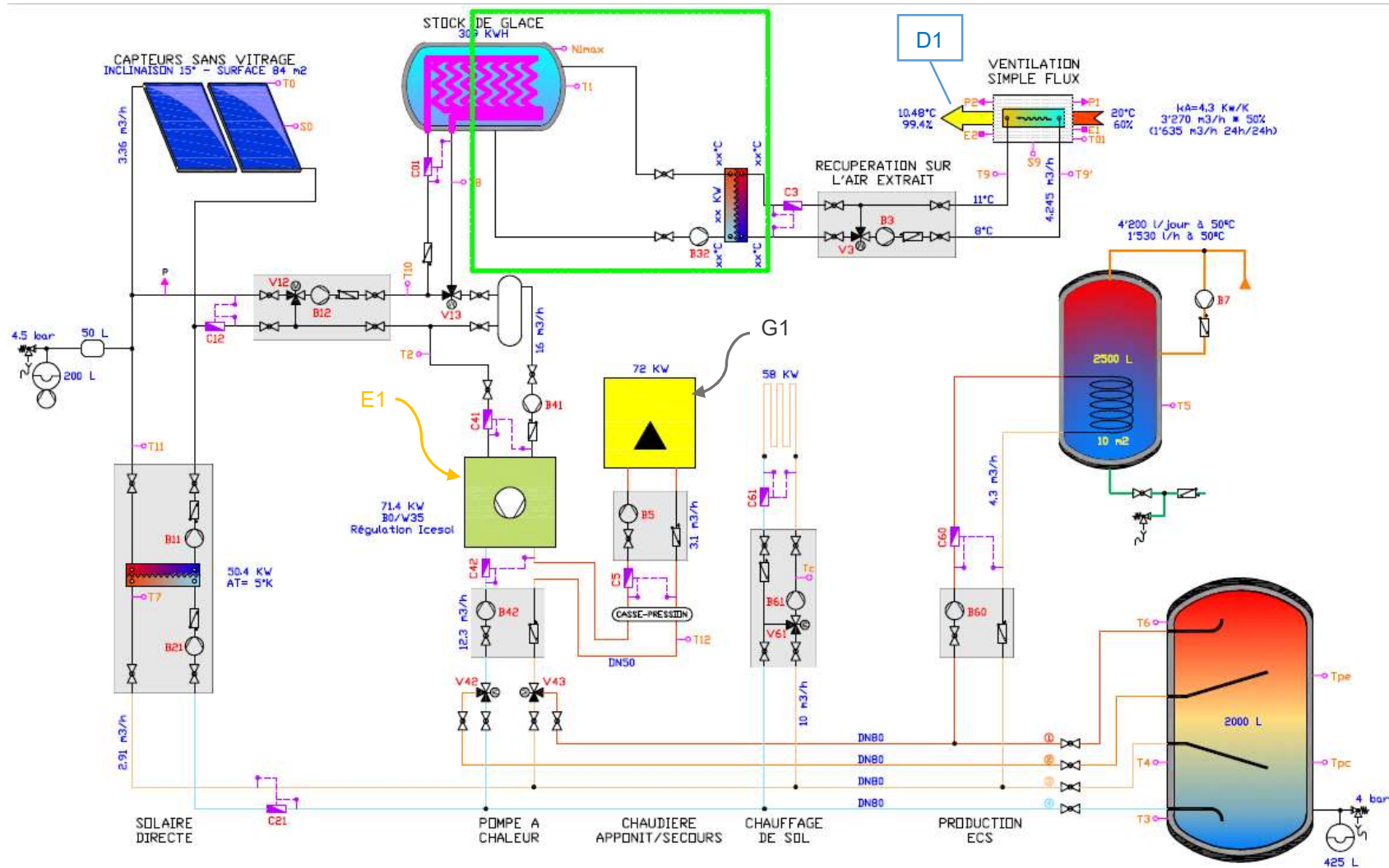
Ventilation à simple-flux Sital Climat CTS3, Débit maximum : 3'270m³/h (pression disponible 500pa)
Batterie de récupération de chaleur 13kw (ΔT in-out 10°C)





Système de pompe à chaleur sur capteurs solaires non-vitrés

Le schéma hydraulique de l'installation est présenté ci-après (modifications hydrauliques intégrées):





3 Procédure et méthode

3.1 Fonctionnement théorique

Les résultats théoriques de l'installation de production de chaleur sont simulés à l'aide d'un logiciel développé spécifiquement par la société ESSA. Les flux d'énergies provenant des différents organes de la production de chaleur sont calculés indépendamment. Il est important de noter que les conditions météorologiques, le comportement des habitants et le réglage des appareils de ventilation influencent beaucoup les résultats. Raison pour laquelle le calcul est effectué d'abord avec des paramètres standards définis par la société des ingénieurs et architectes (SIA), à savoir :

- Conditions atmosphériques selon station météo de Cointrin
- Température intérieure 20°C
- Aération avec débit d'air thermiquement actif moyen 2'975m³/h (1.0m³/h.m²), soit 85% du débit de dimensionnement
- Protection solaires rangées en hiver
- Gains internes 100 MJ/m².an
- Consommation d'ECS admis égales à 75MJ/m².an
- Besoins en chaleur pour le chauffage (avec les paramètres précédents) : 104MJ/m².an



Le tableau ci-dessous montre les hypothèses de calcul et les résultats avec les paramètres de fonctionnement standards citées précédemment :

DONNEES DU PROJET	1.0	x norme
Conditions météorologiques	GENEVE	
Capteurs non vitrés type AS, surface	84	m2
Inclinaison capteurs solaires	30	°
Orientation capteurs solaires	SO	
Capacité latente Accu glace (92 kWh/m3 glace)	345	kWh
Volume du stock à changement de phase (eau/glace)	5	m3
Capacité sensible Accu glace	5.8	kWh/K
Débit air extrait	2975	m3/h
% récupération sur air extrait (% entre 21°C et max(Taller réseau BT,+3°C)	80%	%
Volume accumulation total	4.50	m3
Consommation ECS 45°C	4178	l/j
Puissance PAC (BO / W35)	72	kW
Temp ext dimensionnement (selon SIA380/1)	-5	°C
Puissance max chauffage	49	kW
Temp max départ chauffage	30	°C
Temp ext coupure	12	°C
COP B0W35 (calculé)	4.4	-
Corps de chauffe électrique ECS si Tglace<	-5.0	°C
Ath/SRE	0.97	-
SRE	2974.5	m2

Production de chaleur		
Apport solaire directe (accumulateur de chauff.)	15'455	kWh
Apport solaire indirecte (circuit évaporateur PAC, stock de glace)	52'000	kWh
Récupération sur air extrait (circuit BT -> stock de glace)	57'501	kWh
Electricité compresseur PAC centrale techn.	27'677	kWh
Récupération sur air extrait (évapo. PAC air/eau Complément ECS immeubles	0	kWh
Electricité complément ECS	260	kWh
Besoin non couvert par système ICESOL, à couvrir par chaudière d'appoint ou corps de chauffe électrique	2'418	kWh
Total production	155'310	kWh

Consommation de chaleur	kWh/an	MJ/m2/an
Chauffage	85'756	104
ECS	61'969	75
Equilibre consommation-production (bilan)	7'585	9
Total consommation	155'310	188

RESULTATS		
Consommation utile Chauffage et Eau chaude	147'725	kWh
Electricité chaufferie sans groupe chauffage (estim 3%)	4'432	kWh
Energie électrique consommée pour la production d'eau chaude et de chauffage	27'937	kWh
Energie chaudières de secours et/ou corps de chauffe électrique	2'418	kWh
Coefficient de performance annuel du système ICESOL seul (appoint non compris)	4.5	-
Coefficient de performance annuel global du système complet	4.2	-
Part solaire directe (production)	10%	
Part solaire totale (production)	43%	
Production solaire spécifique totale	803	kWh/m2/an
Production solaire spécifique directe	150	kWh/m2/an
Coefficient de performance (COP) PAC, global (ECS & chauffage)	4.6	-
Coefficient de performance (COP) PAC, chauffage	5.3	-
Coefficient de performance (COP) PAC, eau chaude sanitaire (ECS)	3.5	-



3.2 Instrumentation

Pour valider le modèle théorique, il s'agit de connaître les paramètres de fonctionnement réels du bâtiment. L'instrumentation de l'installation permet de mesurer le fonctionnement effectif de la production de chaleur et la consommation énergétique du bâtiment. Le tableau ci-après résume les points de mesure instrumentés et enregistrés dans le système d'acquisition des données. L'emplacement des points de mesure figure sur le schéma de principe de chauffage annoté figurant au chapitre 2.2. L'intervalle d'enregistrement est fixé à 15 minutes. Les données sont enregistrées sur un serveur accessible à distance.

Installation technique	Données mesurées	N° de compteur
Champ de capteurs solaires	Température des capteurs solaires Température production solaire directe après échangeur Température production solaire directe avant échangeur Température production solaire indirecte après vanne trois voies Compteur de chaleur solaire indirect (PAC) Compteur de chaleur solaire direct (ECS)	T0 T7 T11 T10 C12 C21
Pompe à chaleur	Consommation électrique (à partir de fin janvier 2018) Température sortie de l'évaporateur Energie produite chauffage et eau chaude sanitaire (confondu) Energie consommée au niveau de l'évaporateur	E1 T2 C42 C41
Monobloc de ventilation	Débit d'air extrait Température de l'air extrait avant la batterie de récupération La consommation électrique n'est pas mesurée, mais estimée sur la base de la documentation technique théorique	D1 T04 (HS)
Récupération de chaleur sur l'air extrait	Energie récupérée sur l'air extrait (compteur de chaleur) Température entrée et sortie batterie de récupération de chaleur	T9 et T9'
Stock à changement de phase	Température intérieur stock de glace Température sortie stock	T1 T8
Réservoir d'eau de chauffage	Température à plusieurs niveaux de l'accu (bas, moyen et haut) Consommation de chauffage (1 compteur départ distribution)	T3, T4 et T6 C61
Réservoir d'eau chaude sanitaire	Production d'eau chaude sanitaire Température de l'eau chaude sanitaire à mi-hauteur du ballon	C60 T5
Chaudière à gaz	Température sortie primaire Énergie fournie Consommation de gaz (relevé manuel ponctuel)	T12 C5 G1
Météo	Température extérieure	Text



Note : Pour chaque compteur le débit, la puissance, l'énergie cumulée, la température aller et retour sont enregistrés. D'autres paramètres sont enregistrés mais pas listés ici car ils ne sont pas nécessaires pour le suivi énergétique de l'installation.

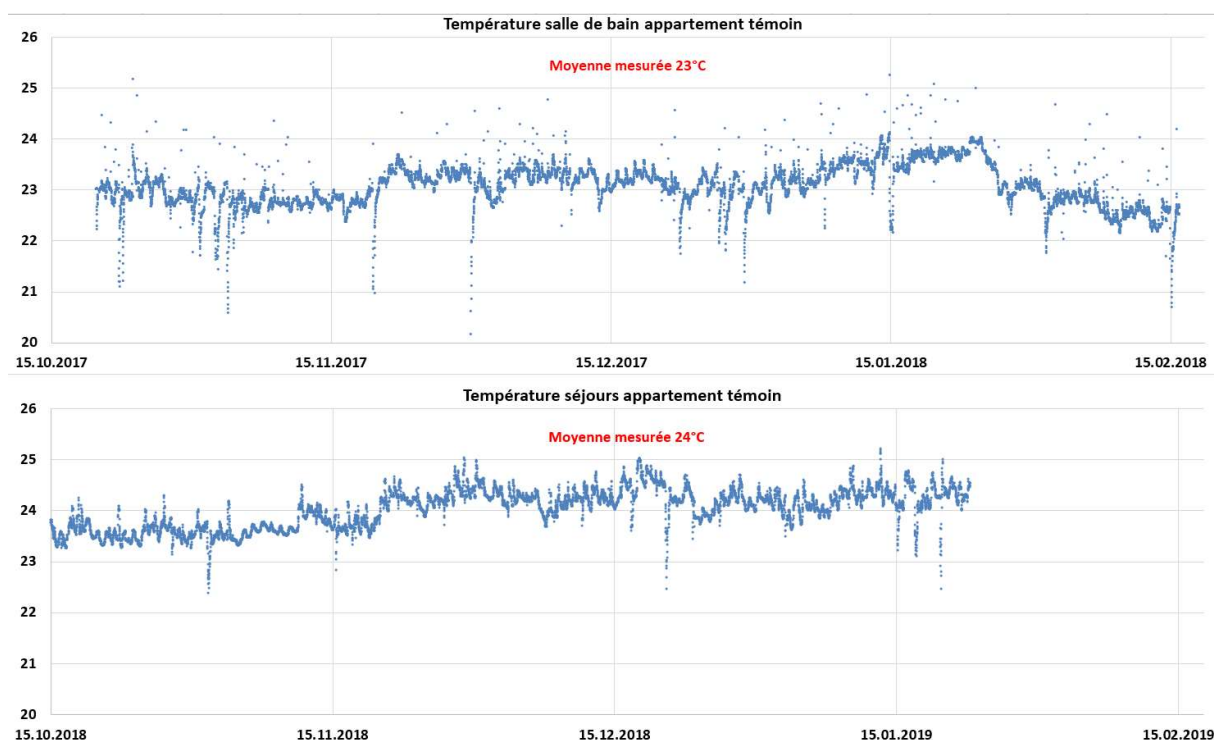
4 Résultats et commentaire

4.1 Consommation énergétique

Les besoins en chauffage et eau chaude sanitaire ont été analysés séparément. Pour pouvoir comparer les besoins théoriques avec les mesures, il faut que les valeurs soient ajustées avec les paramètres de fonctionnement effectifs du bâtiment et la météo du site.

4.1.1 Ajustement des besoins en chauffage théoriques (bilan thermique)

La température intérieure est le paramètre le plus influent sur la consommation énergétique liée au chauffage. La température de l'air extrait par l'installation de ventilation serait la mesure la plus représentative de la température intérieure moyenne du bâtiment. Malheureusement la sonde de température mise en place à l'entrée du monobloc de ventilation n'est pas exploitable, malgré deux étalonnages du fournisseur. Par conséquent, nous avons mis en place des sondes de température dans un appartement témoin. Les relevés figurent ci-après :



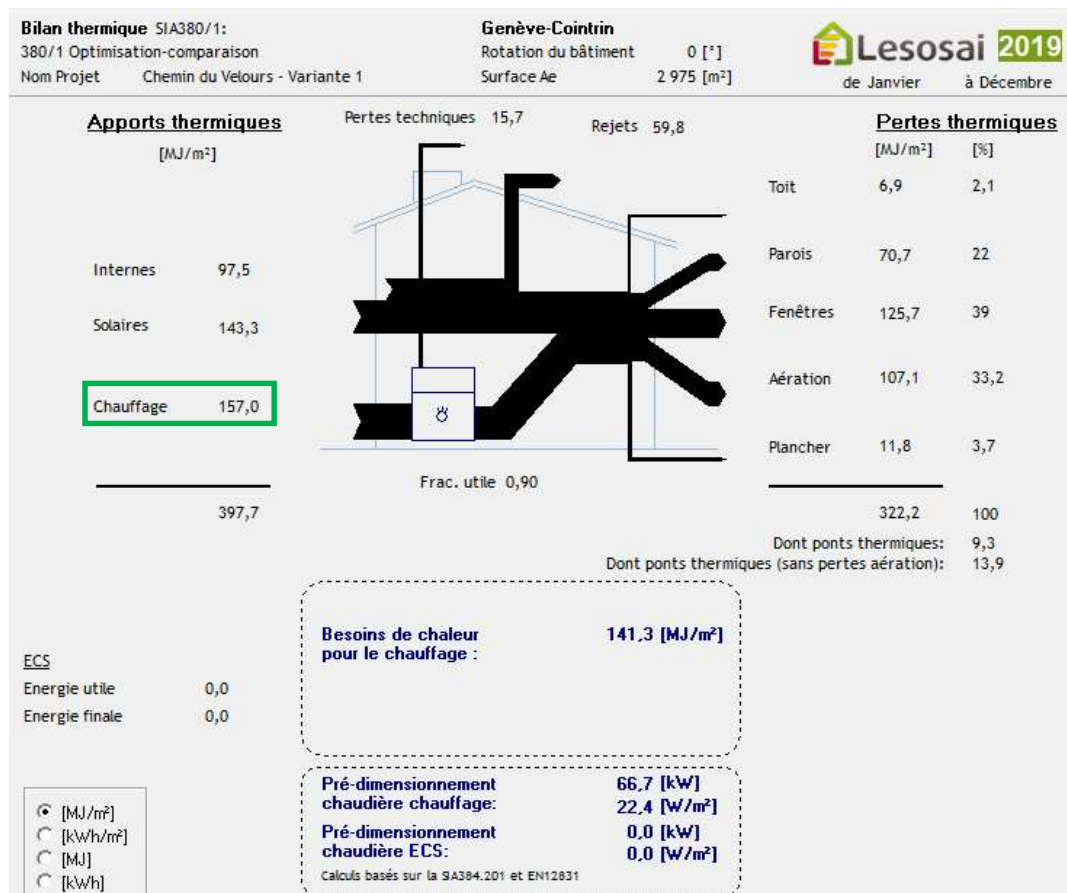
Les relevés montrent que le bâtiment est clairement surchauffé et nous avons considéré que la température moyenne oscille autour 24°C.



Les besoins en chauffage ont été recalculés mois par mois à l'aide du logiciel Lesosai avec les paramètres de calculs suivants :

- Débit d'air neuf thermiquement actif 2400m³/h (selon mesures de débit)
- Température intérieure 24°C (selon relevés appartement témoin)
- Pertes de distribution (conduites hors chaufferie) estimées à 10%

Le diagramme de Sankey corrigé est présenté ci-après :



4.1.2 Ajustement de la consommation en chauffage mesurée

La consommation de chaleur pour le chauffage est mesurée au moyen d'un compteur de chaleur (C61) placé à l'aval de la vanne trois voies nécessaire à la régulation de la température de départ du chauffage. La consommation énergétique enregistrée comprend les pertes liées à la distribution du chauffage hors de la chaufferie. Les quelques pertes liées au stockage dans l'accumulateur et les conduites internes à la chaufferie sont négligées (bilan thermique théorique).



Les conditions météo jouent un rôle important sur la consommation de chaleur d'un bâtiment. Pour pouvoir comparer les relevés annuels entre eux et avec le bilan thermique théorique, des corrections climatiques ont été apportées aux relevés de consommation. La correction est proposée avec la méthode des degrés-jours unifiés. Un degré-jour correspondant à une différence de 1°C entre la température extérieure et la température de référence pendant 24h. La consommation d'un hiver plus rude que la base météo standard sera corrigé vers le bas, alors que la consommation d'un hiver plus clément sera corrigée vers le haut.

