



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport 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

Rapport Final « La Cigale » révisé le 27.2.2017



Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Mandataire:

Société coopérative d'habitation « La Cigale »
P.a Brolliet SA,
CH-1227 Carouge

Energie Solaire SA
Rue des Sablons 8
CH-3960 Sierre
www.energie-solaire.com

Brolliet SA
Avenue Cardinal-Mermillod 36
CH-1227 Carouge
<http://www.brolliet.ch/>

Auteurs du document :

Société coopérative d'habitation « La Cigale », Guy Tornare,
Brolliet SA, Gaëlle Barras, Raphaël Elio,
Atelier d'architecture François Baud & Thomas Früh, François Baud
Signa-Terre SA, Jan Scheider
Energie Solaire SA, Wolfgang Thiele, Olivier Graf
Université de Genève, Pierre Hollmuller, Fleury de Oliveira
Services Industriels de Genève, Marko Fell, Sylvain Ledon
BG Ingénieurs Conseils SA, Frank Doppenberg, Thomas Ravier

Responsable de domaine de l'OFEN: M. Jean-Christophe Hadorn
Chef du programme de l'OFEN: Mme. Yasmine Calisesi
Numéro du contrat de l'OFEN: SI/500992-01

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Table des matières

1 Abstract.....	7
2 Objectifs du projet.....	8
2.1 Motivations de la société coopérative d'habitation « La Cigale ».....	8
2.2 Concept de la rénovation et aspects énergétiques	9
2.2.1 Contexte	9
2.2.2 Etudes préliminaires	9
2.2.3 Projet	9
2.2.4 Réalisation.....	10
2.2.5 Reproductibilité.....	10
2.3 Aspect financier.....	11
3 Travaux réalisés et résultats obtenus	12
3.1 Le système Flex – IceSol	12
3.1.1 Composants principaux	12
3.1.2 Brève description du principe de fonctionnement.....	13
3.2 Equipements de mesures.....	14
3.2.1 Principe d'acquisition des données:	14
3.2.2 Traitement des mesures:.....	15
3.3 Consommation de référence	16
3.4 Résultats de la 1 ^{ère} année	17
3.4.1 Consommation d'eau chaude sanitaire	17
3.4.1.1 Energie consommée pour la production d'eau chaude sanitaire :	17
3.4.1.2 Consommation d'eau froide pour l'eau chaude sanitaire :	17
3.4.1.3 Consommations par allée	18
3.4.1.4 Impact de la surconsommation sur la production d'eau chaude	18
3.4.2 Consommation de Chauffage	20
3.4.2.1 Température ambiante des appartements trop élevée !	20
3.4.3 Production de chaleur.....	22
3.4.3.1 Stock de glace et capteurs sélectifs sans vitrage :	22
3.4.3.2 Résultat brut de la production de chaleur	23
3.5 Optimisations mises en œuvre.....	24
3.5.1 Pompes à chaleur.....	24
3.5.1.1 Modification de la consigne de température sortie condenseur.....	24
3.5.1.2 Valeurs limites de fonctionnement	24
3.5.2 Ventilation double-flux	25

3.5.3	Réglage du chauffage	25
3.5.3.1	Coupure du chauffage selon température moyenne journalière et instantanée:	25
3.5.3.2	Courbe de chauffage	26
3.5.4	Horaire de fonctionnement de la circulation d'eau chaude sanitaire	26
3.6	Résultats de la 2 ^{ème} année	27
3.6.1	Problèmes techniques rencontrés à Videllet	27
3.6.1.1	Rupture de la membrane du système d'expansion « solaire »	27
3.6.1.2	Fuite d'antigel dans le stock de glace et dans la toiture solaire	27
3.6.1.3	Blocage à répétition du compteur de chaleur d'eau chaude sanitaire à Videllet	27
3.6.2	Résultats mensuels bruts	28
3.6.3	Consommation d'eau chaude sanitaire	29
3.6.4	Consommation de Chauffage	29
3.6.5	Production de chaleur.....	30
3.7	Bilan énergétique et analyse des sous-systèmes	32
3.7.1	Objectif et méthodologie.....	32
3.7.2	Bilan énergétique.....	32
3.7.3	Dynamique de fonctionnement.....	34
3.7.4	Analyse des sous-systèmes	37
3.7.4.1	Demande ECS	37
3.7.4.2	Demande de chauffage.....	38
3.7.4.3	Ventilation, températures des logements, récupération de chaleur	39
3.7.4.4	Pompe à chaleur	41
3.7.4.5	Chaudière à gaz.....	43
3.7.4.6	Accumulateur	44
3.7.4.7	Evaporateur et stock à glace	46
3.7.5	Comparaison Vermont / Videllet	48
3.7.6	Synthèse	49
3.8	Actions mises en œuvre pour maintenir les performances du système dans le futur.....	51
3.8.1	Formation des utilisateurs.....	51
3.8.2	Plateforme de suivi de performance avec rapports automatiques	51
3.8.2.1	Alarmes techniques et de suivi de performance	51
3.8.2.2	Rapports automatiques	51
3.8.3	Informations aux utilisateurs par le biais des écran TV dans les entrées des allées	52
3.9	Simulation du système « IceSol »	53
3.9.1	Modèle Polysun	53
3.9.2	Modèle Excel	53
3.9.3	Calage selon résultats de la 2ème année	54

3.9.3.1	Consommations	55
3.9.3.2	Production.....	55
3.9.4	Réaction du système « IceSol » aux variations de consommation et de météo	58
4	Collaboration nationale, internationale et communication	61
4.1	Collaborations nationales	61
4.1.1	François Baud & Thomas Früh Atelier d'Architecture SA.....	61
4.1.2	Groupe Energie, Université de Genève.....	61
4.1.3	Services Industriels de Genève (SIG)	62
4.1.4	BG Ingénieurs conseils.....	62
4.1.5	Signa Terre	62
4.1.6	A. Desplats SA et Econowatt SA.....	62
4.1.7	Thébaud + Perritaz SA	62
4.1.8	SPS Institut für Solartechnik:.....	62
4.2	Collaborations internationales	63
4.3	Communication	63
4.3.1	Les groupes cibles.....	63
4.3.2	Les moyens de communications	64
4.3.2.1	Visites guidées de La Cigale.....	64
4.3.2.2	Participation à des conférences	65
4.3.2.3	Organisation d'événements	66
4.3.2.4	Publications dans la presse écrite	66
4.3.2.5	Participation à des prix.....	68
4.3.2.6	Films.....	68
4.3.2.7	Le site internet	68
4.3.2.8	Brochures.....	68
4.3.2.9	Formations	69
5	Evaluation du système et perspectives	70
5.1	Choix et optimisation des composants du système « IceSol »	70
5.1.1	Pompes à chaleur.....	70
5.1.2	Bouteille casse-pression (circuit solaire indirect) :.....	70
5.1.3	Accumulateur à changement de phase (eau-glace).....	71
5.1.4	Vases d'expansion	72
5.1.5	Accumulateur de chaleur sensible (chauffage)	72
5.1.6	Régulation du système IceSol	72
6	Conclusions	73
6.1	Technique.....	73
6.1.1	Composants principaux	73

6.1.2	Bilan énergétique.....	74
6.2	Prix de revient comparatif de la chaleur	75
6.3	Suivi de performance après mise en service	76
6.4	Technologie IceSol - Champ d'application et contraintes	77
6.5	Communication	79
7	Remerciements.....	79
8	Références.....	80

1 Abstract

As a possible alternative to air or geothermal driven heat pumps, solar assisted heat pumps have recently gained an important interest. Up to now, such systems have mainly been implemented on single family houses. This paper concerns the evaluation of a 330 kW solar assisted heat pump system with combined ice storage that was installed on "La Cigale", a 19'000 m² retrofitted multifamily building complex situated in Geneva.