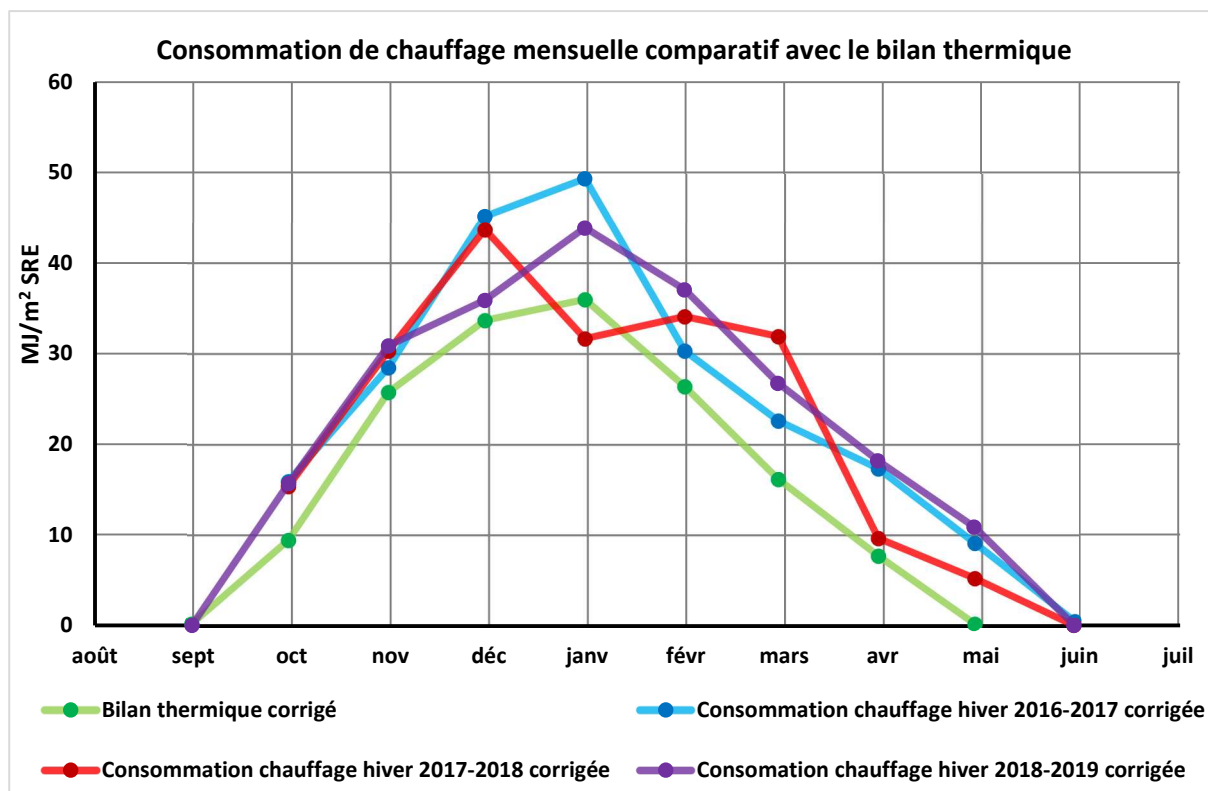
2016 - 2017		2017 - 2018		2018 - 2019	
Degrés-jours	Facteur de correction	Degrés-jours	Facteur de correction	Degrés-jours	Facteur de correction
2589	1.019	2431	1.066	2368	1.086

Ces valeurs sont reprises, du tableau « degrés-jours à Genève depuis 1992 (seuil à 12/18°C) » joint en annexe 3.

Il est reconnu que pour les bâtiments neufs, le séchage du béton et des crépis génère une surconsommation de chauffage la première année de fonctionnement. Celle-ci a été prise en compte en augmentant de 5% la consommation énergétique de l'année 2016-2017.

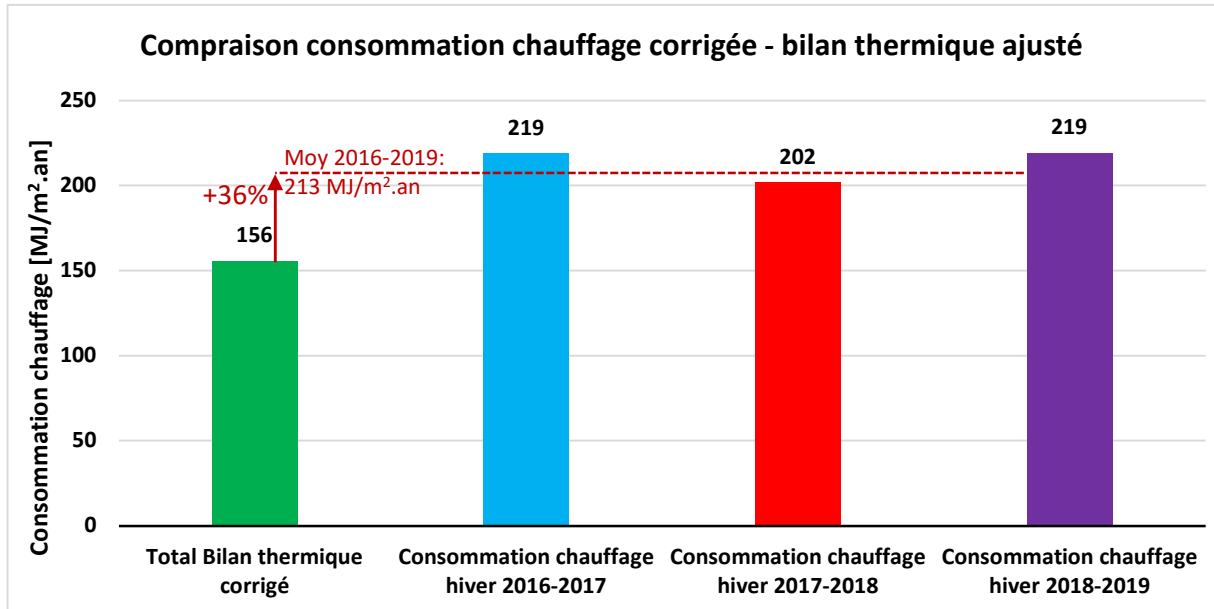
4.1.3 Comparaison besoins en chauffage théoriques et mesurés

Le bilan thermique ajusté (en vert) est comparé aux 3 années de consommation énergétique corrigées (violet, rouge et bleu) dans le graphique ci-après :





Le total annuel est présenté ci-dessous :



Note : Les relevés d'août à décembre 2017 manquent et ont été extrapolées des autres années.

Le tableau ci-dessous synthétise les besoins en chaleur de chauffage théoriques et mesurés ainsi que les paramètres qui jouent un rôle :

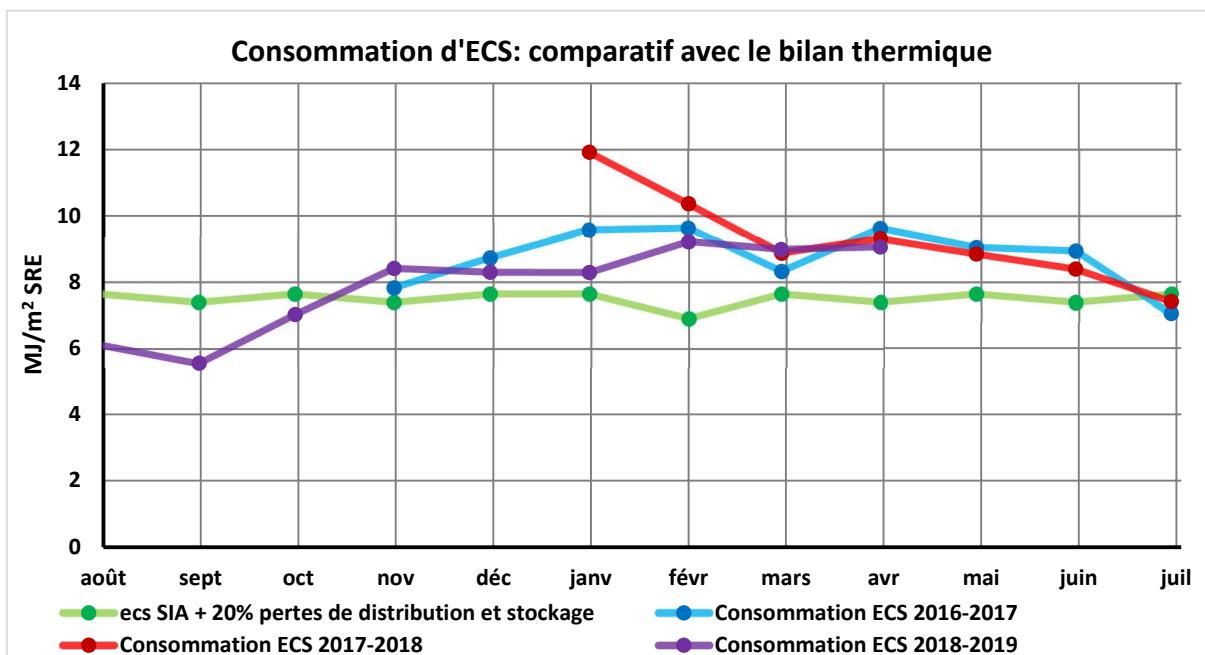
Stade du projet	Température intérieure	Débit de ventilation		Perte de distribution et stockage	Besoins en chaleur Qh
-	-	m³/h	m³/h.m²	%	MJ/m².an
Autorisation de construire	20°C	2'083	0.7	0	81.2
Planification installation de production de chaleur	20°C	2'975	1.0	0	104
Besoins recalculés avec paramètres de fonctionnement du bâtiment	24°C	2'400	0.8	10	156
Mesures corrigées 2019	24°C	2'400	0.8	10	219

L'explication des écarts théorie-mesures est présentée au chapitre 4.4.2



4.1.4 Comparaison besoins en chaude sanitaire théoriques et mesurés

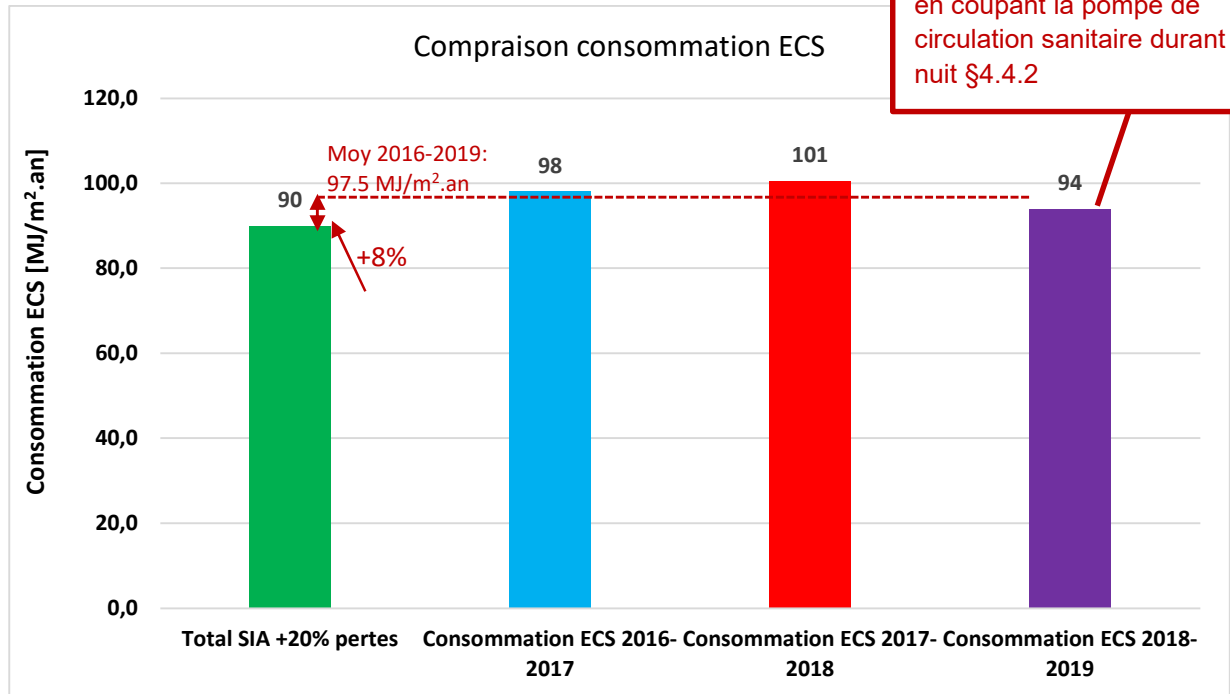
Les besoins en eau chaude sanitaires théoriques sont ceux de la norme SIA auxquels on ajoute 20% de pertes dues au stockage et à la distribution (boucle de circulation sanitaire). Les mesures de consommation ne sont pas corrigées car il n'y a pas besoin. Les résultats comparatifs mensuels figurent ci-après :



On observe la baisse de consommation typique liée aux vacances estivales



Le total annuel est présenté ci-dessous :



Note : Les relevés d'août à décembre 2017 manquent et ont été extrapolées des autres années.



4.1.5 Simulation corrigée avec paramètres de fonctionnement mesurés

La simulation du fonctionnement de la production de chaleur a été recalculée en considérant les paramètres de fonctionnement propres au bâtiment sans correction météo :

Besoins en chauffage : 199MJ/m².an

Besoins en ECS : 97MJ/m².an

Débit de ventilation : 2400 m³/h

DONNEES DU PROJET		
Bâtiment		
Localisation bâtiment	GENEVE	
SRE	2974.5	m2
Météo		
Conditions météorologiques	Polysun	GENEVE
% vent C970	50%	
Temp ext dimensionnement météo	-0.8	°C
Solaire		
Type de capteur	AS	
Surface capteurs champ #1	84	m2
Inclinaison capteurs solaires	15	°
Orientation capteurs solaires	SO (S-35°)	
Surface capteurs champ #2	0	m2
Inclinaison capteurs solaires	0	°
Orientation capteurs solaires		
Pertes de chaleur dans les conduites de liaison solaire	5%	
Débit solaire indirecte	110	l/h/m2
Stock de glace		
Modèle du stock de glace choisi	velours (ECH ESSA)	
Nombre de stock	1	pce
Débit max sur stock de glace	6000	l/h max
Surface des échangeurs du stock de glace (total des 2 faces)	48.71	m2
Fonction de décollement de la glace ?	N	O/N
Epaisseur maximale de glace (pour charge à 100%)	0.06	m
Capacité latente Accu glace (92 kWh/m3 glace)	269	kWh
Volume maximum de glace	2.92	m3
Volume d'eau du stock à changement de phase (eau/glace)	3.71	m3
Capacité sensible Accu glace	4.3	kWh/K
Coef U isolation parois stock de glace	2.281	W/m2/K
Température environnement du stock de glace	10.000	°C
Temp max stock de glace	15	°C
Temp min stock de glace	-10	°C
Delta T échangeur Accu	5	K
Ventilation		
Simple flux (SF) ?	O	O/N
Débit d'air neuf	0.81	m3/h.m2
Débit d'air max Q	2400	m3/h
ΔT air rejeté - air neuf (DF seulement)	6	K
Débit réduit la nuit	O	O/N
Débit d'air moyen effectif	2000	m3/h
PAC pour ECS sur simple flux ?	N	O/N
COP PAC_ECS	3.0	
ΔT par PAC_ECS	0	K
kA* batterie récupération air extrait (kA*=P*1000/((Tin_air-Tin_glycol)^1.1*Q^0.65	4.4	W/K/m3/h
Efficacité batterie (réserve de sécurité)	80%	%



Eau chaude sanitaire ECS		
Besoin en eau chaude sanitaire	97.0	MJ/m2 SRE/an
Température primaire de production d'eau chaude sanitaire	55	°C
Consommation ECS 50°C (ΔT=40K)	4728	l/j
Volume d'accumulation total (Tampon+Chauffe-eau)	4.50	m3
Chauffage		
Besoin en chauffage	21.0	W/m2 SRE
Puissance maximale chauffage	62.5	kW
Temp maximale départ chauffage	35	°C
Temp extérieure de coupure	16.5	°C
Différence maximale aller-retour chauffage	5	K
Pompe à chaleur PAC		
Modèle de PAC	Machine R410 (style WK)	
Puissance pompe à chaleur (BO / W35)	36.0	kW
COP B0W35	4.5	-

Production de chaleur	kWh/an	kWh/m2
Apport solaire directe (accumulateur de chauff.)	19 664	6.61
Apport solaire indirecte (circuit évaporateur PAC, stock de glace)	83 590	28.10
Apport de chaleur de l'environnement au stock de glace	767	0.26
Récupération de chaleur sur ventilation -> stock de glace	41 048	13.80
Récupération de chaleur sur eaux usées -> stock de glace	0	0.00
Récupération de chaleur sur gaz brûlés -> stock de glace	0	0.00
Apport de chaleur externe (Anergie)	0	0.00
Electricité compresseur PAC IceSol	39 137	13.16
Récupération de chaleur sur ventilation -> évapo PAC ECS	0	
Electricité compresseur PAC ECS	0	
Chaleur de production à haute température (à couvrir par chaudière ou corps de chauffe électrique)	82	0.03
		0.00
Chaleur qui n'est pas produite par le système ICESOL (à couvrir par chaudière ou corps de chauffe électrique)	60 229	20.25
Energie totale non produite par le système ICESOL (à couvrir par chaudière ou corps de chauffe électrique)	24.7%	
Total production	244 515	kWh

Consommation de chaleur	kWh/an	kWh/m2
Chauffage	164 516	55.3
ECS	80 135	26.9
Equilibre consommation-production (bilan)	-136	0.0
Total consommation	244 515	82.2

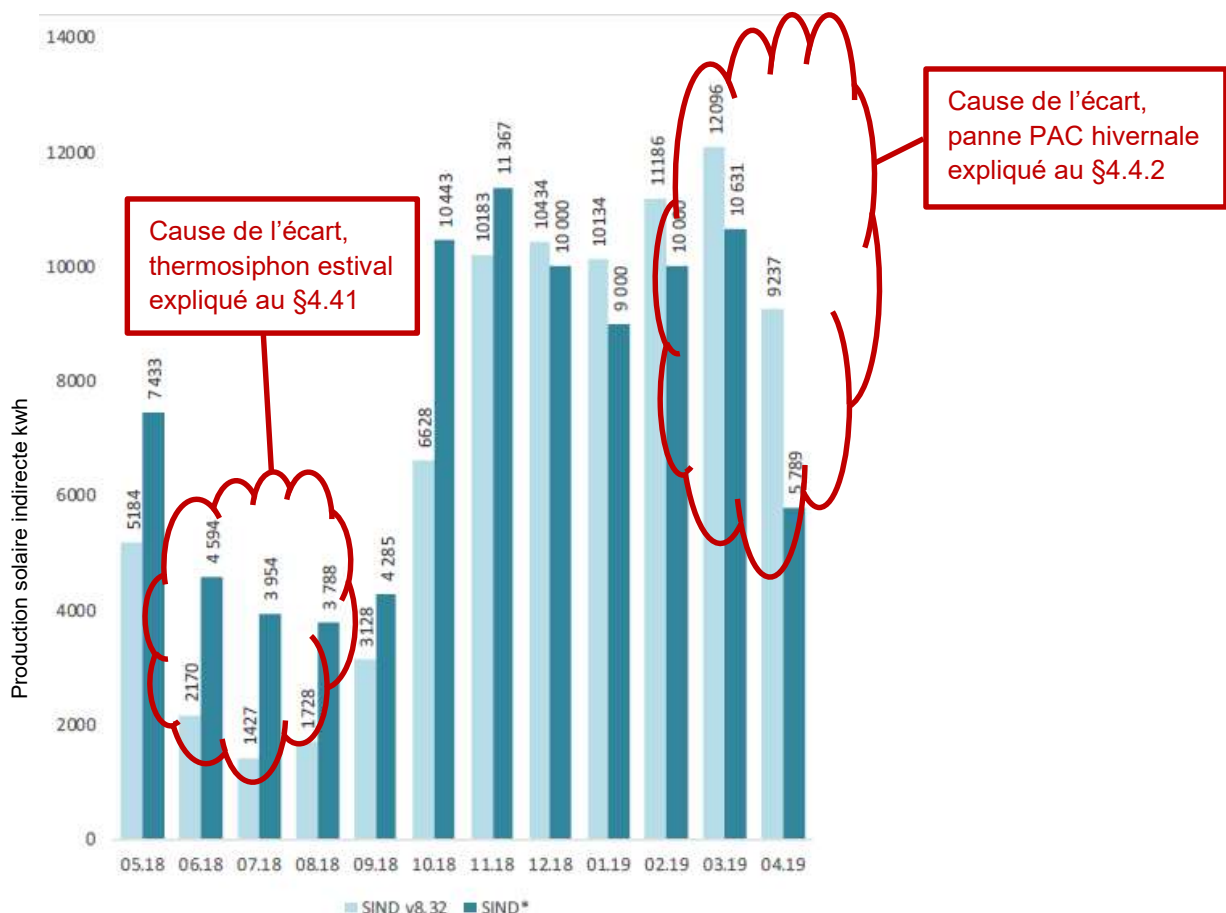
RESULTATS	kWh/an	kWh/m2
Consommation utile Chauffage et Eau chaude	244 652	82.2
Consommation d'électricité des auxiliaires en chaufferie (estimation 3% de la consommation utile)	7 340	2.5
Energie électrique consommée pour la production d'eau chaude et de chauffage	39 137	13.2
Besoin non couvert (couvert par corps de chauffe et chaudière, COP =1)	60 310	20.3
Rendement de récupération sur ventilation simple flux	96%	
Coefficient de performance annuel du système ICESOL seul (appoint non compris)	3.97	-
Coefficient de performance annuel global du système complet	2.29	
Part solaire directe (production)	8%	
Part solaire totale (production)	42%	
Part d'énergie renouvelable (solaire direct+solaire indirect+récupération de chaleur)	59%	
Production solaire spécifique totale	1 229	kWh/m2/an
Production solaire spécifique directe	197	kWh/m2/an
Coefficient de performance (COP) PAC, global (ECS & chauffage)	4.2	-
Coefficient de performance annuel (COPa) PAC, chauffage	4.7	-
Coefficient de performance annuel (COPa) PAC, eau chaude sanitaire (ECS)	3.1	-

4.2 Production de chaleur

La production de chaleur dépend des conditions météo extérieures (ensoleillement, température) et de la consommation énergétique (température du stock à changement de phase). La simulation de l'installation de production de chaleur a été faite avec les conditions météo de la station de Cointrin et les paramètres de consommation mesurés du bâtiment et présentés précédemment. Les relevés énergétiques effectifs mensuels de chaque source de chaleur ont été comparés par ESSA grâce à leur modèle de calcul spécifique.