The presented results are based on a detailed monitoring campaign, covering a full year of operation, in real use condition. After presenting of the system concept, we analyze the system performance on hand of a detailed Sankey diagram (heat and electricity flows between the various production units, heat storages, and demand units).

Despite a slightly higher heat demand than expected (66.3 kWh/m²), evenly shared between DHW and SH, the system performance is close to the projected value. The heat production (67.3 kWh/m²) is covered mainly by the HP (78%), followed by direct solar heat (14%) and backup by the gas boiler (8%). Due to the important share of DHW (at 55°C), the seasonal performance factor of the HP turns out relatively low (3.0, including ancillary electricity), but the combination with direct solar heat rises this factor to 3.5.

As a complement to the monitoring results, we present a simulation tool that was specifically developed for this type of application, and its validation against monitoring data, in terms of annual values and monthly profiles of the diverse energy flows.

2 Objectifs du projet

Le but du projet est de réaliser un concept de chauffage novateur composé d'une pompe à chaleur solaire avec un accumulateur de chaleur latente (stock de glace) pour application à grande échelle. Celui-ci a été réalisé sur deux immeubles de la société coopérative d'habitation « La Cigale » à Genève. Le site, construit en 1952, avec ses 273 appartements et une surface de référence énergétique (SRE) totale d'environ 19'000 m², a été rénové selon standard Minergie-P entre 2013 et 2014 et représente maintenant la rénovation Minergie-P la plus importante en Suisse. Les objectifs du projet sont les suivants :

- Implémentation de 2 installations de chauffage de grande puissance (300 respectivement 200 kW) combinant une pompe à chaleur, une toiture solaire thermique et un stock à changement de phase (stock de glace).
- Suivi exhaustif de tous les paramètres d'apport et de consommation d'énergie thermique, ainsi que les données météorologiques.
- Comparaison des mesures sur le terrain avec les modèles de simulation.
- Analyse de performance et validation économique (coûts d'investissement respectivement d'exploitation).
- Divulgation des résultats pour engendrer une multiplication de systèmes de chauffage de ce type.
- Augmenter la communication et la visibilité du projet au-delà de la région lémanique, en particulier en Suisse alémanique.

2.1 Motivations de la société coopérative d'habitation « La Cigale »

Fondée en 1952, la Coopérative d'habitation La Cigale compte 273 appartements, soit environ 450 habitants, répartis entre deux immeubles situés à Genève, à l'angle des rues de Vermont et du Vidollet. 57 ans après sa construction, une rénovation complète des façades des deux bâtiments de la Coopérative ainsi que le remplacement de leur chaufferie est envisagée.

Fort de ce constat, le Conseil d'Administration se fixe les buts suivants :

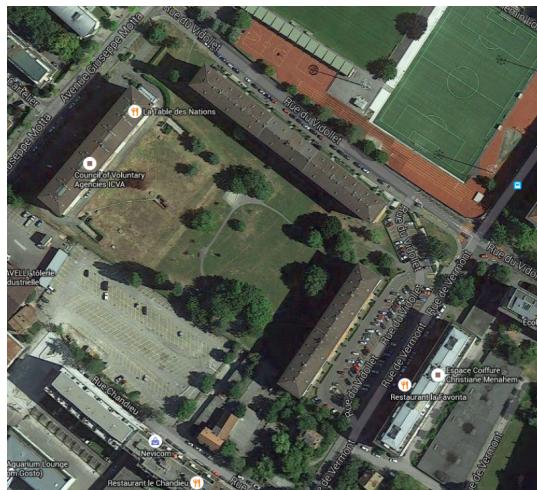
- réduire la dépendance aux énergies fossiles
- aller plus loin que les exigences minimales de la loi cantonale sur l'énergie
- améliorer le confort et la qualité de vie des sociétaires
- plan financier qui permette une augmentation raisonnable des loyers
- forte diminution des charges de chauffages
- sensibiliser de manière générale les sociétaires au développement durable

Dans ce contexte, la régie Brolliet en charge de la gestion de la Coopérative depuis sa création ainsi que ses partenaires soumettent alors une proposition de rénovation durable au Conseil d'Administration de « La Cigale ». L'objectif est clair et ambitieux : réduire de près de 70% les besoins en chaleur des bâtiments grâce à une amélioration énergétique et à la diminution de la dépendance aux énergies fossiles visant ainsi une certification Minergie-P®. Le projet est accepté à l'unanimité par les sociétaires de la Coopérative.

2.2 Concept de la rénovation et aspects énergétiques

2.2.1 Contexte

La Société Coopérative d'Habitations « La Cigale » est composée de deux groupes d'immeubles, soit 13 allées, 273 appartements, totalisant une surface de référence énergétique d'environ 19'000 m².



Fiche technique	Vermont	Vidollet	Total
Nombre d'allées	5	8	13
Nombre d'appartements	105	168	273
Nombre d'habitants	184	274	458
Surface de référence énergétique SRE [m ²]	7'343	11'656	18'999
Orientation toiture favorable pour capteurs	Sud-Est	Sud-Ouest	

La consommation énergétique du parc bâti représente plus de 50 % de l'énergie consommée en Suisse et est encore actuellement à 95 % à base d'énergie fossile, donc non renouvelable et responsable d'importantes émissions de CO₂.

Une très grande partie du parc immobilier suisse est composé d'immeubles bâties entre les années 1945 et 1975, qui sont de véritables gouffres énergétiques, comme l'étaient les immeubles de « La Cigale » avant leur rénovation.



2.2.2 Etudes préliminaires

L'étiquette SIA 2031, réalisée en 2008 par la société Signa-Terre, a mis en évidence l'importante consommation annuelle, environ 300'000 litres de mazout, pour satisfaire les besoins de chaleur, ainsi que les

importantes émissions de CO₂, plus de 1'000 tonnes par an, qui plus est en milieu urbain, représentant un impact environnemental important.

Début 2009, la Société Coopérative d'Habitations « La Cigale » confie la réalisation d'un audit approfondi à un groupe de mandataires formé de Signa-Terre, F. Baud & T. Früh atelier d'architecture et BG Ingénieurs Conseils. Cet audit présente une analyse complète de l'état des bâtiments, propose des pistes d'assainissement énergétique conséquentes, allant jusqu'à un label Minergie® rénovation, ainsi qu'une estimation du coût des travaux et du retour sur investissement, en tenant compte des aides possibles.

2.2.3 Projet

En 2010, le même groupe de mandataires se voit confier un mandat d'avant-projet visant à définir plusieurs partis (scénarios ou variantes) d'assainissement pour ces bâtiments. Débute alors une démarche pluridisciplinaire incluant la régie Brolliet, pilote de l'opération, le Comité de la Société Coopérative d'Habitations « La Cigale » et les mandataires.

Cette phase déterminante aboutit mi 2011 à la présentation de 3 variantes d'avant-projets chiffrées devant l'Assemblée Générale de la Société Coopérative d'Habitations « La Cigale », suscitant l'intérêt des coopérateurs, puis leur adhésion au projet, jusqu'à les conduire à plébisciter la proposition la plus ambitieuse, ciblant des valeurs répondant aux exigences du label Minergie-P®.

L'argument de pouvoir transformer les balcons en loggias, non chauffées mais utilisables en toute saison, ainsi que l'équilibre financier du projet, reposant sur une hausse modique des loyers compensée en grande partie par la baisse des charges, ont été décisifs.

Le groupe de travail a ensuite poursuivi un travail intensif de collaboration, avec comme point fondamental une grande écoute des souhaits de « La Cigale » de la part des spécialistes et des architectes et la bonne compréhension du mode de vie des sociétaires dans leurs appartements.

2.2.4 Réalisation

Une des contraintes importantes de ce projet a été de réaliser un chantier en site occupé, de courte durée et limitant au maximum les nuisances envers les occupants. Des choix constructifs, faisant largement appel à la préfabrication en bois des éléments de façade et de toiture, ainsi qu'une planification rigoureuse des interventions, ont permis d'atteindre ces objectifs.

La rénovation de l'enveloppe a pris le parti de l'isolation extérieure et de loggias fermées limitant les ponts thermiques, favorisant en outre les gains solaires passifs et offrant un espace tampon utilisable à différentes saisons. Cette "nouvelle peau" thermiquement très performante s'écarte de la matérialité d'origine, affirmant son caractère actuel, ardoises fibrociment et profilés aluminium pour les façades et teinte vive sur le flanc des loggias abritant de nouvelles gaines techniques.

Les pans de toiture sont soit intégralement revêtus de capteurs solaires, soit de grandes ardoises fibrociment.

La production de chaleur et d'eau chaude sanitaire est assurée principalement par les capteurs solaires non vitrés, faisant également office de couverture des pans de toiture orientées au sud-est et sud-ouest, soit par l'énergie du soleil et celle contenue dans l'air extérieur. Le système est composé de pompes à chaleur combinées avec environ 1'700 m² de capteurs solaires thermiques non vitrés et un accumulateur d'eau glacée permettant l'utilisation de la chaleur latente liée au changement de phase (eau/glace).

Une installation de ventilation double flux avec échangeur de chaleur performant a été posée dans chaque allée. La pulsion est effectuée dans les pièces de vie par un nouveau réseau de gaines intégré à l'enveloppe et les reprises d'air sont assurées par le réseau existant depuis les locaux sanitaires. La récupération de chaleur est fondamentale dans des immeubles atteignant ce niveau de performance, le renouvellement de l'air consommant la majeure partie du besoin de chauffage.

Pour assurer l'optimisation continue du système, un concept de comptage et de suivi des consommations a été mis en place avec la collaboration des SIG et d'Énergie Solaire SA. Les différents intervenants, dont les entreprises en charge de la maintenance, bénéficient d'une supervision et d'un contrôle partiel à distance.

Un processus de coordination et de communication réunissant le Maître d'ouvrage, le pilote, les architectes, les mandataires principaux et les utilisateurs a permis de prendre des décisions réfléchies et en connaissance de cause tant financières que techniques ou pratiques, à différents moments clés du projet.

Un suivi continu de la conformité des matériaux et des détails constructifs, aux intentions du projet, a permis d'assurer le respect des performances énergétiques et des qualités écologiques recherchées.

2.2.5 Reproductibilité

Les résultats concrets et mesurés obtenus par cette rénovation, montrent qu'il n'est pas utopique d'imaginer rendre une grande partie du parc bâti conforme à la voie SIA vers l'efficacité énergétique (CT 2040) et par là-même, compatible avec les objectifs 2050 de la Confédération et les préceptes de la Société à 2000 watts.

La reproductibilité concerne notamment les points suivants :

- Processus de rénovation en site occupé, indispensable à l'heure où le taux de vacance des appartements permet difficilement de vider un immeuble avant de le transformer

- Préfabrication poussée, permettant “d’externaliser“ une grande partie des nuisances des travaux et assurant une courte durée de chantier
- Façades légères et ventilées possédant leur propre structure, permettant une bonne répartition des charges sur les façades existantes et assurant un fonctionnement physique exempt de problèmes liés à la migration de la vapeur d'eau
- Système de production de chaleur utilisant les toitures solaires en directe ou comme source froide à disposition des pompes à chaleur, permettant de se passer de sondes géothermiques parfois impossibles à mettre en œuvre
- Accompagnement des utilisateurs pour favoriser l'acceptation du projet et la bonne utilisation des locaux rénovés en tenant compte de leurs nouvelles spécificités.

2.3 Aspect financier

Le coût total de la rénovation s'élève à environ 20 millions de francs pour l'intégralité des travaux réalisés.

La part consacrée à l'installation de production de chaleur « IceSol » représente environ 9% de ce montant. Le détail par poste et par chaufferie est indiqué ci-dessous :

Poste	Vermont	Vidollet	Total
Toitures Solaires	220 000	340 000	560 000
Groupes préfabriqués	98 000	123 000	221 000
Accumulateurs de chauffage	25 000	39 000	64 000
Système d'expansion chauffage	6 000	9 000	15 000
Stocks de glace	85 000	85 000	170 000
Chaudières de secours	45 000	55 000	100 000
Pompes à chaleur	65 000	85 000	150 000
Régulation et tableaux électriques	31 000	36 000	67 000
Isolation chaufferies et divers	35 000	39 000	74 000
Montage et raccordement	190 000	220 000	410 000
Totaux	800 000	1 031 000	1 831 000

3 Travaux réalisés et résultats obtenus

Ce chapitre fournit les explications sur le fonctionnement du système de chauffage utilisé dans le contexte du projet « La Cigale » et présente les résultats des mesures de la première année, décrit les mesures d'optimisation du système et présente leurs effets sur les consommations de la deuxième année de suivi.