4.2.1 Production solaire « indirect »

Les relevés du compteur C12 figurent en bleu foncé, alors que les calculs théoriques en clair sur le graphique ci-dessous :

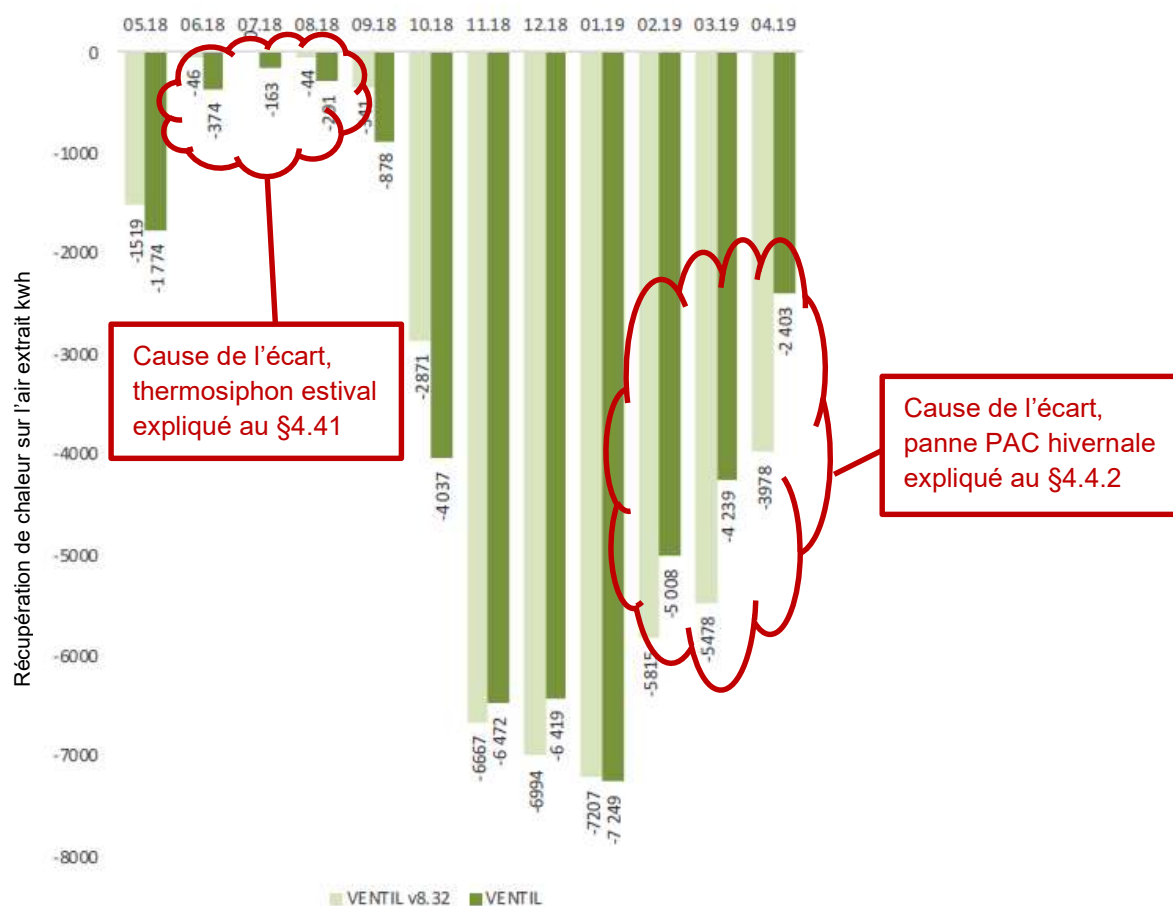


L'analyse mensuelle indique des valeurs effectives de production des capteurs plus élevées que le modèle durant l'été ce qui est assez étrange. En octobre et novembre la production est également plus élevée que la prévision puis passe nettement en-dessous au cours des 5 derniers mois. L'interprétation de ces écarts figure dans le chapitre interprétation.



4.2.2 Récupération de chaleur sur l'air extrait

Les relevés du compteur C3 figurent en vert foncé, alors que les calculs théoriques en clair sur le graphique ci-dessous :

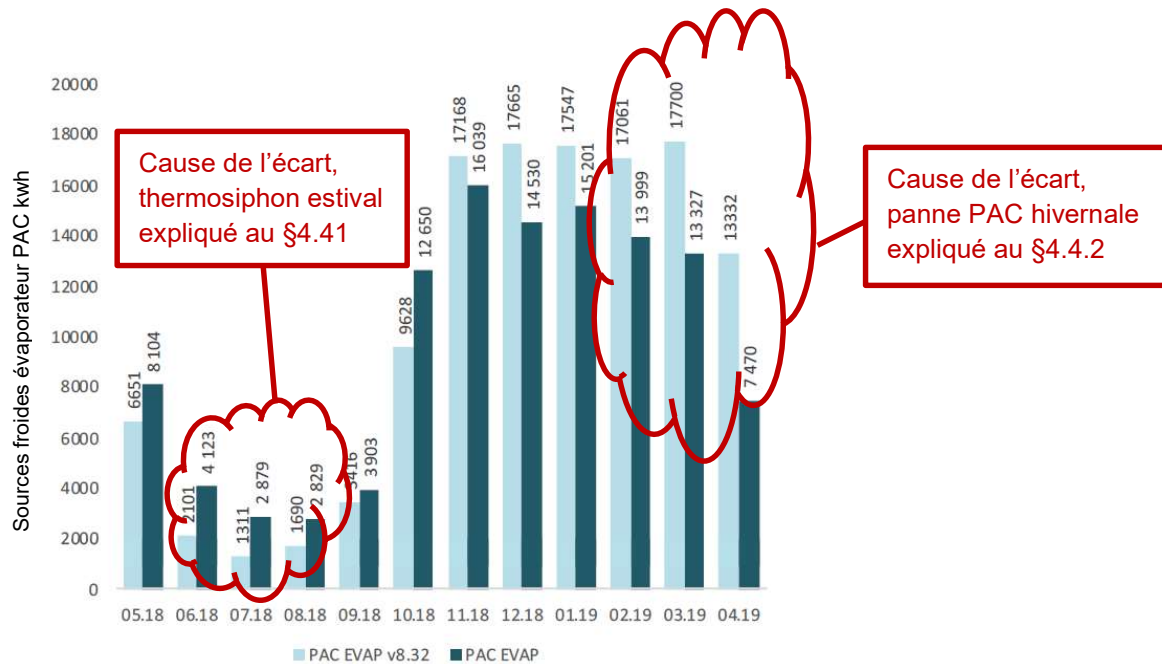


De façon similaire au « solaire indirect » la récupération de chaleur de la ventilation simple flux est supérieure à la prévision du modèle pendant les 6 premiers mois puis devient inférieure à la fin de la période d'analyse. L'interprétation de ces écarts figure dans le chapitre interprétation.



4.2.3 Compteur sources froides évaporateur PAC

Les relevés du compteur C41 figurent en bleu foncé, alors que les calculs théoriques en clair sur le graphique ci-après :

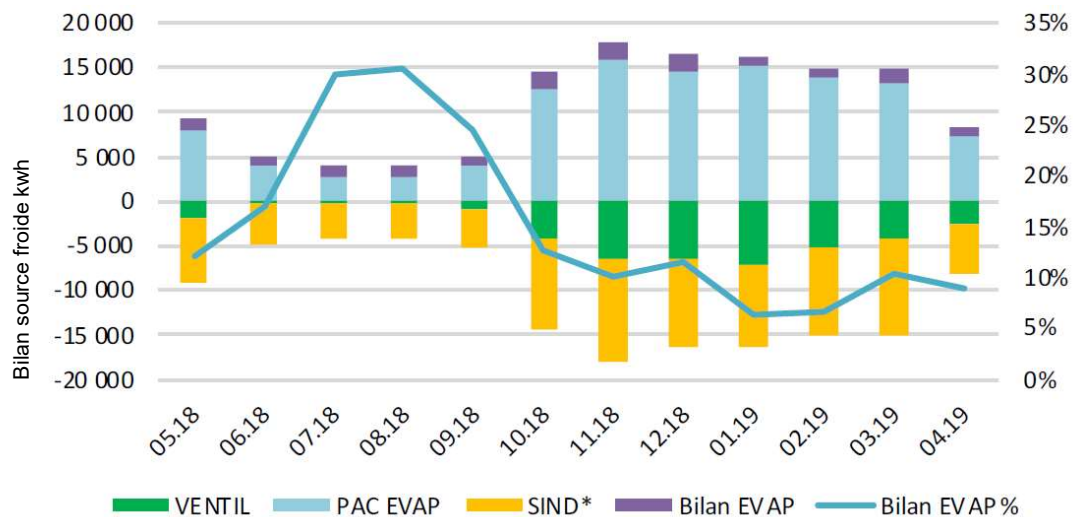


La quantité globale d'énergie effective absorbée par l'évaporateur est inférieure à celle du modèle en hiver et supérieure en été. Ce phénomène avait déjà été remarqué lors de l'analyse de 2016-2017.



4.2.4 Bilan sources froides évaporateur PAC

Les relevés des compteurs solaire indirect C12 et récupération de chaleur C3 ont été comparés à celui de l'évaporateur PAC C41.

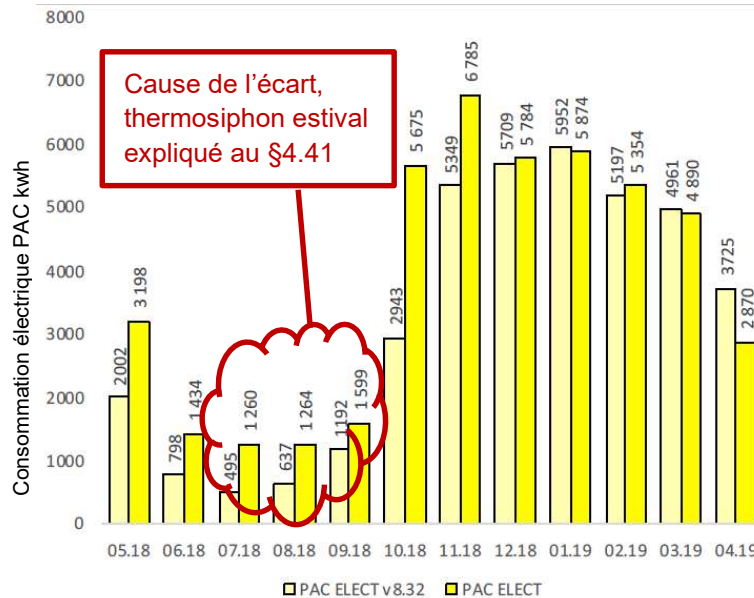


On observe un léger déséquilibre d'un mois à l'autre. Il y a quelques pertes thermiques entre les apports énergétique (récupération de chaleur et solaire indirect) et le consommateur (évaporateur PAC), mais qui sont probablement faibles vu qu'il s'agit de sources froides. Un contrôle de l'équilibre énergétique de la pompe à chaleur est effectué plus bas pour identifier s'il s'agit d'une erreur de comptage.



4.2.5 Consommation électrique PAC

La consommation électrique mesurée de la pompe à chaleur comparée au modèle théorique est présentée dans le graphique suivant :

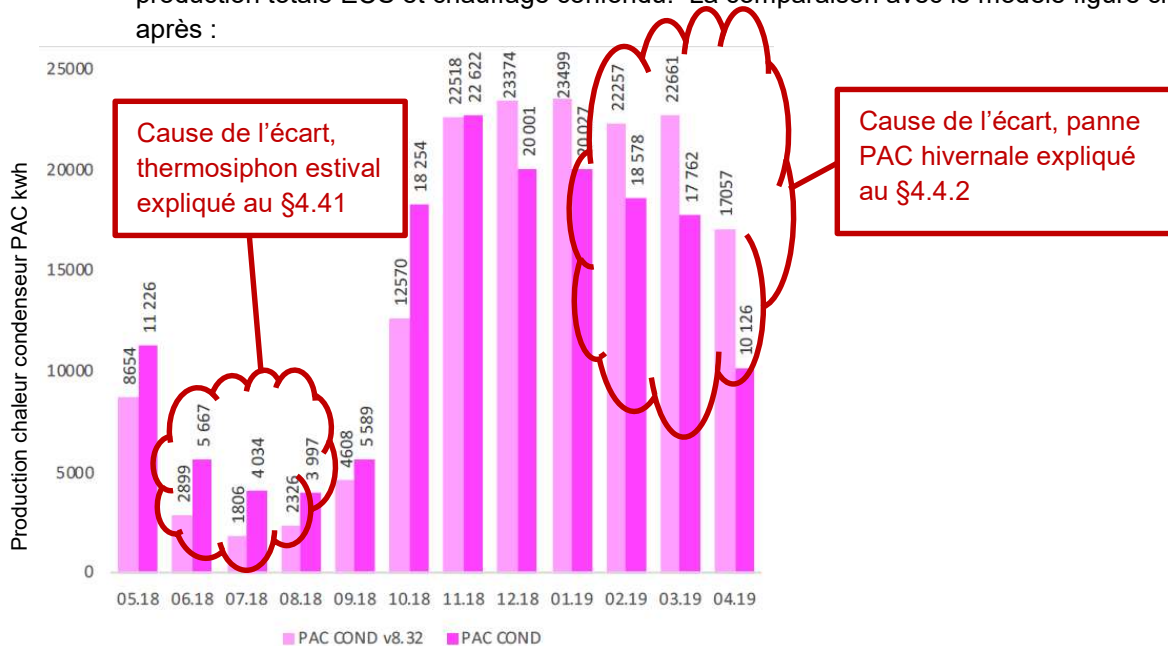


Le modèle théorique intègre les conditions de fonctionnement propres de la PAC. En hiver, le modèle est assez fidèle aux relevés de consommation d'électricité de la PAC mesurés. En revanche, de mai à octobre elle est nettement supérieure, le chapitre interprétation explique ce phénomène.



4.2.6 Production de chaleur condenseur PAC

La production de chaleur mesurée au niveau du condenseur PAC (compteur C42), indique la production totale ECS et chauffage confondu. La comparaison avec le modèle figure ci-après :

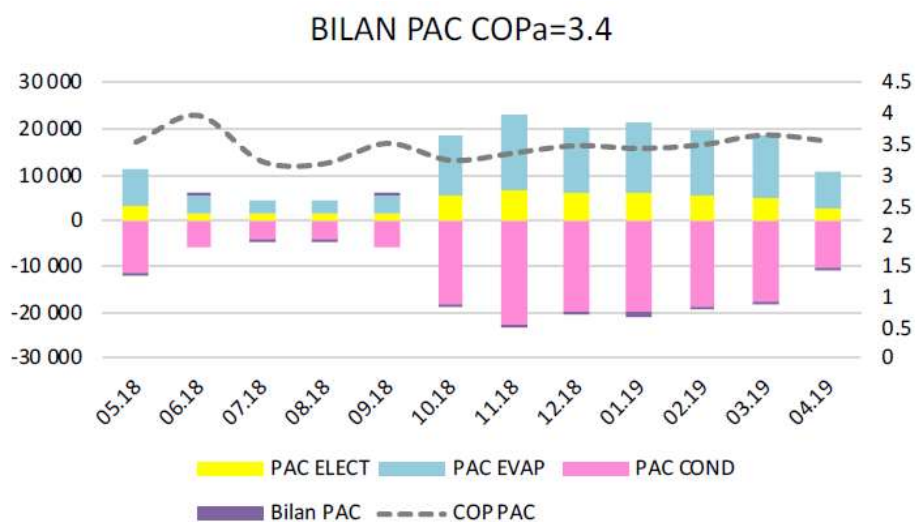


La quantité globale de chaleur effective fournie par le condenseur est inférieure à celle du modèle en hiver et supérieure à mi saison et en été. On retrouve le même phénomène que celui observé sur le « solaire indirect » et sur la « récupération ventilation ».



4.2.7 Bilan énergétique PAC

Le bilan énergétique de la PAC peut être vérifié par comparaison entre le relevé du compteur de chaleur au niveau de la source froide de l'évaporateur C41, le compteur de chaleur production de chaleur du condenseur PAC C42 et la consommation électrique de la PAC :

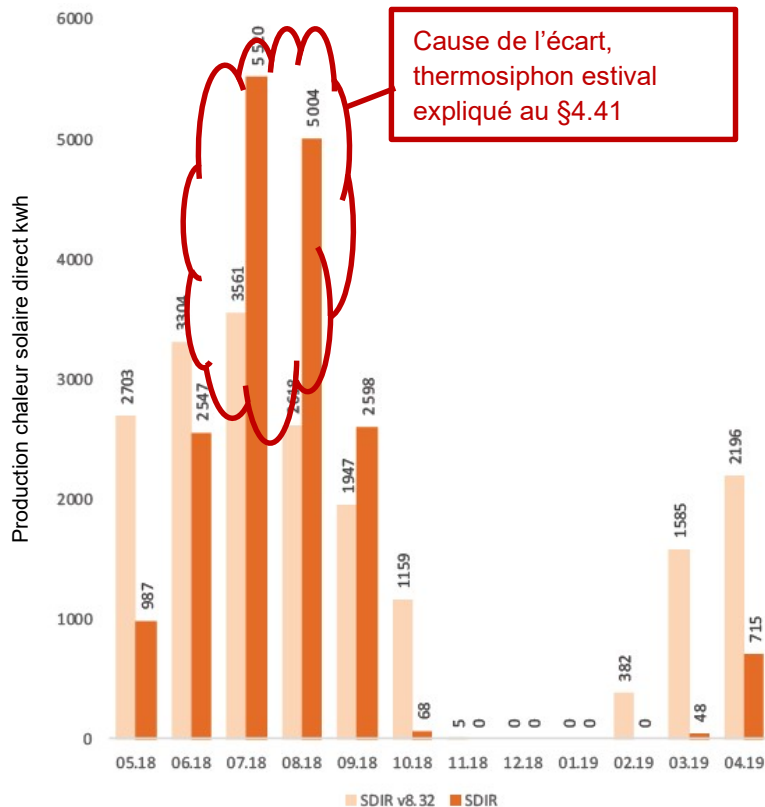


Le bilan mensuel de la PAC est très bien équilibré. Ce qui prouve que les compteurs fonctionnent bien et on peut exclure une erreur de mesure au niveau de la production de chaleur de la PAC. Le COP moyen annuel atteint 3.4 (sans périphérique, uniquement le fonctionnement de la PAC).