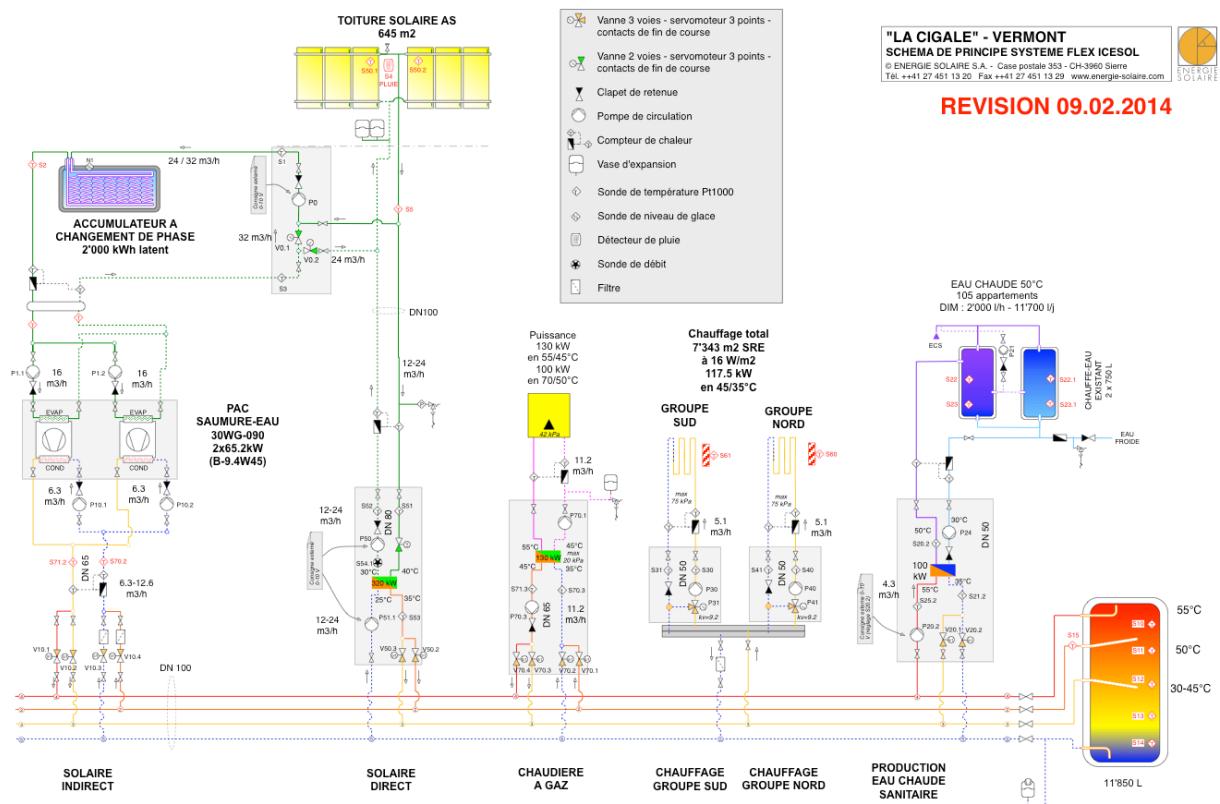
3.1 Le système Flex – IceSol

3.1.1 Composants principaux

Le site comporte deux chaufferies (Vermont 25 et Vidollet 37) dont le schéma de principe, ci-dessous, est strictement identique. Seule la taille change en fonction du nombre d'appartements raccordés qui est de 105 à Vermont et de 168 à Vidollet.

Les contraintes liées à la rénovation en site occupé étaient les suivantes :

- Conservation de la distribution complète de chaleur comprenant les conduites avec séparation entre nord et sud, les radiateurs et les vannes thermostatiques existantes.
 - Conservation des chauffe-eau en acier inoxydable existants de très faible capacité (1'500 litres à Vermont et 2'000 litres à Vidollet)



L'architecture de base du système comprend une pompe à chaleur (PAC) de type « saumure-eau », dont la source de chaleur côté évaporateur est constituée de capteurs solaires sélectifs sans vitrage (Toiture Solaire AS) et d'un stock à changement de phase (stock de glace). Un échangeur de chaleur permet également la fourniture d'énergie solaire en direct à l'installation.

Côté « chaud » (condenseur) de la pompe à chaleur, un bus hydraulique (Flex) sur lequel l'intégralité des composants est raccordée, permet les échanges de chaleur entre producteurs et consommateurs de chaleur en préservant quatre niveaux de température. Un volume d'accumulation est raccordé à l'extrémité du bus et permet le stockage d'énergie pour la production d'eau chaude semi-instantanée dans la partie supérieure alors que la partie médiane sert de réservoir tampon pour la PAC et que la partie inférieure est dédiée au stockage pour l'énergie solaire.

Pour assurer une disponibilité à 100% d'eau chaude et de chauffage, une chaudière de secours a été mise en place. Elle a d'ailleurs servi pendant la période transitoire du chantier pour la production de l'eau chaude sanitaire.

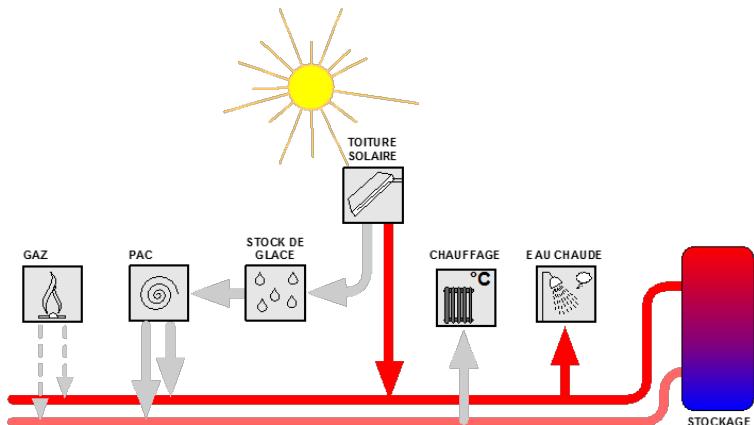
Les composants principaux des installations de production de chaleur retenus sont indiqués ci-dessous :

Composant	Unité	Vermont	Vidollet
Toiture Solaire AS	m2 bruts	649	1'091
Pompe à chaleur	kW (B-9.4W45)	2x65=130	3x65=195
Pompe à chaleur	kW (B0W35)	~200	~300
Accumulateur à changement de phase (eau-glace)	m3 / kWh latents	30 / 2'000	30 / 2'000
Accumulateur d'énergie (eau de chauffage)	litres	12'000	20'000
Volume chauffe-eau sanitaire	litres	1'500	2'000
Chaudière à gaz d'appoint / secours	kW	130	200

3.1.2 Brève description du principe de fonctionnement

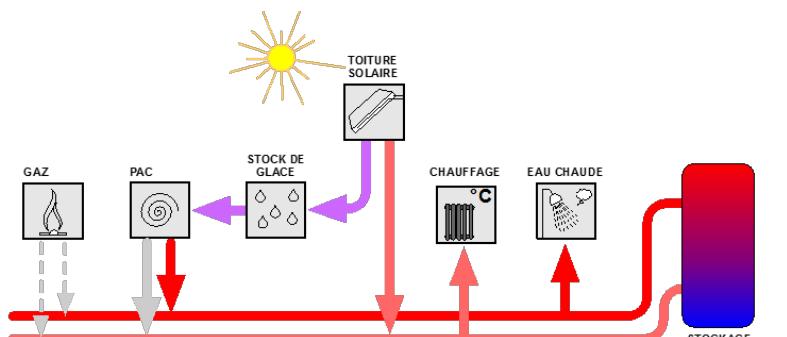
En été

Les capteurs sélectifs sans vitrage (Toiture Solaire AS) permettent de fournir « en direct », sans utilisation des pompes à chaleur, l'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire.



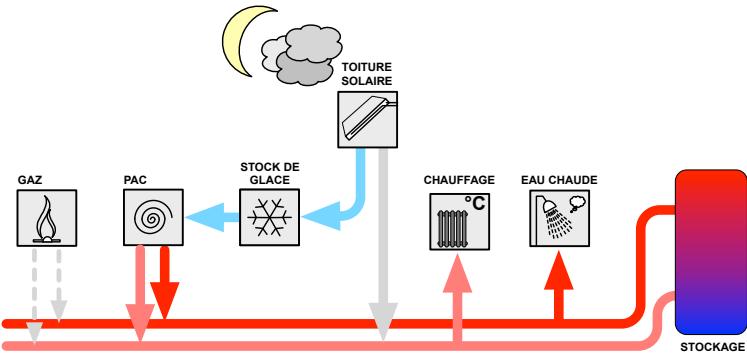
A mi-saison

La Toiture Solaire AS a pour objectif prioritaire de « régénérer » le stock de glace en faisant fondre l'éventuelle glace présente puis en réchauffant son volume à 18°C. Dès cet objectif atteint, la toiture fournit de la chaleur « en direct » pour participer au chauffage et à la production d'eau chaude du bâtiment. La pompe à chaleur assure l'appoint nécessaire en valorisant l'énergie contenue dans l'accumulateur à changement de phase entre 18°C et 0°C (chaleur sensible) puis à 0°C pendant la formation de glace (chaleur latente).



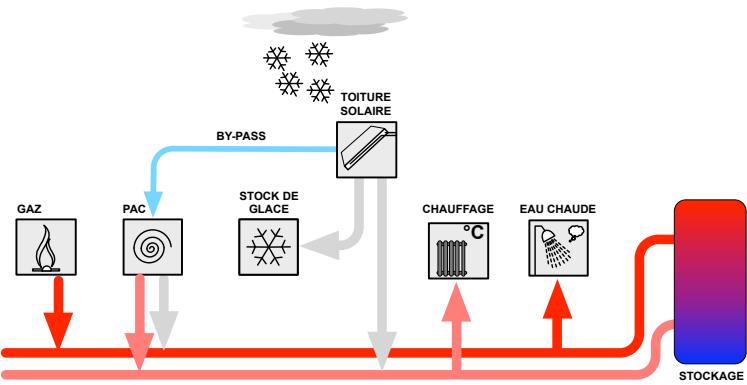
De nuit ou en absence de soleil

La pompe à chaleur assure la production de chauffage et d'eau chaude nécessaire en valorisant l'énergie contenue dans l'accumulateur à changement de phase. Si les conditions météo et les températures le permettent, la Toiture Solaire AS est utilisée comme échangeur pour prélever la chaleur ambiante et ainsi prolonger la durée d'utilisation du stock à changement de phase.



Par grand froid ou en présence de stratus sur une longue période

Lors de conditions météo extrêmes il arrive que le niveau de glace dans le stock à changement de phase atteigne le maximum admissible. Dans cette situation, il est nécessaire de le « by-passé » et de coupler directement la Toiture Solaire AS sur l'évaporateur de la pompe à chaleur. Les conditions de températures étant dégradées, la pompe à chaleur ne peut plus satisfaire intégralement la production d'eau chaude sanitaire. La chaudière d'appoint est donc mise à contribution pour les compléments nécessaires.



3.2 Equipements de mesures

3.2.1 Principe d'acquisition des données:

Le principe d'acquisition des données a consisté à étendre le système MCR mis en place dans le cadre du chantier de rénovation. Les compteurs nécessaires au suivi, la station météo ainsi que d'autres points de mesures ont été raccordé à l'automate existant ou à des modules d'extension. Les fonctions nécessaires à la collecte de l'ensemble des mesures et à leur archivage en mémoire ont été ajoutées au programme MCR de base.

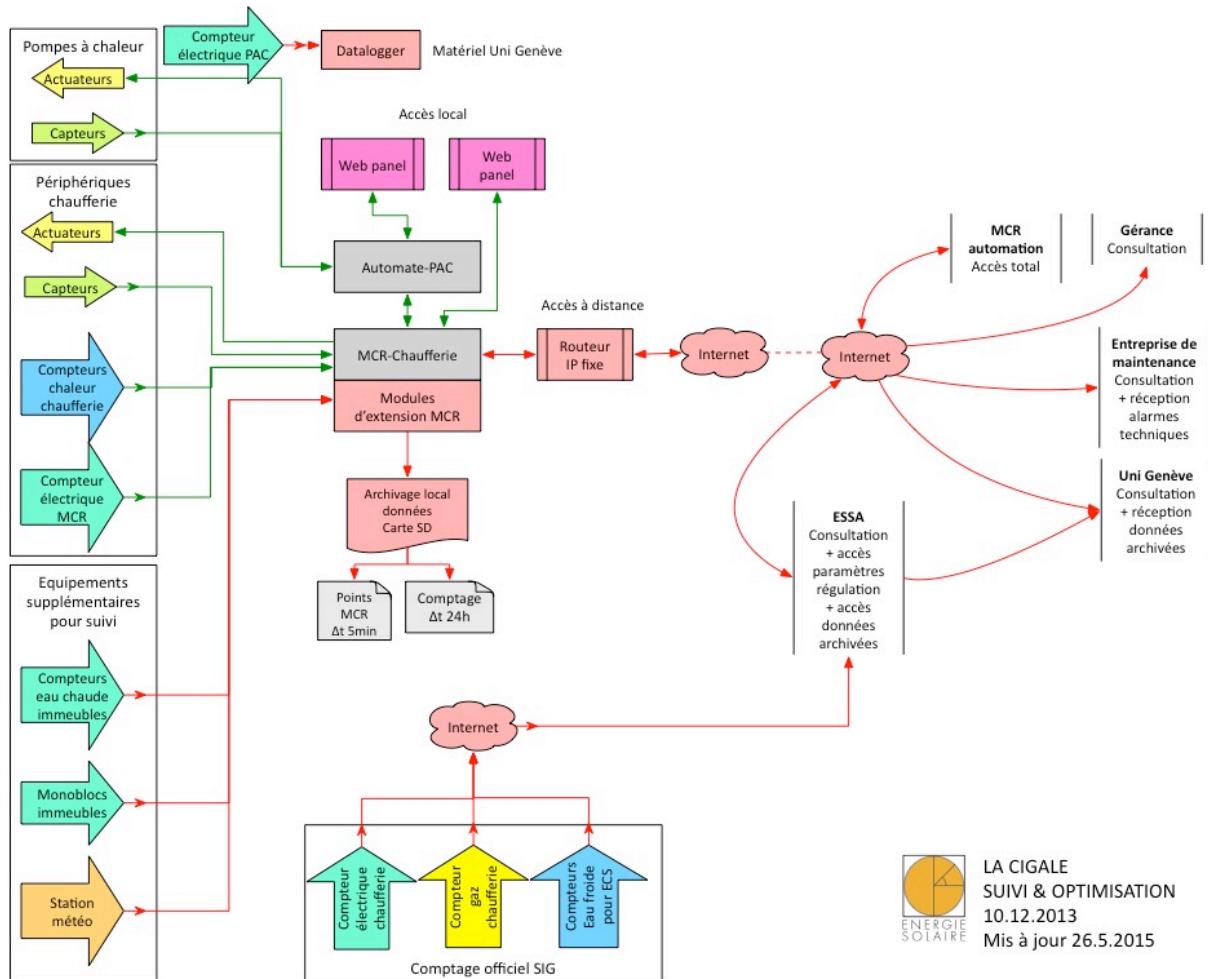
L'ensemble des index des compteurs principaux ont été relevés par le bureau d'ingénieurs BG le 24 juin 2014, le 1^{er} juillet 2014 ainsi que le 29 juillet 2014 et servent de valeurs de référence initiales au calcul des énergies produites et consommées.