4.2.8 Production solaire « directe »

La production solaire directe est mesurée par le compteur C21 après l'échangeur de chaleur, par conséquent la perte de ce dernier est déjà déduite de la mesure. La comparaison avec le calcul théorique figure ci-dessous :

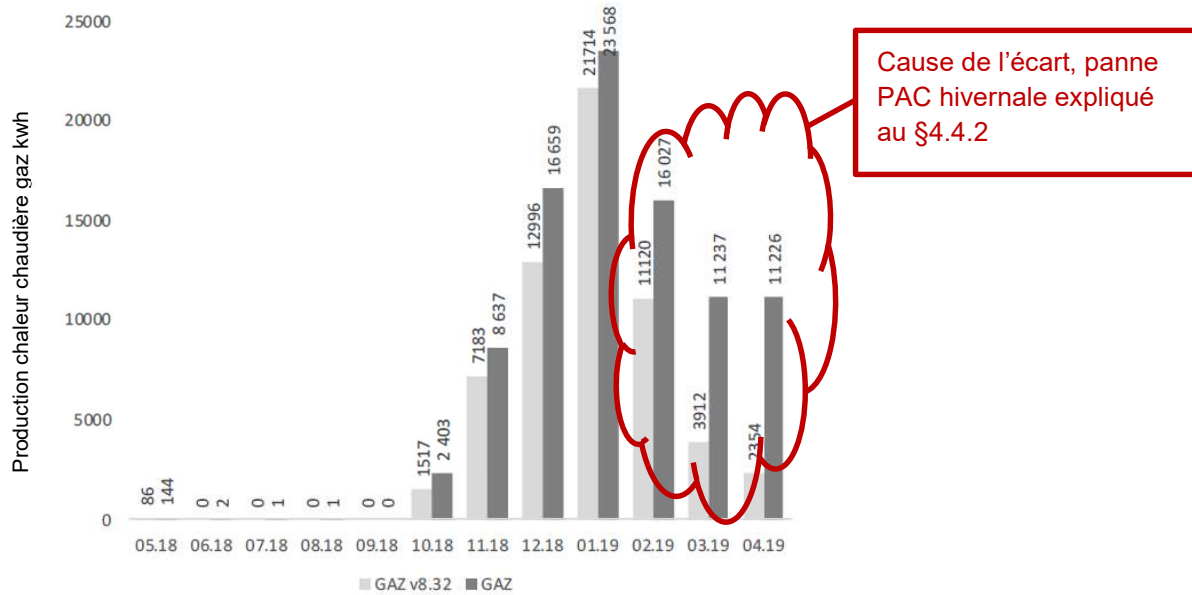


L'analyse de la production solaire directe indique des quantités d'énergie effectives inférieures à mi saison à celles du modèle et nettement supérieures en été. La production totale mesurée est inférieure de 11% à celle du modèle ce qui est plausible. En revanche la répartition mensuelle ne « colle » pas bien. En été la production mesurée dépasse celle de la consommation d'eau chaude. De plus la PAC a également fonctionné à cette période.



4.2.9 Production chaudière à gaz

La barre grise foncée indique le relevé du compteur C5 en sortie de chaudière gaz, la production mesurée est celle du chauffage et de l'eau chaude sanitaire confondus. Les résultats simulés figurent en gris clair et sont comparés aux mesures ci-après :

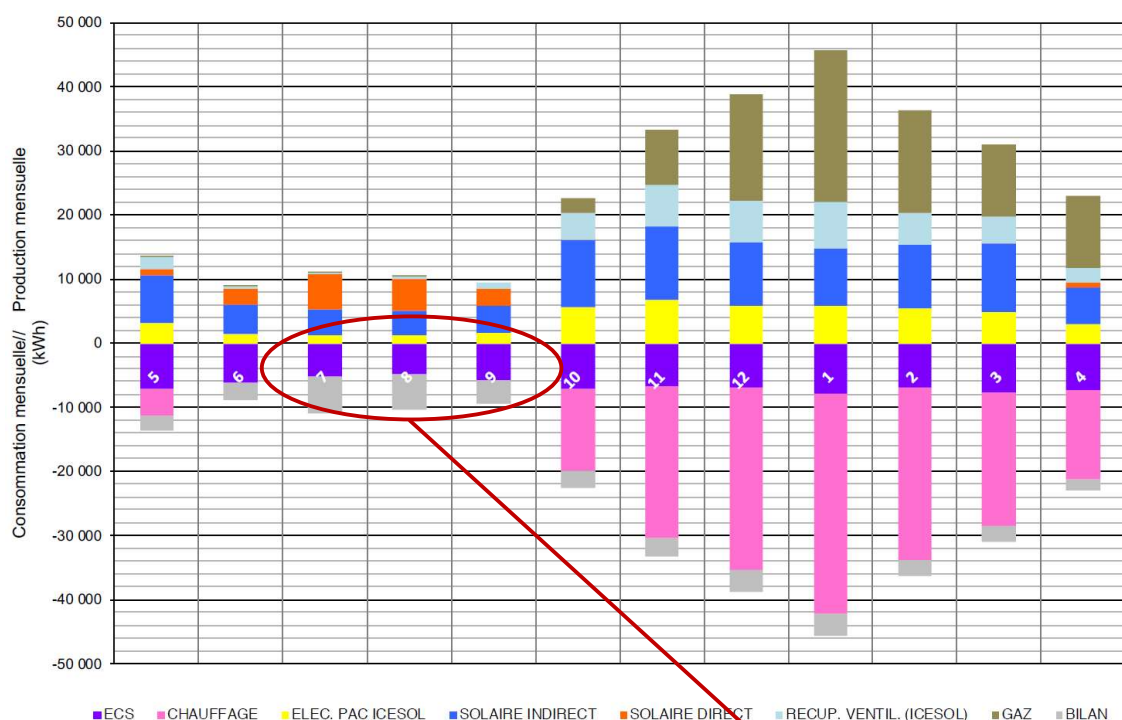


La chaudière à gaz a consommé systématiquement plus que ce qui est simulé avec le modèle, mais l'allure générale est similaire. Entre janvier et avril 2019 elle a fonctionné nettement plus que prévu ce qui explique pourquoi la PAC a moins produit de chaleur pendant cette période. La chaudière a donc produit 37% de l'énergie alors que le modèle en prévoyait 25%.



4.3 Comparaison production de chaleur et consommation

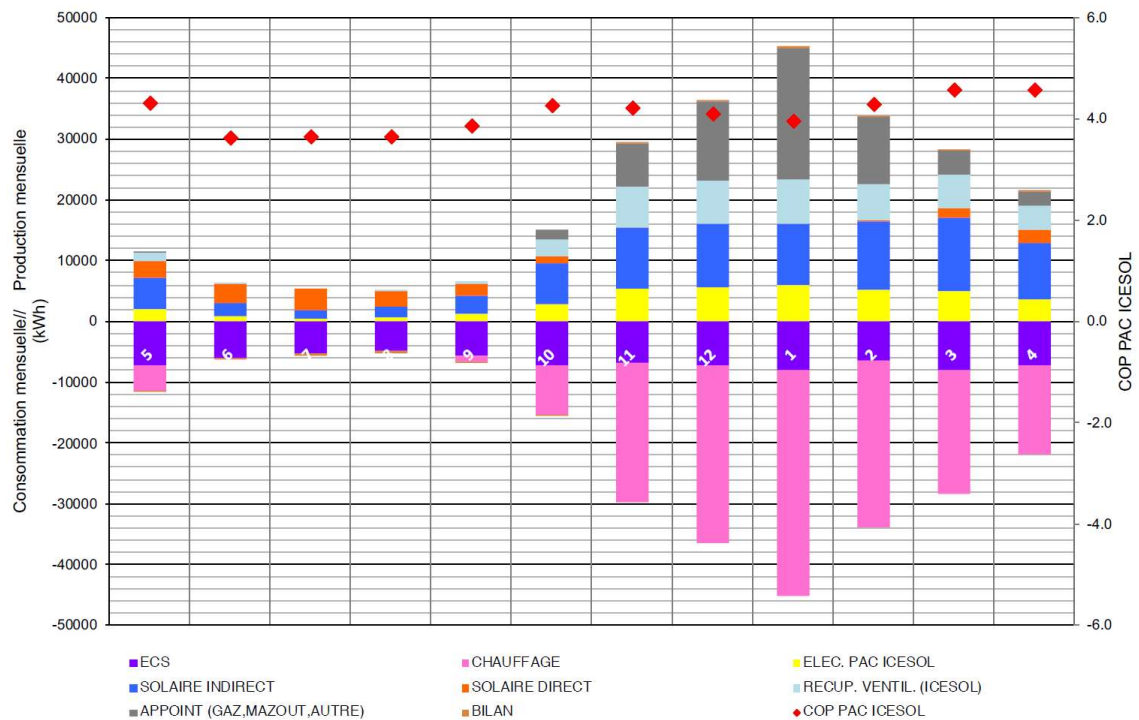
Toutes les mesures et calculs théoriques de production et consommation énergétiques ont été comparés et représentés sur deux graphiques. Le premier graphique compare les besoins énergétiques mensuels du bâtiment (chauffage et eau chaude sanitaire) entre mai 2018 et avril 2019 avec l'énergie que l'installation de production de chaleur a besoins pour fonctionner. Tous les paramètres sont issus des mesures.



La consommation et la production énergétique de l'immeuble ne sont pas équilibrées (barre grise « bilan »). En hiver, l'écart est faible et peut être expliqué par des pertes thermiques dans la chaufferie. Entre juin et septembre en revanche, l'écart se creuse jusqu'à atteindre 50%. Ce qui est trop important pour être des pertes thermiques. Une proposition d'explication figure au chapitre « interprétation des résultats » plus bas.



Le second graphique compare les besoins énergétiques mensuels du bâtiment (chauffage et eau chaude sanitaire) entre mai 2018 et avril 2019 avec l'énergie que l'installation de production de chaleur a besoins pour fonctionner. Les valeurs ont été simulées avec la météo réelle et les paramètres de fonctionnement effectifs tel que décrits au § 4.1.1.



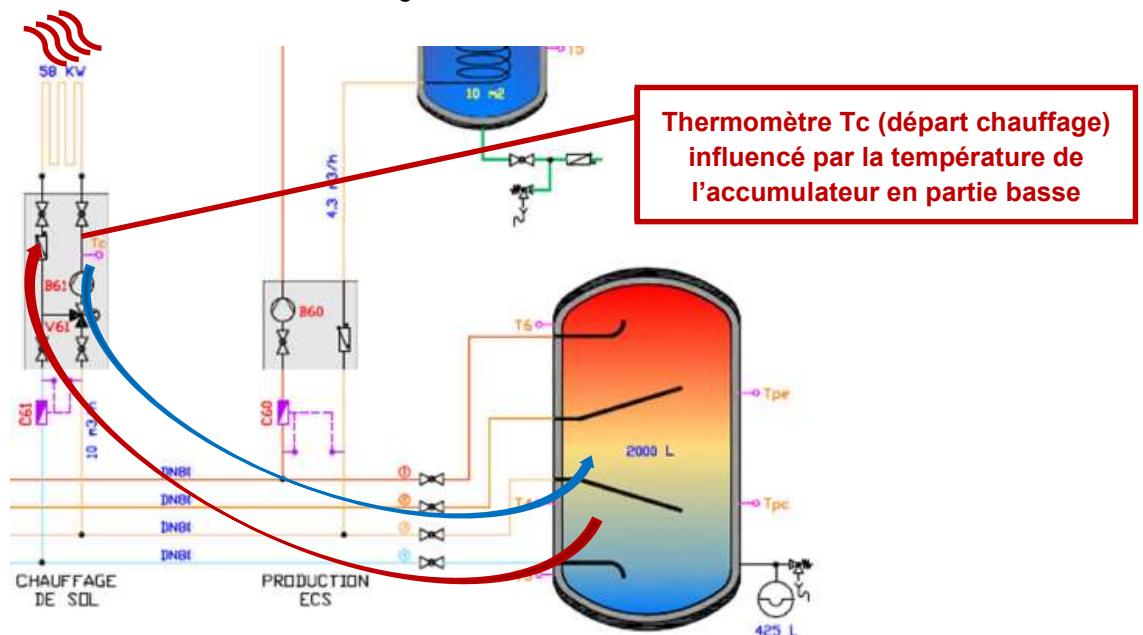
A part les pertes estivales citées précédemment, les valeurs simulées sont relativement bien corrélées avec les mesures. A noter que le COP PAC ICESOL affiché comprend toute l'énergie produite par l'installation (yc. le solaire directe) déduction faite de la production de la chaudière à gaz.



4.4 Interprétation des résultats

4.4.1 Ecart de production-consommation en période estivale

Globalement, le système ICESOL produit trop d'énergie durant les mois d'été (juin à septembre), cette chaleur n'est pas enregistrée par le compteur de consommation ECS ni par le compteur chauffage. Il ne s'agit pas d'une erreur de mesure et bien d'une lourde perte thermique qui met l'eau chaude sanitaire constamment en demande. La production solaire directe ne suffit pas et l'enclenchement de la pompe à chaleur, voire de la chaudière à gaz devient nécessaire. Cette situation tout à fait anormale est déjà été observée l'été 2017 et la conclusion a été qu'un thermosiphon s'est établi dans le réseau de chauffage au sol et refroidit l'accumulateur de chauffage selon le schéma ci-dessous :



Le phénomène avait été détecté en 2017 et nous avons demandé à ce que les vannes de distribution du chauffage au sol soient fermées à la fin du printemps 2017 pour couper le phénomène.

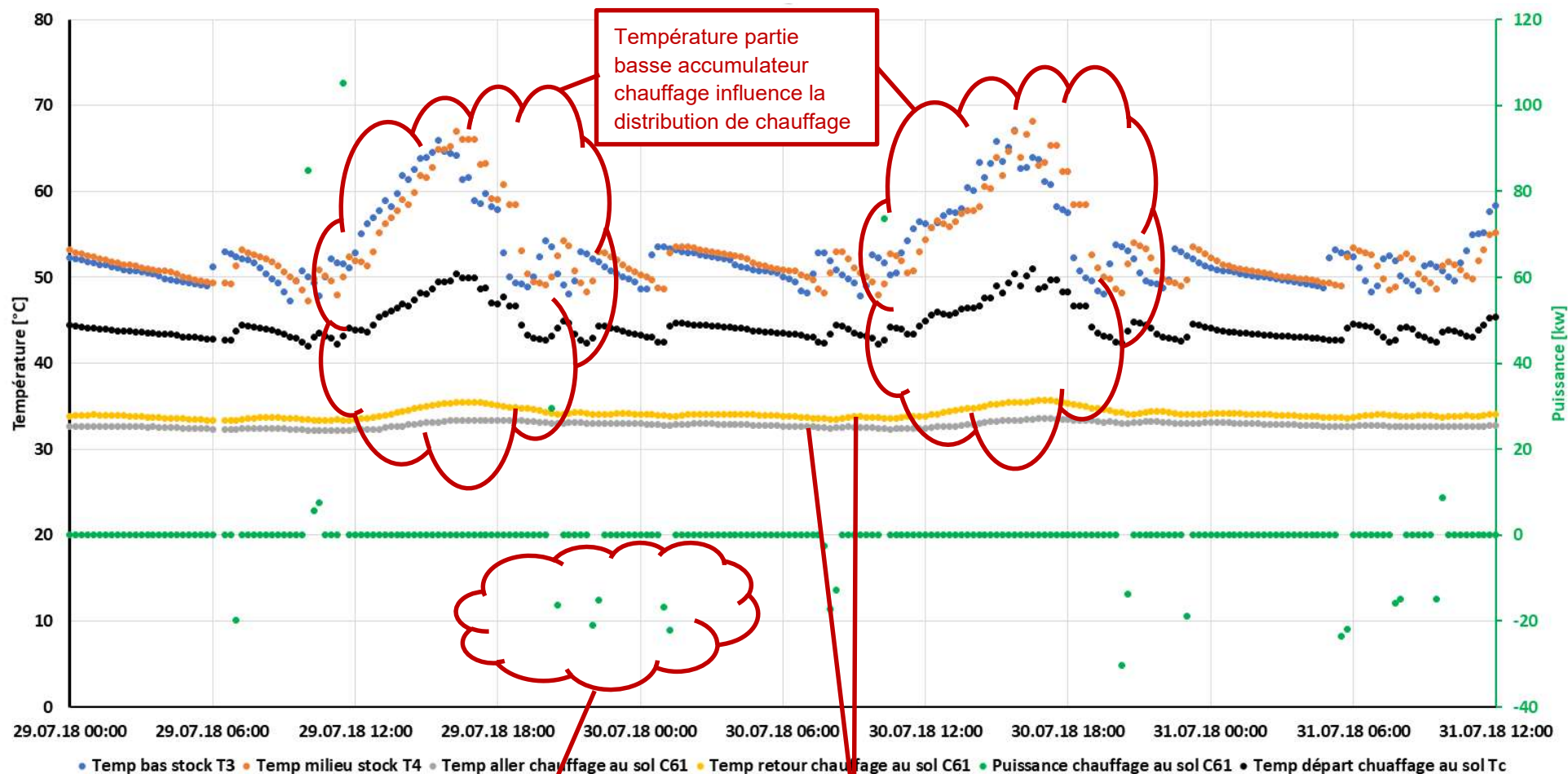
L'effet s'est reproduit en été 2018, ce qui est difficile à comprendre.

Selon les relevés de température du compteur distribution chauffage C61, la température retour chauffage est plus élevée que la température aller. Le graphique ci-après montre que la température de départ chauffage Tc et les mesures de température du compteur de chaleur sont influencées par la température qui règne dans la partie inférieure de l'accumulateur chauffage (T3 et T4).

Seule probabilité, les vannes de distribution de chauffage n'ont pas été fermées et un thermosiphon s'est établi à l'envers dans la distribution de chauffage. Ce qui est confirmé par quelques mesures négatives de puissance données par le compteur C61. Les clapets anti-retour sont souvent inefficaces pour les débits faibles et la pompe arrêtée ne bloque pas le flux d'eau de chauffage. Le graphique ci-dessous illustre le phénomène :



Mis en évidence d'un siphon thermique dans le réseau de distribution de chauffage





Cette déperdition parasite implique la relation de cause à effet suivante :

1. Les pertes par thermosiphon durant la nuit impliquent que la température de l'accumulateur chauffage est insuffisante pour assurer la production d'eau chaude le matin
2. Enclenchement de la pompe à chaleur pour remonter la température de l'accumulateur de chauffage le matin
3. Activation de la récupération de chaleur sur l'air extrait.
4. Enclenchement de la chaudière gaz (très ponctuel)
5. En cours de journée, le bas de l'accumulateur chauffage est refroidi par le thermosiphon et ce qui augmente la production solaire directe.

4.4.2 Ecart de consommation théorique-mesurée en période hivernale

Le chauffage du bâtiment surconsomme de manière inhabituelle + 36% en moyenne par rapport au calcul théorique SIA corrigé en considérant les paramètres de fonctionnement du bâtiment (cf §4.1.1). L'explication de cette situation anormale peut être expliquée par le lien de cause à effet suivant :

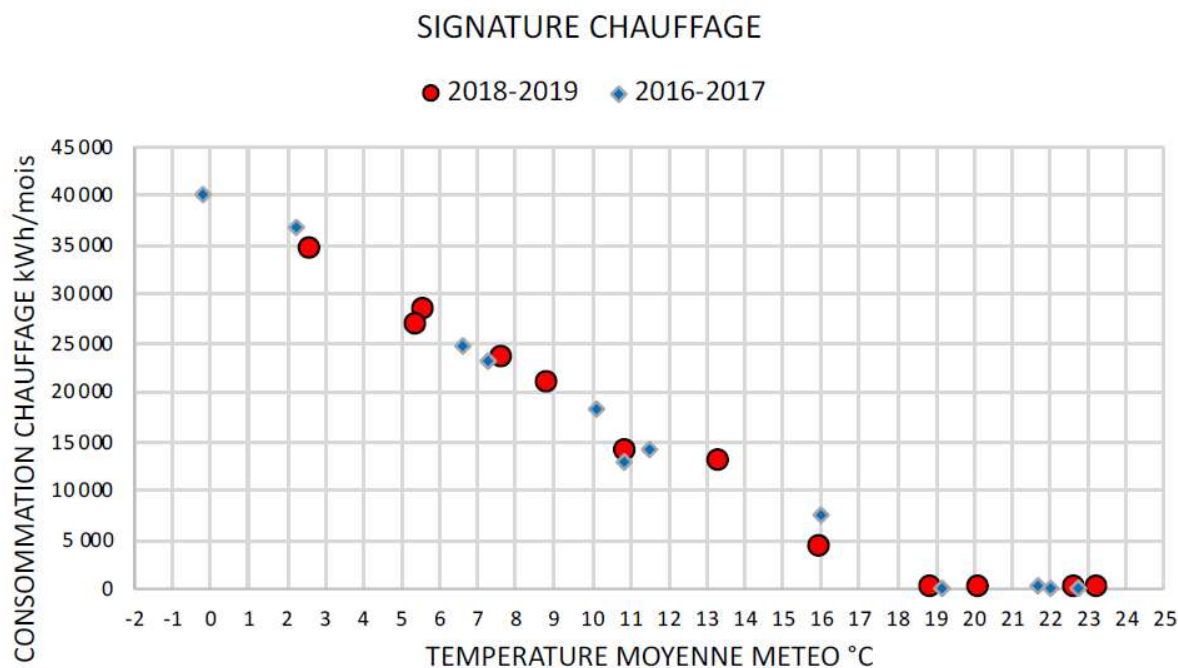
1. Le réseau de distribution de chauffage n'est pas équilibré au sein de l'immeuble.
2. Les appartements du dernier étage ont moins de débit disponible au niveau des boucles de chauffage au sol et plus de déperditions thermiques à cause du plus grand nombre de surface contre l'extérieur.
3. Pour garantir une température d'ambiance convenable au dernier étage, la température de départ chauffage de tout l'immeuble doit être augmentée.
4. Les appartements ne sont pas équipés de thermostat d'ambiance. La régulation de la puissance par appartement n'étant possible qu'en actionnant manuellement les vannes des collecteurs de distribution du chauffage, ce que les locataires ignorent ou n'osent pas toucher.
5. Pour garantir le confort des appartements d'attique, les autres étages sont surchauffés.
6. Il est probable que la température élevée implique que certains locataires doivent ouvrir les fenêtres pour être confortables.

Il est également possible que les stores soient mal employés et qu'ils soient oubliés en position basse ou entre-ouverte. L'apport solaire passif est alors limité.

Le chauffagiste a été avisé de la dérive de la température intérieure, et un réglage de la courbe de chauffe a été proposée avant la saison de chauffe 2018-2019 (correction des températures de départ chauffage et coupure chauffage lorsque la température extérieure dépasse les 15°C).



Equilibrer le réseau nécessiterait d'intervenir dans chaque appartement pour régler les vannes, ce qui est long et laborieux lorsque le bâtiment est habité. Par conséquent, le réglage proposé est difficile à mettre en œuvre. A ce stade, aucune trace du réglage n'est visible comme en témoigne les relevés des consommations de la dernière année ou la signature énergétique comparative des deux dernières saisons de chauffe :



La forte demande de chauffage durant les mois d'hiver (janvier à mars) met à rude épreuve la production de chaleur. La demande de puissance est telle que la température de la source froide descend jusqu'en dessous de la limite inférieure exploitable par la pompe à chaleur. Elle se met en alarme basse pression (température du gaz trop basse au niveau de l'évaporateur). La chaudière à gaz prend alors le relais et assure la production de chaleur jusqu'à ce que le chauffagiste vienne réarmer manuellement la pompe à chaleur pour qu'elle puisse se remettre en route. Cette dernière étape a été oubliée pendant quelque semaine d'hiver ce qui explique la surconsommation de gaz observée sur la période février-avril 2019.

Au niveau de l'eau chaude sanitaire, l'écart entre les relevés de consommation effectifs et la norme corrigée est faible. La distribution est équipée d'une boucle de recirculation sanitaire dont la pompe fonctionne en continu. Il a été proposé de couper la pompe durant la nuit via une horloge pour limiter la déperdition inutile engendrée. L'effet semble visible sur la consommation de la dernière année qui a baissé de 5% environ par rapport aux années précédentes.



4.5 Etude spécifique récupération de chaleur sur l'air extrait

4.5.1 Performance de récupération de chaleur intégrée au système ICESOL comparaison simulation-mesures

La performance de la récupération de chaleur intégrée au système ICESOL étudié a été évaluée sur la base des relevés énergétiques. Elle dépend de paramètres propres au bâtiment étudié, à savoir :

Débit d'air extrait		Temp. air extrait	Besoins en chaleur (chauffage et ECS)*	Volume stock à changement de phase
m ³ /h	m ³ /h.m ²	°C	MJ/m ² .an	m ³
2'400	0.8	23	296	5

* Relevés énergétiques moyens chauffage et eau chaude sanitaire sans correction météorologique

Le tableau ci-après résume la performance de la récupération de chaleur tout au long du Projet P&D :

Récupération de chaleur simulée*	Energie récupérée sur la ventilation (source froide)		Ecart simulation-mesures
-	2016-2018	2018-2019	2018-2019
MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	%
49.7	~42**	47.4***	- 5

* Avec paramètres de fonctionnement propres au bâtiment, voir §4.1.5

** Compteur de chaleur C41 défaillant, valeurs déduites par calcul de l'équilibre thermique au niveau de l'évaporateur de la PAC.

*** Relevé compteur de chaleur C41, pour rappel la pompe à chaleur est tombée en panne entre février et avril 2019 la récupération de chaleur a été limitée pendant cette période.

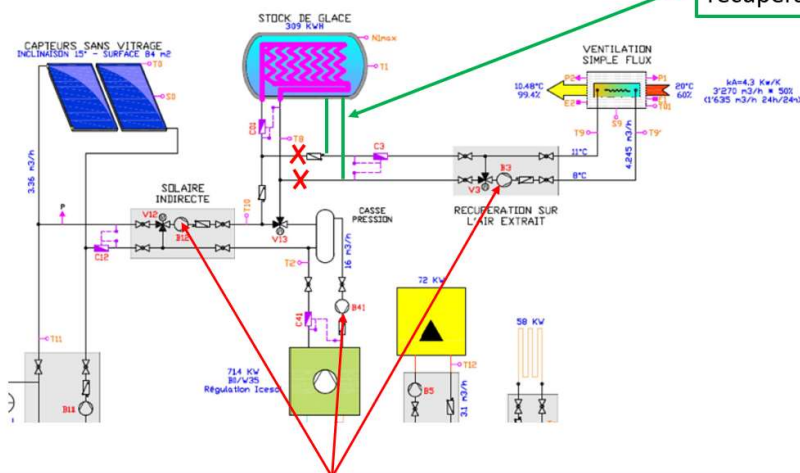
A noter que le débit d'air extrait de l'installation de ventilation joue un grand rôle dans la quantité d'énergie récupérée. La quantité d'énergie théorique récupérable serait de 75MJ/m².an si l'installation de ventilation tournait au débit maximum constant de 3'900m³/h. Nous avons pris la décision de limiter la consigne de pression du ventilateur de manière à ce que le débit moyen atteigne 2400m³/h environ. C'est le débit minimum en dessous-duquel il est déconseillé d'aller au risque d'avoir des problèmes d'humidité et d'odeurs dans le bâtiment. En limitant le débit du monobloc de ventilation, la récupération de chaleur est réduite, mais également la consommation de chaleur du bâtiment. Le volume du Stock à changement de phase joue également un rôle dans la quantité d'énergie récupérée de l'air extrait. Dans notre cas le volume est d'environ 1.7litres/m² de SRE.



4.5.2 Récupération de chaleur sur ventilation à simple-flux - retour d'expérience pratique

Durant les deux premières années de suivi énergétique, la récupération de chaleur semblait inférieure aux valeurs simulées. Après plusieurs investigations, nous avons trouvé deux causes :

La première est en lien avec le schéma hydraulique initial :



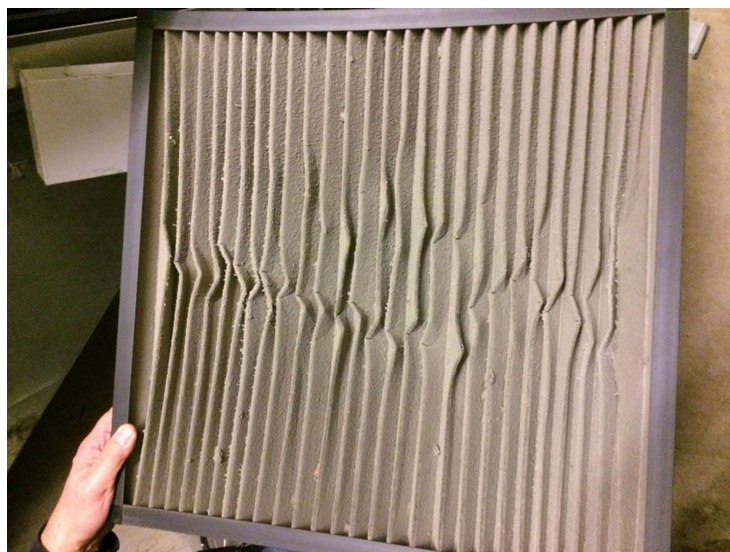
Proposition:
Modification hydraulique du circuit de
récupération de chaleur

Problème:

Déséquilibre débit des pompes entre évaporateur et sources, ce qui pèjore la récupération de chaleur sur l'air. Mais améliore la production solaire indirecte

La modification du schéma hydraulique a été fait fin janvier 2018.

La seconde est l'encrassement du filtre à poussière situé à l'amont de la batterie de récupération de chaleur du monobloc. Ce dernier est complètement obstrué et limitait le débit extrait à 800m³/h le jour ou nous sommes intervenus fin mars 2018 :





L'entreprise en charge de la maintenance de l'installation de ventilation procédait pourtant à des remplacements de filtre périodiques. Pour pallier au problème, un nouveau caisson bénéficiant d'une surface de filtration plus grande a été mis en place en été 2018. Par ailleurs, le nombre annuel de remplacement de filtre a été augmenté à 2X par an au lieu de 1X. De cette manière, l'encrassement devrait ralentir.

4.5.3 Comparatif de performance système de récupération de chaleur concurrents

Pour le cas étudié, le tableau ci-après décrit le coefficient de performance de la récupération de chaleur du système ICESOL couplée à un accumulateur à changement de phase :

Energie récupérée sur la ventilation (source froide)*	Energie produite par la PAC **	Energie électrique nécessaire pour la récupération de chaleur***		SPF système de récupération de chaleur ICESOL
		Pertes de charge batterie et filtre, pompe de circulation (consommation monobloc)	Pompe à chaleur	
MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	-
47.4	60.6	2.3	13.2	3.9

Pour rappel, le débit d'air extrait est de 0.8m³/h.m² et la température intérieur 24°C.

* Relevé compteur de chaleur C41 année 2018-2019

** Estimation avec COP moyen admis 4.6 (5.7 B10W35 et 3.4 B10W55) 50% chauffage et 50% ECS. Les valeurs simulées indiquent un maximum théorique de 63.5MJ/m².an

***Estimation électricité consommation par les pompes de circulation, surconsommation électrique monobloc liés à la perte de charge du filtre et de la batterie de récupération de chaleur, consommation PAC. La consommation électrique du ventilateur d'extraction n'est pas comptée car elle fait partie des besoins électriques nécessaires au renouvellement d'air et non à la récupération de chaleur.



Les performances d'une installation à double-flux mesurée sur un bâtiment de logement de taille comparable construit à Genève en même temps que le bâtiment étudié figurent ci-dessous :

Débit d'air extrait		Energie récupérée par l'échangeur à double-flux *	Energie électrique nécessaire pour la récupération de chaleur**	SPF système de récupération de chaleur
m ³ /h	m ³ /h.m ²	MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	-
3'500	1.0	61.2	5.3	11.5

La température intérieure du bâtiment mesuré est de 21°C en moyenne.

* Calculé sur la base de la mesure de la température extraite et pulsé ainsi que du débit d'air affiché par le monobloc.

** Calculé sur la base d'un relevé d'un compteur électrique spécifique (consommation du ventilateurs air pulsé uniquement, la consommation du ventilateur d'extraction a été déduite car elle fait partie des besoins électriques nécessaires au renouvellement d'air et non à la récupération de chaleur)

L'université de Genève a mené une étude intitulée *COMPARE RENOVE : du catalogue de solutions à la performance réelle des rénovations énergétiques Ecart de performance, bonnes pratiques et enseignements tirés* [2]. La performance d'un système de récupération de chaleur traditionnels fonctionnant sur la base d'une pompe à chaleur exploitant directement l'air vicié et préchauffant l'ECS a été mesuré. Les hypothèses de calcul figurent ci-après :

- Bâtiment de logements rénové à Meyrin (Genève)
- Préchauffage solaire de l'ECS couvrant 40% des besoins
- Température intérieure inconnue
- Débit d'extraction d'air 0.9 m³/h.m²
- Volume stock 0.22 litres/m² SRE

Energie produite par la pompe à chaleur *	Energie électrique nécessaire pour la récupération de chaleur***		SPF système de récupération de chaleur
	Pertes de charge batterie et filtre, pompe de circulation (consommation monobloc)**	Pompe à chaleur*	
MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	MJ/m ² .an	-
25.9	2.3	5.3	3.4

* Selon mesures effectuée par l'université de Genève

** Selon estimation consommation électrique des pompes de circulation et surconsommation électrique monobloc liés à la perte de charge du filtre et de la batterie de récupération de chaleur.



Le tableau suivant récapitule les performances de récupération de chaleur des 3 systèmes décrits précédemment :

Système de récupération de chaleur	Energie produite		Electricité consommée	SPF système de récupération de chaleur
	MJ/m ² .an	Quantité MJ/m ² .an Type -	MJ/m ² .an	MJ/m ² .an
ICESOL avec batterie de récupération de chaleur sur simple-flux via stock à changement de phase	60.6	ECS & chauffage	15.5	3.9
Double-flux	61.2	Chauffage	5.3	11.5
Simple-flux avec récupération de chaleur par PAC	25.9	ECS	7.6	3.4

En résumé l'installation à double-flux est la plus efficace en termes de performance globale. La quantité d'énergie récupérée est élevée et pourrait l'être encore plus en ajoutant une pompe à chaleur exploitant vicié et réchauffant l'air pulsé. Nous n'avons pas de données mesurées à ce sujet et le comparatif pourrait être intéressant.

La solution récupération de chaleur intégré au système ICESOL produit autant d'énergie que l'alternative à double-flux. A noter que dans le cas étudié, la surface solaire est faible vis-à-vis de la consommation énergétique, ce qui se traduit par un abaissement de la température du stock à changement de phase et donc une plus grande sollicitation de la récupération de chaleur sur l'air extrait. Le SPF est correcte considérant que le système produit de l'ECS.

Le simple-flux avec récupération de chaleur par PAC est la solution la moins performante en termes de SPF. La quantité d'énergie annuelle produite est faible car l'installation solaire thermique couvre tous les besoins en ECS durant l'été et le système de récupération de chaleur est à l'arrêt. Cette solution pourrait être améliorée en permettant à la pompe à chaleur de produire du chauffage lorsque la demande en ECS est remplie. La performance de la récupération de chaleur devrait alors se rapprocher de celle des deux autres systèmes comparés.

ATTENTION, la comparaison entre les systèmes est délicate car les caractéristiques de fonctionnement du bâtiment influencent l'énergie que l'installation de production de chaleur peut récupérer. La température intérieure ambiante, le débit de ventilation, la température d'énergie produite (ECS ou chauffage) et le volume du stock sont les paramètres clés qui influencent le plus la performance de la récupération de chaleur.