L'installation d'acquisition a été mise en service pour la partie MCR production de chaleur courant septembre 2014. Le solde (sous-compteurs eau chaude sanitaire et ventilation) a été finalisé début 2015.

Cet archivage se fait avec une période de 5 minutes pour les points de suivi du fonctionnement (110 points pour Vermont et 103 pour Vidollet) ainsi que pour les monoblocs de ventilation (13 monoblocs avec 5 points mesurés soit 65 points) et de 24 heures pour les comptages d'énergie et de volume (91 compteurs en tout).

Les Services Industriels de Genève (SIG) archivent les index des compteurs officiels (eau froide pour eau chaude, électricité et gaz) de chaque chaufferie avec une période de 15 minutes.

Un raccordement au réseau Internet complète le système en offrant une consultation « publique » du fonctionnement en temps réel et un accès sécurisé pour la récupération des mesures et la maintenance du système.



L'Université de Genève a complété ce système par des compteurs électriques sur chaque pompe à chaleur du bâtiment de Vermont reliés à un « Datalogger » provisoire et quelques points de mesures supplémentaires.

3.2.2 Traitement des mesures:

Les données stockées par le système MCR sont récupérées par Energie Solaire SA entre une et deux fois par mois.

Les données, provenant des Services Industriels de Genève (SIG), parviennent automatiquement par e-mail le 10 de chaque mois.

L'ensemble des données est assemblé par une procédure automatique (script Python) sous forme de tableaux Excel puis est transmis à l'université de Genève.

Le fonctionnement est analysé en détail par Energie Solaire SA et par les SIG pour déceler le plus tôt possible des éventuelles optimisations et un bilan provisoire des énergies produites et consommées est établi mensuellement puis est comparé aux valeurs de références simulées du projet.

Depuis 2016, les données sont également envoyées automatiquement par le système MCR à la plate-forme de suivi énergétique des SIG.

L'Université de Genève se concentre sur la validation des mesures dans l'objectif de l'établissement du bilan énergétique des deux bâtiments de Vermont et Videlot. Une analyse « fine » du fonctionne-

ment des installations du bâtiment de Vermont, qui est moins favorablement exposé, est également effectuée.

3.3 Consommation de référence

Le tableau ci-dessous indique les conditions d'utilisation et les consommations spécifiques résultantes. Pour faciliter les comparaisons, les valeurs mesurées seront également rapportées à la surface de référence énergétique.

	Avant rénova-tion	Minergie P	Objectif « NOM »	Dimensionnement « DIM »
Température dans les habitations		Max. 20°C	Max. 21°C	Max. 22°C
Eau chaude sanitaire par habitant [l/j/app à 50°C]	137	86	115	126
Energie finale pour l'eau chaude sanitaire [kWh/m ²]	33.3	20.8	27.8	30.6
Energie finale pour le chauffage [kWh/m ²]	116.0	17.4	26.1	45.3
Energie primaire totale non pondérée [kWh/m ²]	180.8	-	14.7	24.5

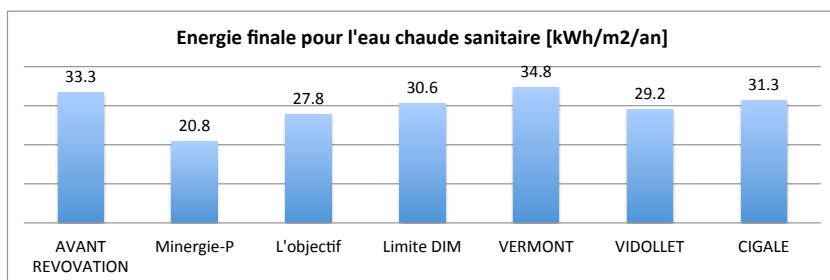
3.4 Résultats de la 1^{ère} année

Les résultats présentés ci-après correspondent à la période du 24 juin 2014 au 23 juin 2015.

Le bilan entre production de chaleur et consommation n'est pas encore équilibré à raison de 10% environ (quantité d'énergie produite supérieure à celle consommée).

3.4.1 Consommation d'eau chaude sanitaire

3.4.1.1 Energie consommée pour la production d'eau chaude sanitaire :



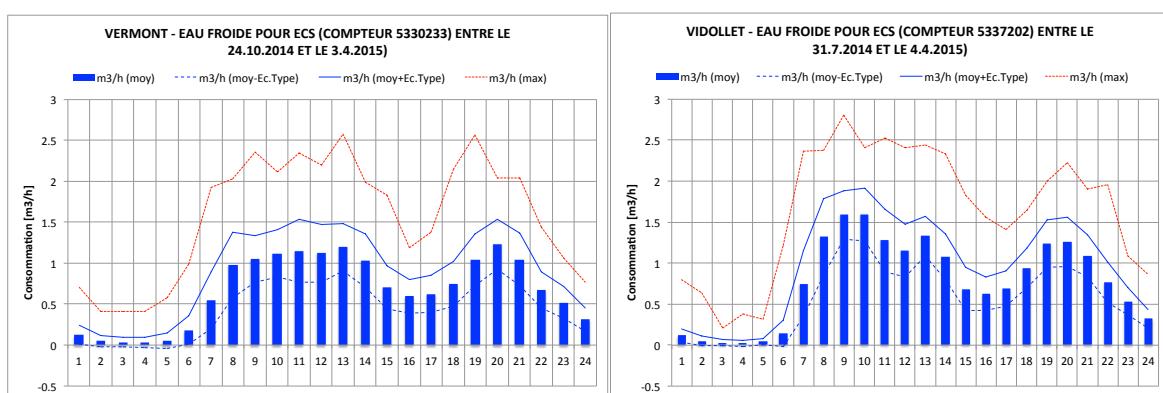
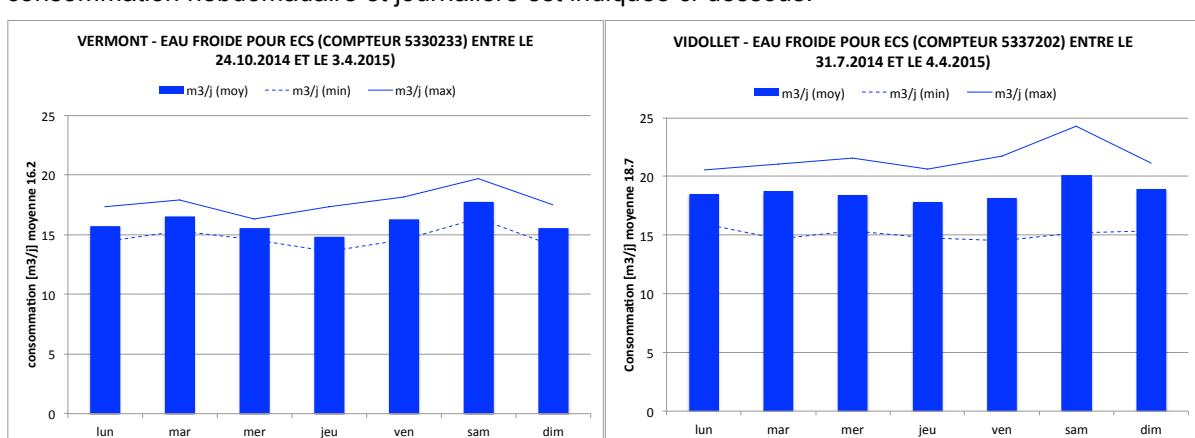
La consommation de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire de Vermont dépasse de 14% la limite fixée au projet et de 25% l'objectif. Il faut relever que cette énergie comprend le réchauffage de l'eau froide ainsi que les pertes de stockage et les pertes de circulation. La valeur indiquée avant rénovation ne comprenait pas les pertes de circulation, ce réseau ayant été créé lors des travaux de rénovation actuels.

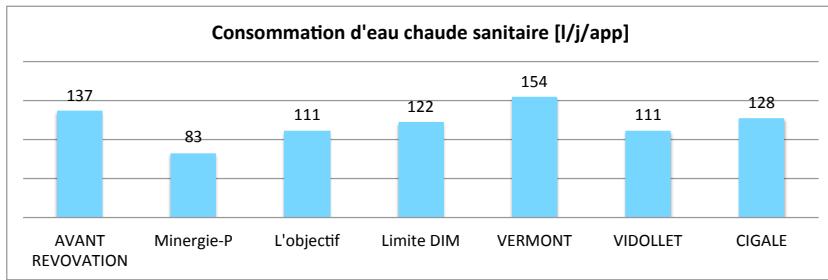
Celle de Vidollet est plus « raisonnable » et se situe pile entre l'objectif et la valeur limite.

Globalement la consommation d'eau chaude dépasse la limite fixée de 2% et l'objectif de 13%.

3.4.1.2 Consommation d'eau froide pour l'eau chaude sanitaire :

La quantité d'eau chaude consommée est mesurée par le compteur des SIG. L'analyse des profils de consommation hebdomadaire et journalière est indiquée ci-dessous.





Rapportée par appartement la consommation au cours de la première année dépasse de 26% la valeur limite à Vermont alors qu'elle est inférieure de 9% à la valeur limite et atteint presque l'objectif à Videllet.

Cette surconsommation à Vermont qui dépasse nettement la valeur limite de dimensionnement des équipements de production engendre des difficultés à faire face à la demande en plein hiver, comme développé plus loin. Une première analyse de la densité d'habitants a été faite par l'Université de Genève et indique les valeurs suivantes :

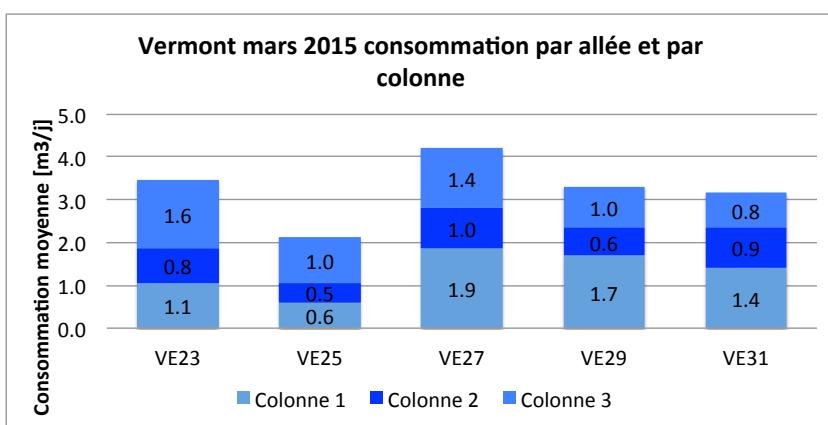
Vermont : 7343 m², 184 habitants => 39.9 m²/hab

Videllet : 11656 m², 274 habitants => 42.5 m²/hab

Videllet présente une surface par habitant très légèrement plus grande qu'à Vermont. La densité d'habitant ne peut donc pas expliquer totalement la surconsommation à Vermont.

3.4.1.3 Consommations par allée

L'analyse de la consommation par entrée d'immeuble (allée) à Vermont en mars 2015 indique une

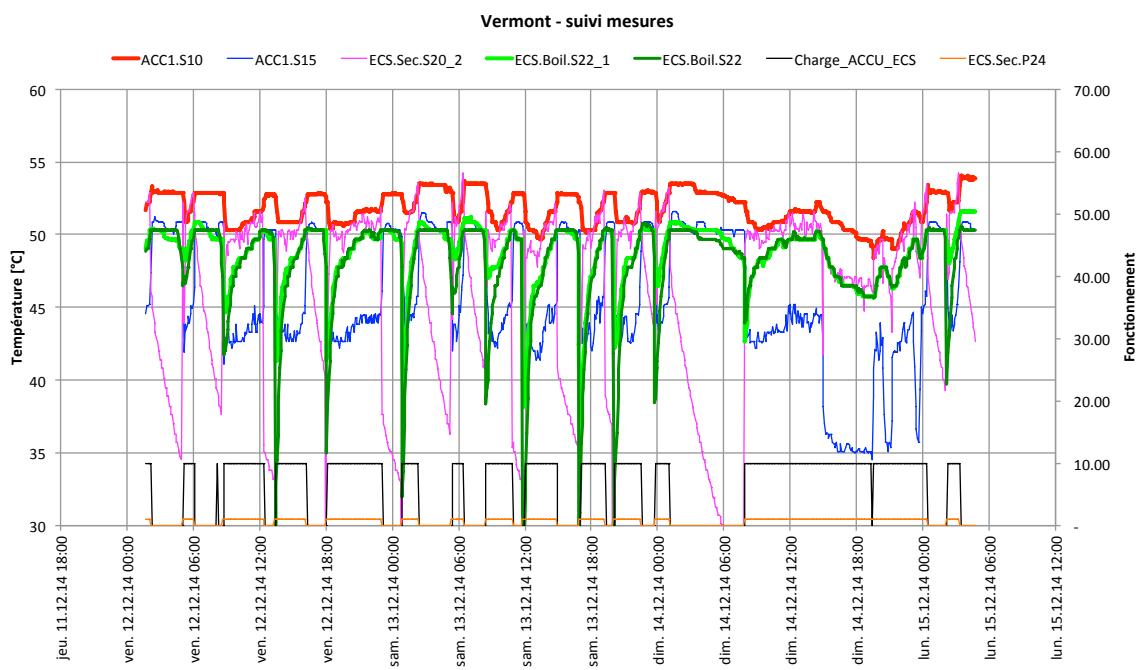


grande dispersion. La valeur de consommation limite moyenne était de 2.65 m³/j. Seul Vermont 25 présente une consommation de -20% inférieure à cette limite. Toutes les autres allées la dépassent de +20% (Vermont 31) jusqu'à +60% (Vermont 27). L'analyse des consommations par allée dépend du bon fonctionnement d'un nombre important