4.5.4 Comparatif performance environnementale et financière d'un système de récupération de chaleur à simple-flux ou double-flux

Les tableaux ci-après proposent de comparer la performance environnementale et financière théoriques de l'installation ICESOL étudiée, mais en faisant varier l'installation de ventilation (double-flux / simple-flux) et en faisant varier le taux de couverture des besoins énergétiques :

Type de ventilation	Surface de panneaux solaire	Puissance PAC (B0W35)	Coûts installation de ventilation à simple-flux hygro-réglable*	Coûts prod. de chaleur ICESOL *	Coûts total installation*	Besoins de chaleur chauffage et eau chaude	SPF système complet**	Taux non couvert par système ICESOL**	Energie primaire consommée***
-	m ²	kw	Chf/m ²	Chf/m ²	Chf/m ²	MJ/m ² .an	-	%	MJ/m ² .an
Simple-flux	65	18	30	70	100	250	2.00	31	354
Simple-flux	165	47	30	115	145	250	3.75	4	216
Simple-flux	258	74	30	155	185	250	4.60	<1%	177
Double-flux	51	12	60	65	125	200	1.70	41	326
Double-flux	128	33	60	100	160	200	2.95	12	229
Double-flux	165	41	60	115	175	200	3.50	6	196
Double-flux	205	51	60	130	190	200	3.90	4	178

* Coûts de l'installation et honoraires effectifs selon §4.7 déduction faite de l'équipement de mesure du suivi énergétique. Le prix a été ajusté pour augmenter la surface de capteur et la puissance de la pompe à chaleur en fonction des variantes comparées

** Selon simulation présentée au §4.6.4

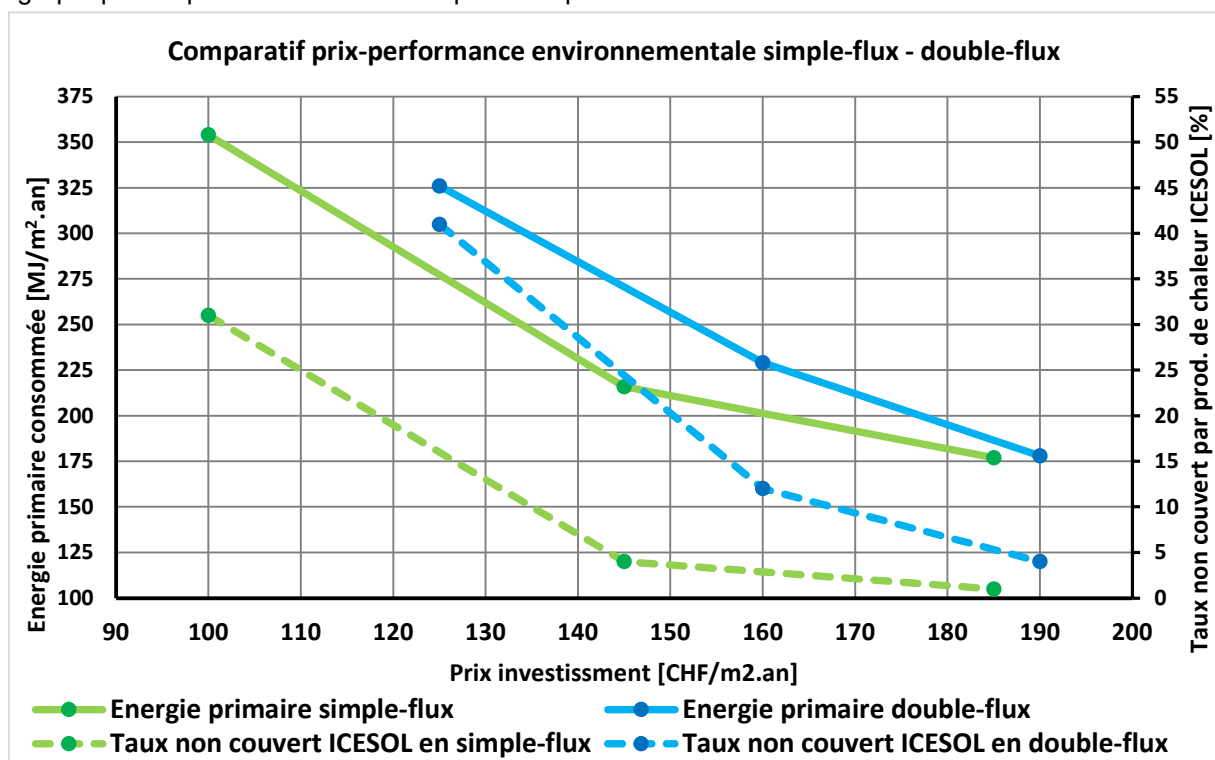
*** Consommation électriques liées à la perte de charge batterie et filtre, pompe de circulation (dans le cas du simple-flux) ou consommation électrique du ventilateur de pulsion (dans le cas du double-flux) décrite au tableau § 4.5.3 inclus



Les hypothèses de calcul figurent ci-après :

- Standard Minergie neuf, consommation réaliste avec température intérieure de 21°C
- Débit d'air thermiquement actif ventilation à simple-flux 0.7m³/h.m²
- Débit d'air thermiquement actif ventilation à double-flux 0.45m³/h.m²
- Les besoins de chaleur incluent les pertes de distribution et stockage
- Chaudière gaz d'appoint comptée avec un rendement de 95%
- le calcul de l'énergie primaire inclut les besoins électriques de la PAC et de la ventilation ainsi que l'appoint gaz avec les facteurs de conversions suivants : électricité 3.1 kwh/kwh, gaz 1.1 kwh/kwh

Le graphique ci-après illustre le tableau présenté précédemment :



La récupération de chaleur sur l'air vicié est peu coûteuse à intégrer dans un système de production de chaleur type ICESOL et permet de couvrir environ 16% des besoins totaux.

A noter qu'il est difficile de comparer le surcoût lié aux installations de ventilation car il y a des coûts indirects liés à l'installation de ventilation à double-flux :

- L'emprise dans les gaines techniques et dalles plus importantes qui implique une diminution de la surface de plancher et donc une baisse de la valeur du bâtiment
- Coordination technique plus complexe
- Dalles en béton à épaissir pour noyer les tubes de pulsion d'air neuf
- Multiplication du nombre de clapets coupe-feu à mettre en place et raccorder

En revanche l'installation à double-flux offre davantage de confort aux habitants que le simple-flux.



4.6 Clé de dimensionnement système ICESOL

4.6.1 Contexte

Suivant le contexte d'un projet il est toujours important de pouvoir disposer rapidement des ordres de grandeur des différents composants principaux du système IceSol. Pour atteindre cet objectif une analyse de sensibilité des performances du système IceSol combinée à des ratios standards issus de notre expérience a donc été entreprise à l'aide du modèle.

4.6.2 Immeuble considéré

L'immeuble et les cas considérés pour l'analyse de sensibilité sont décrits ci-dessous :

Une situation avec un immeuble neuf et un immeuble rénové a été considérée.

Un système de ventilation à simple flux ou double flux a été analysé.

Cela conduit à étudier 4 cas.

A titre illustratif une situation de ce même immeuble non rénové (cas 5) est également donnée.

DESSCRIPTIF	UNITES	CAS 1	CAS 2	CAS 3	CAS 4	CAS 5
Type d'immeuble				Logements		
Surface de référence énergétique A_{ref}	m ²			1000		
Nombre de niveaux	-			4		
Surface par niveau	m ²			180		
Nombre d'appartements par niveau	-			3		
Longueur				23.2		
Largeur				7.7		
Hauteur				10.8		
Surface de l'enveloppe A_{th}	m ²			1029		
Rapport surface enveloppe / surface réf. Énergétique (A_{th}/A_{ref})	-			1.0		
Etat		Neuf		Rénové		Existant non rénové
Type de ventilation		Simple flux	Double flux	Simple flux	Double flux	Sans
Type de récupération de chaleur		Par IceSol	Autonome	Par IceSol	Autonome	Sans
Valeur limite SIA 380/1 Tm annuelle 9.4°C	kWh/m ² /an	28	28	42	42	84
Valeur cible SIA 380/1 Tm annuelle 9.4°C	kWh/m ² /an	16.8	16.8	28	28	
Besoin max. chauffage indicatif (2000 h/an) rapporté à la SRE (AE)	W/m ²	14.0	14.0	21.0	21.0	42.0
Débit d'air neuf de référence	m ³ /h/m ²	0.7	0.7	0.7	0.7	1.4
Puissance totale de réchauffage de l'air neuf	W/m ²	6.0	6.0	6.0	6.0	11.9
Puissance de réchauffage de l'air neuf par la distribution de chauffage	W/m ²	6.0	1.2	6.0	1.2	11.9
Puissance retenue distribution de chauffage	W/m ²	15.6	10.8	23.3	18.6	46.7
Besoin d'eau chaude sanitaire de référence retenu (130% de la norme)	kWh/m ² /an	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1
Besoin total chauffage + eau chaude sanitaire	kWh/m ² /an	55.1	55.1	69.1	69.1	111.1
Part de l'eau chaude sanitaire	%	49%	49%	39%	39%	24%

Le cas de l'immeuble existant, non rénové, n'a pas été analysé en détail. En effet il est préférable, avant d'envisager le recours aux énergies renouvelables, de réduire au maximum les besoins de chauffage par amélioration de l'enveloppe. Si pour une raison ou une autre cette amélioration n'est pas possible, l'approche de dimensionnement sera différente que pour les 4 premiers cas. Cela sera brièvement abordé dans le paragraphe 8.4 « dimensionnement ».

4.6.3 Résultats de l'analyse de sensibilité

L'approche retenue consiste à déterminer la performance du système complet, que l'on peut mesurer par le facteur de performance saisonnier (SPF) ou par le taux de bivalence (besoin non couvert par le système IceSol).

En effet le climat de la Suisse combiné aux exigences légales, quant au traitement de l'eau chaude sanitaire (légionellose), rendent très difficile un système monovalent avec pompe à chaleur avec comme seule source le soleil et la chaleur ambiante.

Dans les résultats ci-dessous la variable principale est la puissance de la pompe à chaleur rapportée à la puissance chauffage.

Les ratios de l'expérience sont :

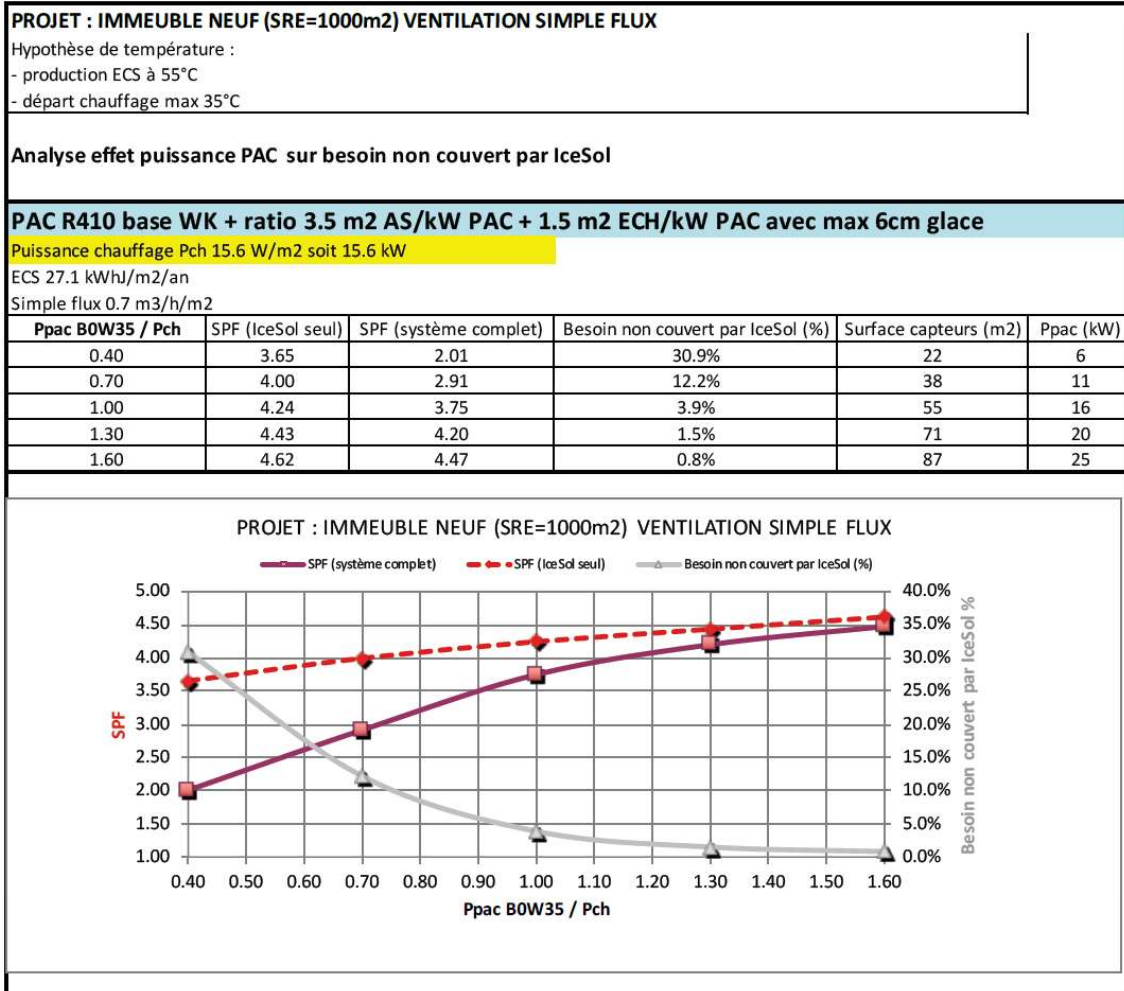
Immeuble avec ventilation simple flux : 3.5 m² de capteurs solaires par kW de pompe à chaleur

Immeuble avec ventilation double flux : 4.0 m² de capteurs solaires par kW de pompe à chaleur



Tout immeuble : 1.5 m² de surface d'échange dans le stock à changement de phase (stock de glace).

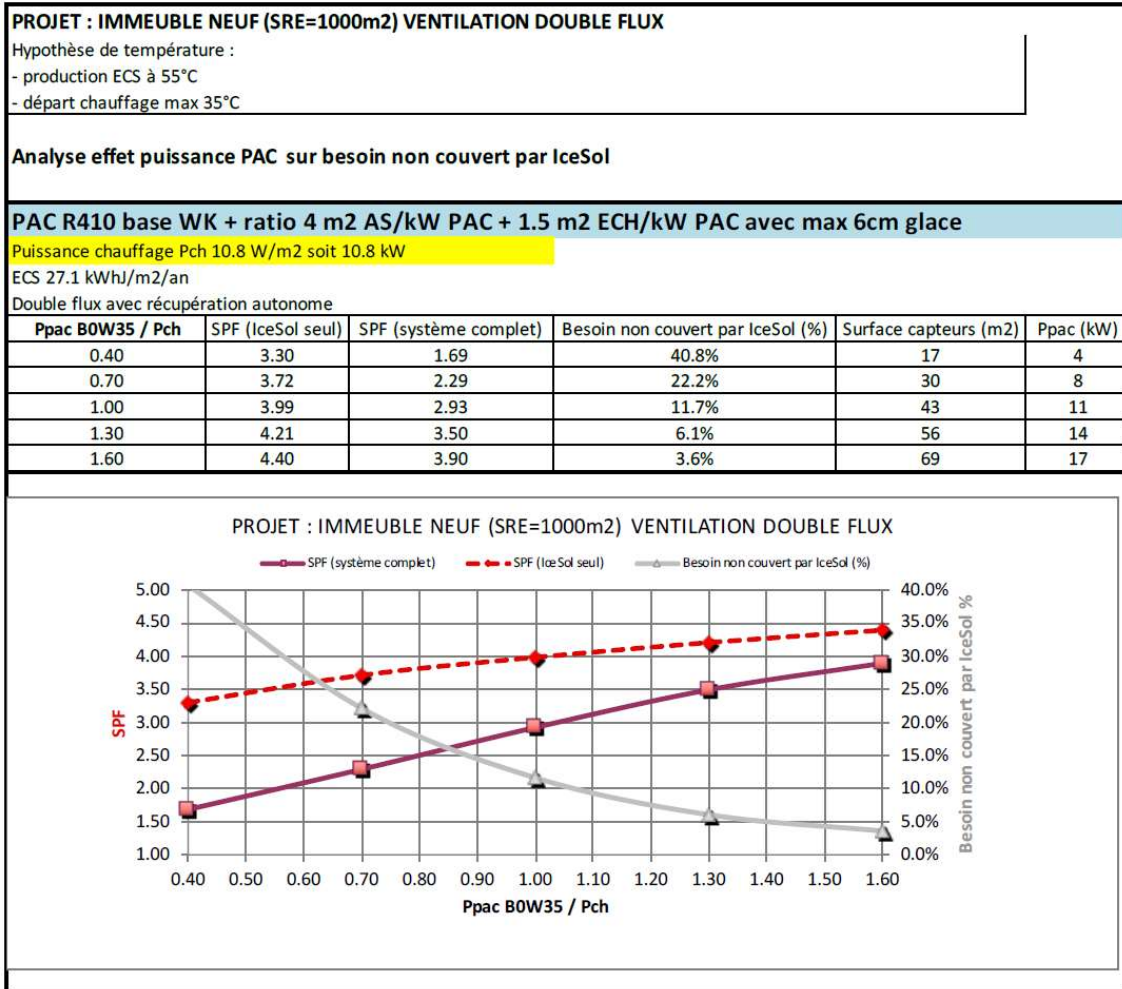
Les résultats détaillés sont donnés dans les paragraphes suivants.



4.6.4 Cas 1 : Immeuble neuf avec ventilation simple-flux



4.6.5 Cas 2 : Immeuble neuf avec ventilation double-flux





4.6.6 Cas 3 : Immeuble rénové avec ventilation simple-flux

PROJET : IMMEUBLE RENOVE (SRE=1000m2) VENTILATION SIMPLE FLUX

Hypothèse de température :

- production ECS à 55°C
- départ chauffage max 35°C

Analyse effet puissance PAC sur besoin non couvert par IceSol

PAC R410 base WK + ratio 3.5 m2 AS/kW PAC + 1.5 m2 ECH/kW PAC avec max 6cm glace

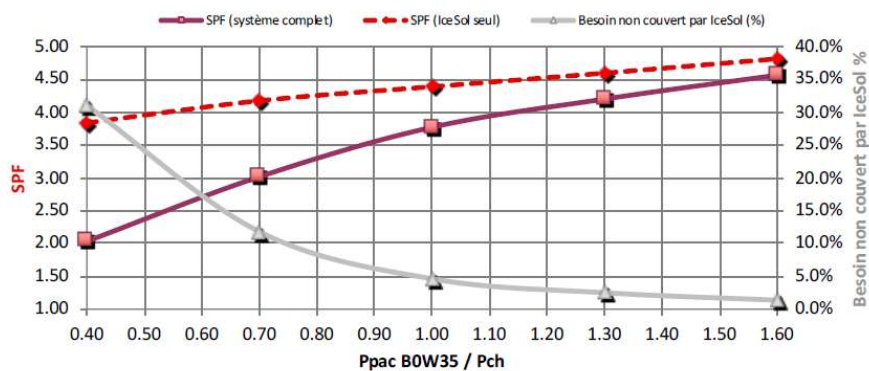
Puissance chauffage Pch 23.3 W/m2 soit 23.3 kW

ECS 27.1 kWh/m2/an

Simple flux 0.7 m3/h/m2

Ppac B0W35 / Pch	SPF (IceSol seul)	SPF (système complet)	Besoin non couvert par IceSol (%)	Surface capteurs (m2)	Ppac (kW)
0.40	3.84	2.04	31.1%	33	9
0.70	4.18	3.02	11.8%	57	16
1.00	4.39	3.77	4.6%	82	23
1.30	4.60	4.21	2.5%	106	30
1.60	4.82	4.57	1.4%	130	37

PROJET : IMMEUBLE RENOVE (SRE=1000m2) VENTILATION SIMPLE FLUX





4.6.7 Cas 4 immeuble rénové avec ventilation double-flux

PROJET : IMMEUBLE RENOVE (SRE=1000m²) VENTILATION DOUBLE FLUX

Hypothèse de température :

- production ECS à 55°C
- départ chauffage max 35°C

Analyse effet puissance PAC sur besoin non couvert par IceSol

PAC R410 base WK + ratio 4 m² AS/kW PAC + 1.5 m² ECH/kW PAC avec max 6cm glace

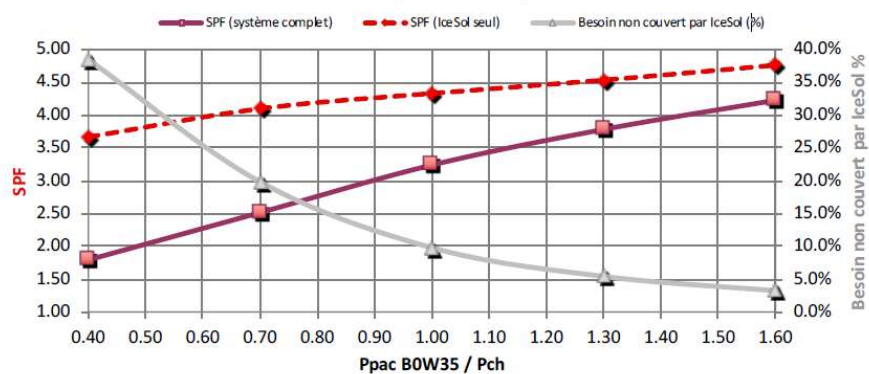
Puissance chauffage Pch 18.6 W/m² soit 18.6 kW

ECS 27.1 kWh/m²/an

Double flux avec récupération autonome

Ppac B0W35 / Pch	SPF (IceSol seul)	SPF (système complet)	Besoin non couvert par IceSol (%)	Surface capteurs (m ²)	Ppac (kW)
0.40	3.67	1.80	38.5%	30	7
0.70	4.10	2.52	19.8%	52	13
1.00	4.33	3.24	9.8%	74	19
1.30	4.53	3.78	5.4%	97	24
1.60	4.76	4.23	3.3%	119	30

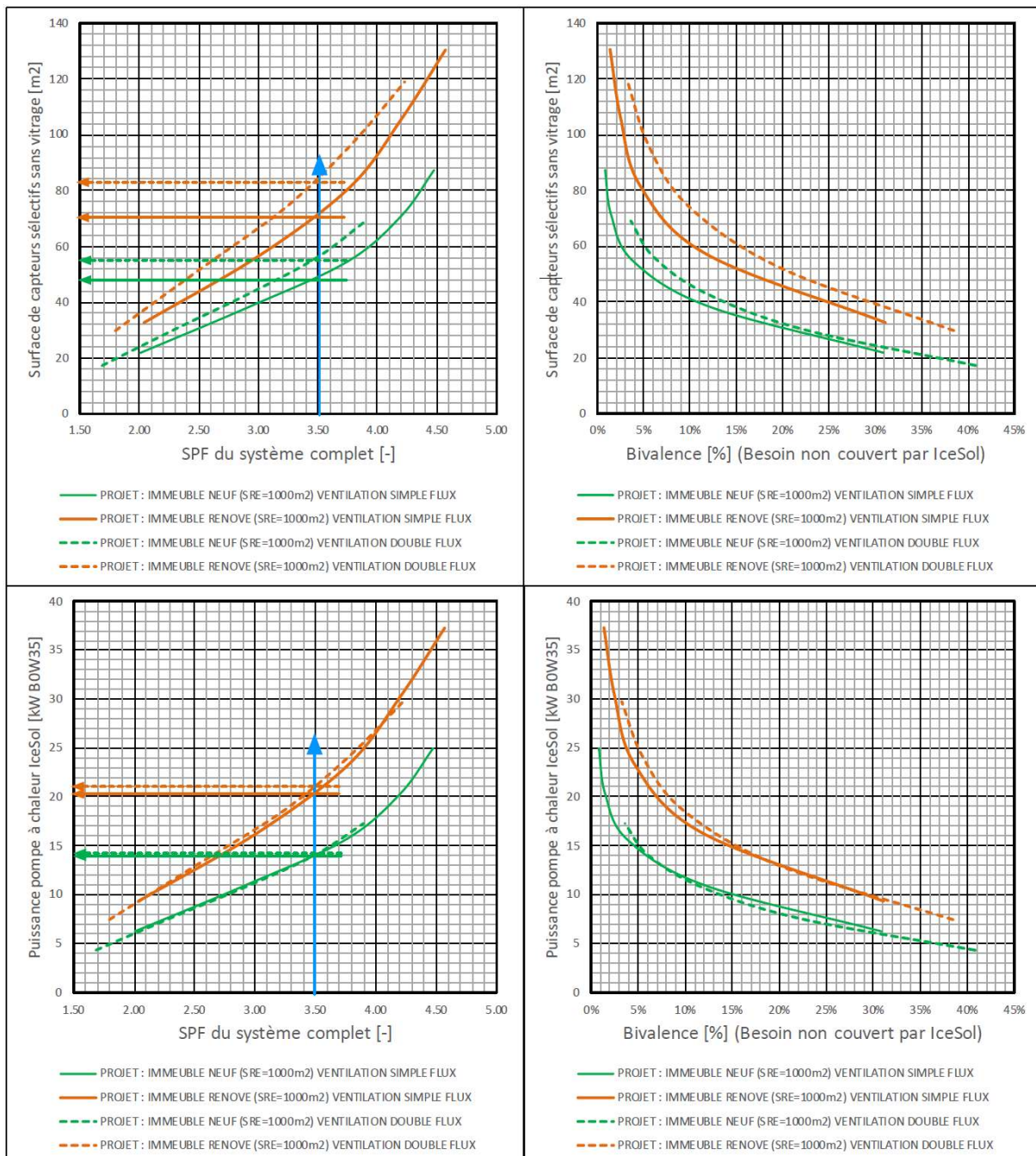
PROJET : IMMEUBLE RENOVE (SRE=1000m²) VENTILATION DOUBLE FLUX





4.6.8 Règles de dimensionnement

On constate que le besoin non couvert par le système IceSol varie très vite en fonction de la puissance de pompe à chaleur installée pour une puissance de chauffage donnée. Le graphique ci-dessous permet une interprétation plus simple des résultats (Attention toujours pour un immeuble de logement de 1000 m². Pour une première approche une « règle de 3 » peut être utilisée pour d'autre surface de référence de même affectation)





Si le but recherché est, par exemple, d'atteindre un SPF du système complet de 3.5, correspondant à un taux de bivalence de 5 à 8% on peut en conclure qu'il faudra prévoir :

Immeuble logements SRE 1000 m2 (VSF=ventil. Simple flux ; VDF=double flux)	Neuf avec VSF	Neuf avec VDF	Renové avec VSF	Renové avec VDF
Ppac Puissance PAC B0W35 [kW]	14	14	21	21
Pch Puissance chauffage [kW]	15.6	10.8	23.3	18.6
Ppac/Pch [kW/kW]	0.9	1.3	0.9	1.2
Surface capteurs sans vitrage [m2]	49	56	74	84
Stock de glace (surface d'échange 1.5 m2/kW, 60 mm glace max) [m2]	21	21	31	31
Volume min. approximatif (taux utilisation 60%) [m3]	2.1	2.1	3.1	3.1

Si on souhaite réduire encore le taux de bivalence, on voit que l'effort à consentir peut s'avérer conséquent et très théorique. Par exemple pour un immeuble neuf avec VSF si on souhaitait réduire de taux de 6% à 3% on devrait faire passer la surface des capteurs de 49 à 58 m2 (+18%) et la puissance de la PAC de 14 à 16.5 kW (+18%).

En revanche, toujours pour le même cas, si on acceptait de doubler ce taux de 6% à 12% alors on pourrait diminuer la surface des capteurs de 49 à 38 m2 (-22%) et la puissance de la PAC de 14 à 11 kW (-22%).

Cas de l'immeuble existant non rénové : Dans le cas d'un immeuble existant non rénové la problématique est différente. Lorsque la rénovation de l'enveloppe pour réduire le besoin de chauffage n'est pas possible pour différentes raisons il faut aborder le dimensionnement en fonction de la surface disponible pour placer les capteurs solaires. En effet la puissance de chauffage étant souvent le double ou le triple de celle d'un immeuble rénové la surface de capteurs à mettre en œuvre s'avèrent souvent impossible en regard de la surface disponible. La meilleure approche consiste donc à déterminer la surface « installable » de capteurs puis d'en déduire la puissance de la PAC sur la base des ratios de 3.5 à 4.0 m²/kW. Une fois la puissance de la PAC connue il sera nécessaire de déterminer par simulation le taux de bivalence et si ce dernier est acceptable.



4.7 Coûts système ICESOL avec récupération de chaleur sur l'air extrait

Le coût de l'installation de production de chaleur et de ventilation sont présentés ci-après :

Phase	Libellé	Sous-total [CHF,TTC]	Total [CHF,TTC]
Avant-projet	Honoraires ingénieurs et architectes		15'000
Projet	Honoraires ingénieurs et architectes		59'000
	Production de chaleur et installation de ventilation		
	Pompe à chaleur, stock à changement de phase, capteurs solaires	92 109	
	Tuyauterie et robinetterie	13 995	
	Accumulateur de chauffage, circulateurs, échangeurs	14 463	
	Organes de sécurité	5 411	
	Chauffe-eau, chaudière à gaz d'appoint, échangeur	16 680	
	Transport et pose de l'ensemble de l'installation. Mise en service, test de pression, équilibrage dossier de révision	45 281	
	Comptage d'énergie et régulation	36 880	
	Isolation des conduites	35 660	
	Comptage d'énergie pour suivi énergétique	12 285	
	Récupération de chaleur sur installation de ventilation à simple-flux	4 318	
	Cheminée à gaz (placo plâtre)	15 000	
	Raccordement gaz du bâtiment (yc. Taxes)	15 000	
	Raccordement électrique Chaufferie	10 000	
	Terrassement pour raccordement gaz et électrique dans le domaine public	20 000	
	Installation de ventilation, gaine, clapet-coupe-feu, monobloc	79 250	
	Raccordement électriques installation de ventilation	10 000	
	Total production de chaleur et installation de ventilation		426'332
	Total général, production de chaleur et installation de ventilation TTC		411 082



5 Conclusions et résumé

3 ans ont été nécessaires pour permettre de régler l'installation et obtenir des mesures exploitables.

Selon les résultats du suivi énergétique, le COP de la pompe à chaleur atteint 3.4 en moyenne la dernière année de mesure et la chaudière à gaz à couvert 37% des besoins totaux. Nous avons donc affaire à un système bivalent. Le SPF global annuel de la production de chaleur est d'approximativement 1.7 en considérant la consommation de gaz et des annexes (régulation, pompes de circulation, surconsommation électrique du monobloc de ventilation due à la batterie de récupération de chaleur).

Les simulations effectuées avec les paramètres de fonctionnement propres du bâtiment annonçaient un COP PAC de 4.2 et un taux de 25% d'énergie couverte par la chaudière à gaz d'appoint. Le SPF global de production de chaleur théorique prévisionnel est de 2.3.

La cause de la surconsommation de gaz peut être expliquée par le fait que la puissance de la PAC est proportionnée vis-à-vis de la demande en chauffage mais la surface de panneaux est insuffisante. Lors des périodes de grosses consommations en janvier et février par exemple, la température chute trop à l'entrée de l'évaporateur et la PAC se met en défaut basse pression. Le chauffagiste doit alors venir réarmer la PAC manuellement. Pendant ce temps, la chaudière gaz couvre l'entier des besoins de chaleur, ce qui explique le performance gap cité précédemment.

Lors de la conception d'un système ICESOL, il est donc essentiel de bien dimensionner les différents organes de la production de chaleur pour qu'ils soient équilibrés entre eux. Atteindre 100% des besoins énergétiques avec le système ICESOL est possible mais nécessite une grande surface de captage solaire qui devient disproportionnée financièrement. Le recours à un système de production de chaleur bivalent est alors rationnel.

Les deux premières années de fonctionnement, la récupération de chaleur sur l'air extrait de la ventilation à simple-flux a souffert de problème d'encrassement du filtre et de déséquilibre hydraulique. Une fois ces problèmes réglés, le système ICESOL a bien exploité l'énergie récupérée de l'air extrait et le rend concurrentiel vis-à-vis du système de ventilation à récupération double-flux. Une attention particulière doit donc être portée au système de filtration de l'air qui doit être soigneusement dimensionné de manière à éviter les encrassements prématurés et les baisses de débit d'extraction. Le raccordement hydraulique de la batterie devrait être directement branché sur le stock à changement de phase sans passer par un échangeur de chaleur, ce qui simplifie le raccordement hydraulique et évite les déséquilibres. Au niveau du matériel spécifique de la récupération de chaleur, l'économie financière qu'il est possible de faire en simplifiant le raccordement hydraulique est sans doute compensée par le surcoût occasionné par le système de filtration plus performant.

Sous réserve que l'installation de ventilation à simple-flux soient centralisée, intégrer la récupération de chaleur sur l'air extrait est une innovation qu'il est rationnel de prévoir dans les futures installations ICESOL. Le surcoût est dérisoire vis-à-vis de l'apport énergétique bienvenu qu'elle apporte au système de production de chaleur.

Le choix du système de récupération de chaleur sur l'air extrait du bâtiment dépend du contexte du projet. Si la place en toiture est limitée pour mettre en place les panneaux, ou si le but est de réduire au maximum l'énergie primaire et l'énergie d'appoint consommée par le bâtiment, le double-flux sera plus performant. En revanche, à performance environnementale globale équivalente, une installation à simple-flux sera meilleur marché que son homologue à double-flux y compris en considérant les adaptations à effectuer sur la production de chaleur ICESOL.

Si l'installation devait être conçue aujourd'hui, nous aurions probablement prévu davantage panneaux solaires, environ 165m² et une pompe à chaleur moins puissante (36kw B0W35). Ce qui implique un surcoût d'environ 20'000CHF par rapport à l'installation actuelle. Les perspectives d'économie de mise en œuvre sont faibles hormis les honoraires de développement qui devraient être plus réduits. Quelques améliorations sont présentées au § 6.2.



6 Aperçu et mise en œuvre prochaine

6.1 Mesure d'amélioration et de corrections

Le tableau ci-après résume les mesures de correction mises en œuvre durant le suivi énergétique :

N°	Problème rencontré	Amélioration proposée	Date de correction
1	Compteur de chaleur de la récupération de chaleur sur la ventilation simple-flux (C3) branché à l'envers	Inversion des sondes de température	Février 2017
2	Pompe de circulation sanitaire en débit fixe	Pilotage de la pompe de circulation avec une horloge	Novembre 2017
3	Brassage de l'accumulateur de chauffage lorsque la pompe à chaleur se met en route	Remplacement de l'accumulateur par un modèle muni d'une tôle perforée limitant le brassage	16.11.2017
4	Le chauffage reste actif peu importe la température extérieure	Couper le chauffage au sol lorsque la température extérieure dépasse 15°C	Fin janvier 2018
5	Chaudière à gaz en fonctionnement On/OFF	Pilotage de la chaudière à gaz par un raccordement 0-10V	Fin janvier 2018
6	Lecture du débit de ventilation erronée, calcul de l'équilibre énergétique à l'évaporateur compromis	Correction du principe de lecture du débit de ventilation	Fin janvier 2018
7	Lecture de la consommation électrique de la pompe à chaleur pas disponible	Raccordement du compteur électrique à la régulation	Fin janvier 2018
8	Branchement hydraulique de la batterie de récupération de chaleur sur l'air extrait pas optimum	Modification du branchement hydraulique, mise en place d'un échangeur à plaques et d'une pompe de circulation complémentaire	Fin janvier 2018
9	Thermo-siphon estival déchargeant l'accumulateur de chauffage dans les planchers chauffants	Fermeture manuelle des vannes de distribution du chauffage au sol	Mai 2018
10	Filtre de l'installation d'extraction d'air obstrué par la poussière malgré la maintenance habituelle.	Mise en place d'un système à plus grande surface de filtration et augmentation de la fréquence des remplacements	Été 2018
11	Thermomètre de mesure de la température de l'air extrait du bâtiment défectueux	Enregistrement de la température ambiante d'un appartement témoin	Hiver 2018-2019

6.2 Propositions de mesure d'amélioration

6.2.1 Protection arrière des capteurs solaires

La face arrière des capteurs solaires sont pourvus d'une plaque ondulée en matière plastique. Cette dernière a pour but de réduire les pertes thermiques durant la période estivale pendant laquelle les capteurs fonctionnent en production solaire directe. L'hiver en revanche, l'échange avec l'air extérieur est réduit et limite la production solaire indirecte. La pertinence de mettre en œuvre cette protection dépend donc des parts respectives de la production couvertes par le solaire directe et indirecte. Dans le cas de l'installation présente, enlever la couche de protection pourrait augmenter la performance hivernale de l'installation sans trop péjorer le fonctionnement estival.





6.2.2 Implantation et nombre de capteurs solaires

La surface de capteurs solaire définit la puissance que la pompe à chaleur peut produire en période froide et donc la part de couverture des besoins totaux. Le ratio surface solaire sur puissance de la PAC est habituellement de $3.5\text{m}^2/\text{kW}_{\text{pac}}$ pour une installation avec récupération de chaleur sur l'air (voir §4.6.3). Dans notre cas la surface solaire est faible en comparaison à la puissance de la pompe à chaleur ($1.2\text{m}^2/\text{kW}_{\text{pac}}$). Actuellement l'implantation des capteurs est prévue pour limiter les ombres portées :





L'espace entre les rangées limite la surface de captage totale. La surface de captage pourrait être densifiée par exemple avec le produit pliatherm proposé par ESSA :

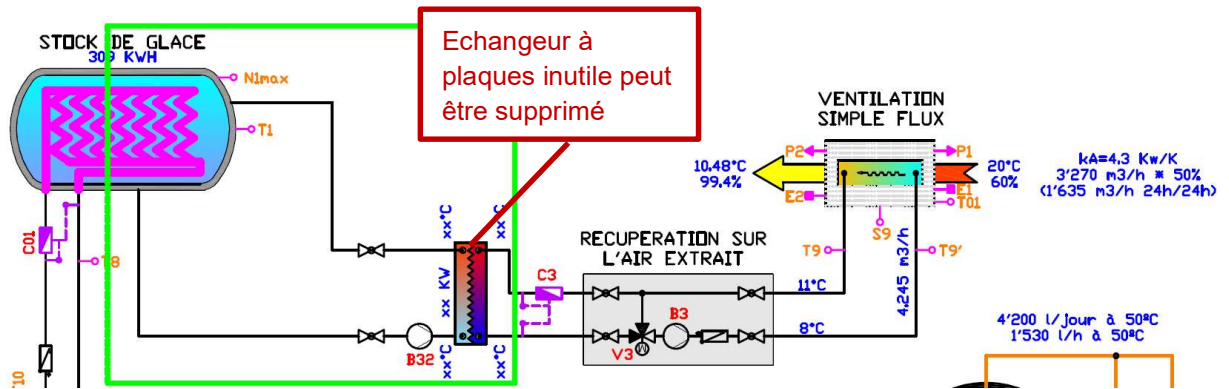


60m² de surface de captage supplémentaires pourraient être implantés sur la toiture, soit 120m² au total. Les simulations théoriques montrent que le taux de couverture et la performance globale n'évolue que peu car l'apport solaire complémentaire entre en concurrence avec la récupération de chaleur sur l'air extrait. Comme cité précédemment il faudrait plutôt 250m² de capteurs pour réduire significativement la consommation de gaz d'appoint.



6.2.3 Récupération de chaleur sur l'air extrait

La récupération de chaleur sur l'air extrait peut être faite par circulation de l'eau du stock de glace directement dans la batterie de récupération de chaleur située dans le monobloc de ventilation. Dans notre cas, l'échangeur à plaque n'est pas utile. En revanche il serait nécessaire pour séparer les circuits hydrauliques si le monobloc se trouvait en toiture et le stock à changement de phase au sous-sol.





6.2.4 Gestion de la bivalence chaudière gaz et pompe à chaleur

Le schéma hydraulique initial ainsi que la régulation prévoyaient un fonctionnement en série de la pompe à chaleur et de la chaudière à gaz. Cette configuration s'est révélée contraignante lorsque la température de la source devient basse. Dans cette situation, lorsqu'il s'agit de produire de la température élevée (ECS), la température à l'entrée condenseur est trop élevée pour permettre le fonctionnement de la PAC. Cette dernière se trouve donc à l'arrêt et la chaudière doit produire l'intégralité du besoin.

Un schéma différent est désormais utilisé dans les installations IceSol pour éviter cette limitation. La PAC peut travailler à basse ou moyenne température sur la partie inférieure de l'accumulateur tampon et la chaudière apporte uniquement le complément nécessaire en partie supérieure pour l'eau chaude sanitaire.

Schéma hydraulique actuel

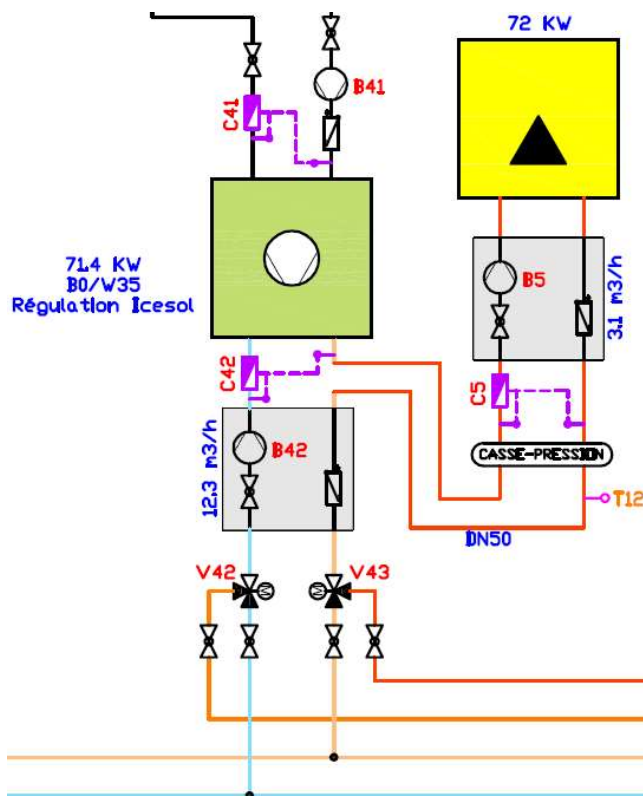
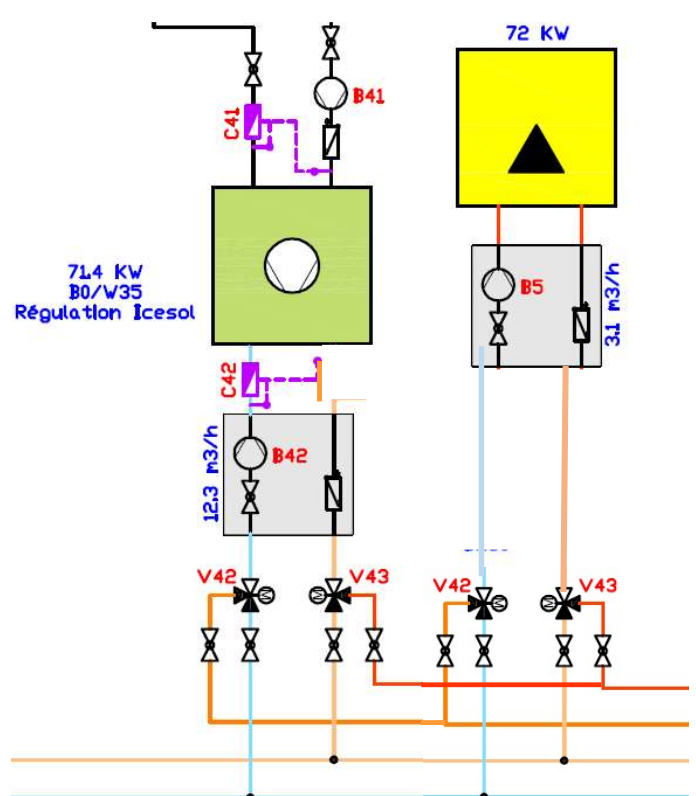


Schéma hydraulique idéal





6.3 Développement futurs possibles

La spécificité du système IceSol réside en son principe de stocker l'énergie sous forme froide et latente dans un accumulateur à changement de phase. Si plusieurs bâtiments d'un quartier devaient être bâtis sur le même principe, on pourrait imaginer mettre en commun les sources froides et les capteurs des différents bâtiments sous la forme d'un réseau et de créer un stock à changement de phase commun avec PAC centralisée à basse température (chauffage) et un système d'appoint/secours également centralisé. Dans les différents bâtiments une seconde PAC à haute température, alimentée par le réseau de chauffage, permettrait une production d'eau chaude sanitaire à température. En été la production d'eau chaude solaire conventionnelle serait réalisée de façon décentralisée directement dans les chauffe-eau des immeubles.

7 Coopération nationale et internationale

En plus de la collaboration avec l'OFEN, des étudiants de l'EPFL en cycle master de la section "Environnement" ont effectué un "design project" [3] sur cette installation en 2015. Ce travail d'étudiant avait pour but de comparer cette installation d'un point de vue écologique et économique avec une solution standard.

A moyen termes l'étude devrait fournir une aide aux autres professionnels de la construction pour identifier si la mise en application du concept ICESOL est intéressante pour un projet lambda.

Par ailleurs, comme convenu dans le contrat de subventionnement, les résultats seront mis à disposition du public.

8 Communication

Une présentation du système ICESOL et ses applications dans le bâtiment a été effectuée au 24ème symposium du programme de recherche Pompes à chaleur et froid de l'OFEN à Burgdorf le 27.06.2018 et au symposium sur l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et l'environnement dans le bâtiment ER'19 de la HES-SO à Yverdon le 18.06.2019.

9 Publications

- Site internet www.energie-solaire.com
- Site internet www.perenzia.ch



10 Bibliographie

[1] La Cigale est d'un projet de rénovation réalisé en 2014 qui comprend la rénovation énergétique au standard Minergie-P de 2 bâtiments de 273 appartements. Le système ICESOL a été mis en application et la récupération de chaleur a été mise en œuvre via un système de ventilation double-flux. Plus d'information sous: <http://renov-lacigale.ch/>

[2] Etude « *COMPARE RENOVE : du catalogue de solutions à la performance réelle des rénovations énergétiques Ecart de performance, bonnes pratiques et enseignements tirés* » réalisée par l'université de Genève en 2018, Plus d'informations sous <https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=46013&Load=true>

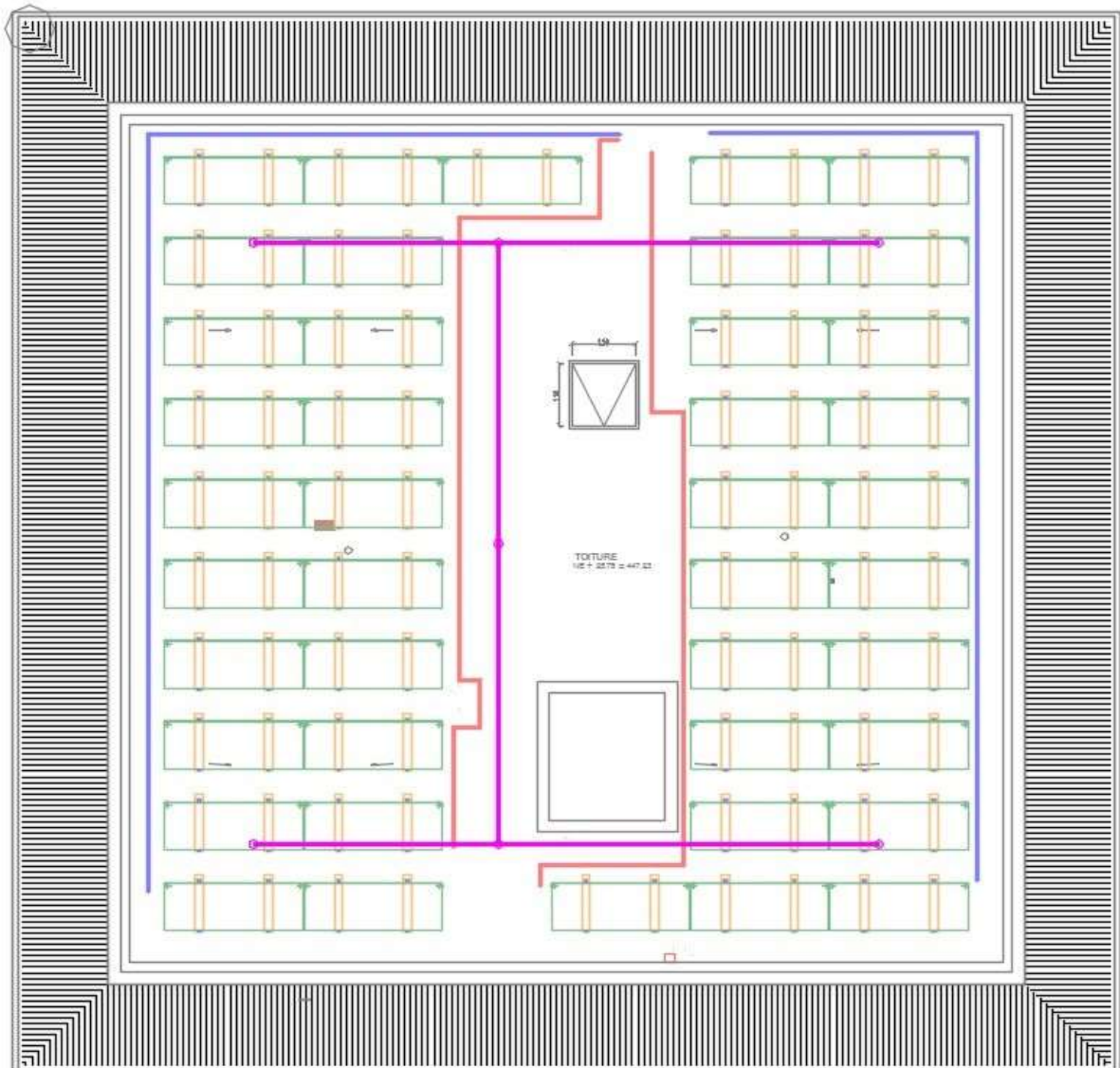
[3] Design project 2015 « Comparatif écologique et économique de 2 systèmes de pompe à chaleur » des étudiantes en environnement Bouclon et Dumas, faculté de l'environnement naturel, architectural et construit de l'école polytechnique fédérale de Lausanne.

11 Annexes

1. Plan de toiture
2. Vue 3D Google Earth
3. Tableau degrés-jours à Genève
4. Planning

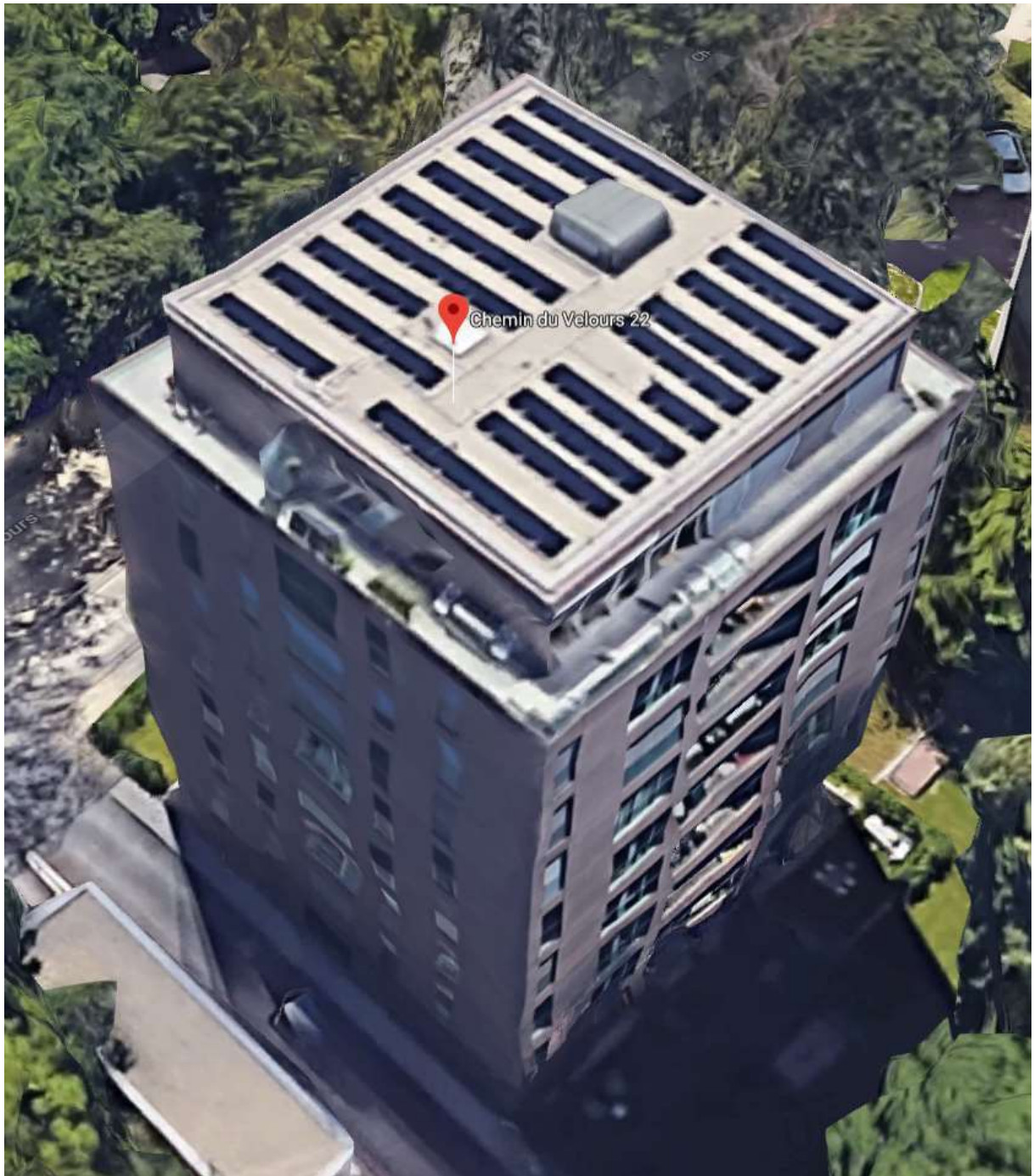


1. Plan de toiture





2. Vue 3D Google Earth





3. Tableau degrés-jours à Genève

Département du territoire (DT)

Office cantonal de l'énergie - OCEN

DEGRES-JOURS A GENEVE DEPUIS 1992 (SEUILS A 12/18°C)

MOIS / ANNEES	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Janvier	449.0	503.0	473.0	537.0	459.0	477.0	517.0	453.0	515.0	500.0	473.2	517.0	549.4	425.2	441.6	565.6	569.9	480.0	467.5	517.6	430.7	477.6	429.0	593.8	372.1	502.8
Février	394.0	337.0	478.0	359.0	392.0	455.0	379.0	368.0	327.0	494.0	422.0	489.0	464.6	347.0	408.4	454.2	448.1	417.0	582.1	493.3	370.0	457.4	377.6	369.8	469.8	395.5
Mars	226.0	399.0	405.0	308.0	324.0	337.0	337.0	271.0	303.0	273.0	376.0	320.7	391.4	350.2	371.0	362.4	369.6	333.0	281.6	428.3	295.3	325.2	370.8	266.1	392.9	297.3
Avril	279.0	204.0	183.0	219.0	222.0	215.0	190.0	257.0	195.0	151.0	174.3	197.8	191.6	67.9	236.2	88.0	165.0	83.0	219.1	206.0	115.6	128.6	215.3	176.8	89.8	206.6
Mai	19.0	63.0	86.0	43.0	13.0	6.0	0.0	12.3	76.4	21.5	62.3	59.0	50.6	56.2	6.5	7.3	119.5	33.0	44.2	156.3	63.6	24.2	97.4	88.5	41.4	118.1
Juin	20.0	19.0	0.0	8.0	7.0	0.0	0.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	6.0	7.0	0.0	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Juillet	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Août	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Septembre	48.0	34.0	69.0	0.0	36.0	0.0	0.0	58.0	65.0	0.0	15.3	26.9	0.0	37.8	79.3	0.0	42.0	7.0	20.0	6.4	0.0	21.5	0.0	51.4	0.0	0.0
Octobre	167.0	44.0	193.0	190.0	150.0	154.0	106.0	40.0	131.0	258.7	91.8	134.8	53.5	188.7	153.9	199.3	202.0	171.0	146.6	92.9	83.4	216.5	223.0	109.1	107.4	
Novembre	273.0	365.0	365.0	356.0	433.0	392.0	316.0	411.0	302.0	360.7	357.0	380.6	306.3	414.6	352.3	300.2	337.0	339.0	318.8	348.8	287.9	321.4	354.8	422.2	332.4	
Décembre	409.0	480.0	488.0	448.0	513.0	449.0	393.0	509.0	383.0	463.8	469.0	544.2	454.1	487.7	507.7	486.1	549.5	429.1	466.4	504.3	425.9	436.5	516.1	481.9	407.4	
ANNEE (sans juin à août)	2264.0	2429.0	2740.0	2460.0	2542.0	2485.0	2238.0	2379.3	2297.4	2522.7	2440.9	2670.0	2461.5	2375.3	2556.9	2463.1	2802.6	2292.1	2546.3	2753.9	2072.4	2408.9	2584.0	2559.6	2213.2	
Fact. f de corr. annuel	1.122	1.066	0.979	1.057	1.032	1.049	1.132	1.082	1.110	1.038	1.063	0.997	1.056	1.084	1.028	1.056	0.964	1.112	1.031	0.976	1.198	1.073	1.020	1.027	1.141	
SAISON (sept à mai)	2509	2403	2548	2581	2404	2622	2418	2176	2434	2321	2591	2517	2734	2060	2593	2571	2658	2477	2541	2753	2228	2210	2486	2589	2431	2368
Fact. f corr. Saison.	1.042	1.075	1.030	1.021	1.074	1.010	1.070	1.155	1.065	1.102	1.018	1.040	0.981	1.203	1.018	1.024	1.000	1.052	1.033	0.976	1.136	1.142	1.049	1.019	1.066	1.086

NOMBRES DE JOURS DE CHAUFFE A GENEVE DEPUIS 1992 (seuil à +12°C)

MOIS / ANNEES	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Janvier	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Février	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28	29	28	28	28
Mars	26	31	30	30	28	31	31	28	28	25	25	26	28	31	31	31	28	31	29	31	27	30	29	27	31	31
Avril	25	23	18	24	21	23	22	24	23	14	19	22	20	8	24	11	17	11	24	21	14	13	24	20	10	22
Mai	3	7	12	5	2	1	0	2	9	3	7	9	6	8	1	1	16	5	6	20	8	3	13	11	6	15
Juin	3	3	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
Juillet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Août	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Septembre	6	4	10	0	5	0	0	8	3	0	1	4	0	5	11	0	5	1	3	1	0	3	0	7	0	0
Octobre	20	6	24	18	19	20	15	6	16	24	12	19	8	20	16	20	20	19	14	11	10	25	25	13	12	
Novembre	29	29	30	30	29	27	29	30	29	30	29	27	29	30	30	29	27	29	28	27	29	29	30	30	30	
Décembre	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	30	31	31	31	31	31	
TOT. ANNEE (sans juin à août)	199	193	215	198	195	192	188	189	198	186	184	197	181	192	204	182	204	187	195	200	178	193	212	198	179	
TOT. SAISON (sept à mai)	208	206	190	213	189	198	191	188	194	180	196	189	194	174	202	190	200	189	199	207	177	175	214	203	187	200



4. Planning

Phase du projet	Début	Fin	Libellé	Responsable
Etude préliminaire	Août 2013	Février 2014	Etude de variantes chauffage/ventilation.	Thermex
Planification	Février 2014	Décembre 2014	Dimensionnement des différents éléments constitutifs du concept. Evaluation de la performance de l'installation.	Energie solaire
			Etablissement du justificatif MINERGIE. Calcul du bilan thermique du bâtiment	Amstein & Walthert
			Mise en soumission	Thermex + Energie Solaire
			Appel d'offre et adjudication des travaux, coordination CVSE	Construction Perret
Construction de l'installation de chauffage	Février 2015	Juin 2016	Direction des travaux	Construction Perret SA
			Installation technique	Thermex SA
Mesures / suivi	Octobre 2016	Mai 2019	Instrumentation des appareils et mesures de leur consommation	Energie Solaire & Perenzia
Transfert de technologie	Dès 2019			Energie Solaire & Perenzia
Communication	Dès 2019			Energie Solaire & Perenzia
Clôture	Novembre 2019	Novembre 2019	Rapport et décompte final	Perenzia