de compteurs d'eau chaude sanitaire (6 compteurs par allée soit 30 pour Vermont et 48 pour Videllet). Il s'avère que très souvent des compteurs sont bloqués ce qui rend cette analyse difficile !

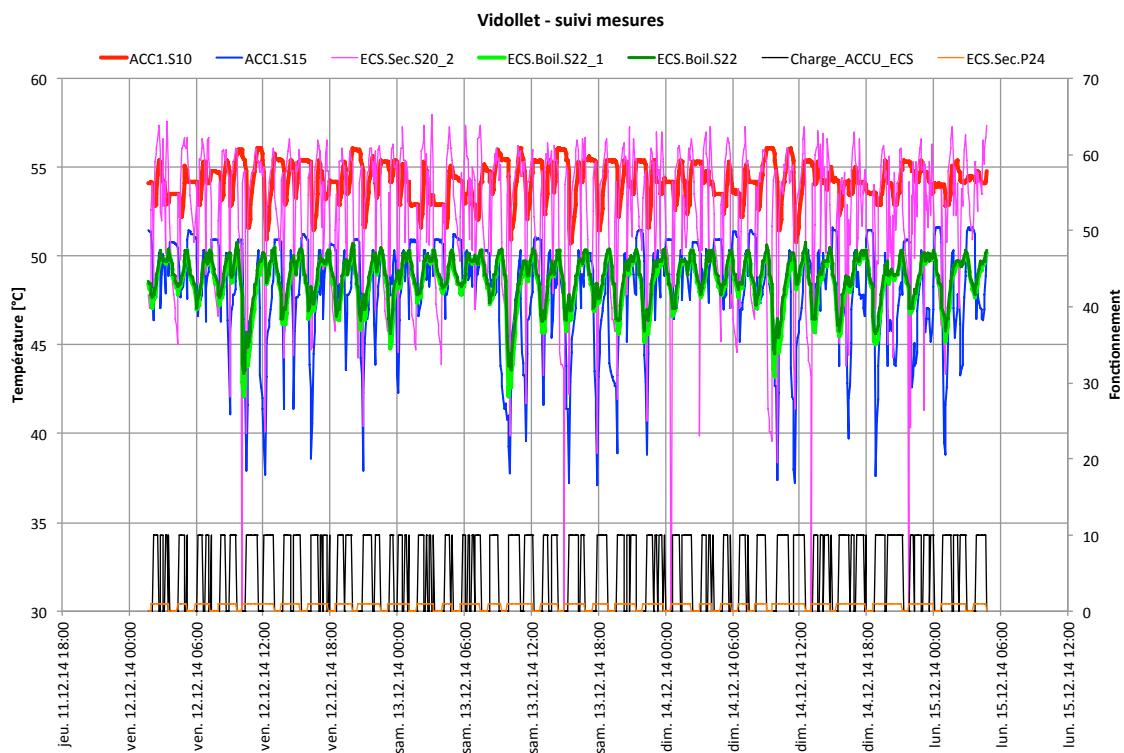
3.4.1.4 Impact de la surconsommation sur la production d'eau chaude

L'analyse des températures de la production d'eau chaude à Vermont montre que la production d'eau chaude fonctionne presque 20h/24 avec des durées de recharge des chauffe-eau de plusieurs heures pour essayer de satisfaire cette surconsommation. La capacité des chauffe-eau d'origine (2 x 750 litres) n'est pas suffisante et la puissance nécessaire dépasse celle installée et provoque une baisse de température de l'eau chaude produite par moments. (Voir graphique ci-dessous mais attention cependant que les sondes de température sont placées dans la partie inférieure des chauffe-eau. La température distribuée est plus élevée !)



ACC1.S10 = Temp. Sommet accumulateur chauffage (AC), ACC1.S15 = Temp. Sortie niveau inférieur zone ECS de l'AC, ECS.Sec_S20_2 = Temp. De charge des chauffe-eau (CE), ECS.Boil.S22 = Temp. Milieu des CE, Charge_ACCU_ECS = état de la recharge des chauffe-eau

Une analyse de la même période à Vidollet montre que la production d'eau chaude fonctionne correctement avec des durées de recharge des chauffe-eau fréquentes à cause de la capacité des chauffe-eau d'origine (2 x 1'000 litres) mais de courte durée. La puissance installée (identique à celle de Vermont) permet de faire face à la demande. Seule une baisse de température lors de l'ultra-pointe indique que la capacité des chauffe-eau est légèrement insuffisante ce qui est logique puisque la température de l'eau chaude a été abaissée de 55°C avant rénovation à 50°C ce qui augmente le volume prélevé.

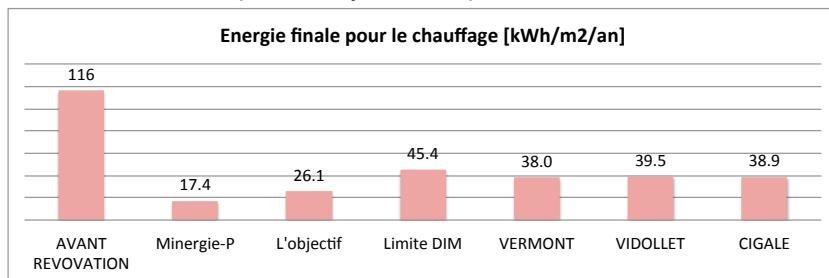


ACC1.S10 = Temp. sommet acc. chauffage (AC), ACC1.S15 = Temp. Sortie niveau inférieur zone ECS de l'AC, ECS.Sec_S20_2 = Temp. charge des chauffe-eau (CE), ECS.Boil.S22 = Temp. Milieu des CE, Charge_ACCU_ECS = état de la recharge des chauffe-eau.

3.4.2 Consommation de Chauffage

La consommation pour le chauffage des deux bâtiments se situe à +49% de l'objectif et -14% de la valeur limite. Quelques analyses complémentaires ont donc été faites pour déterminer l'origine de

cette consommation et chercher quelles mesures d'optimisation pouvaient être mises en œuvre pour réduire la consommation de chauffage.

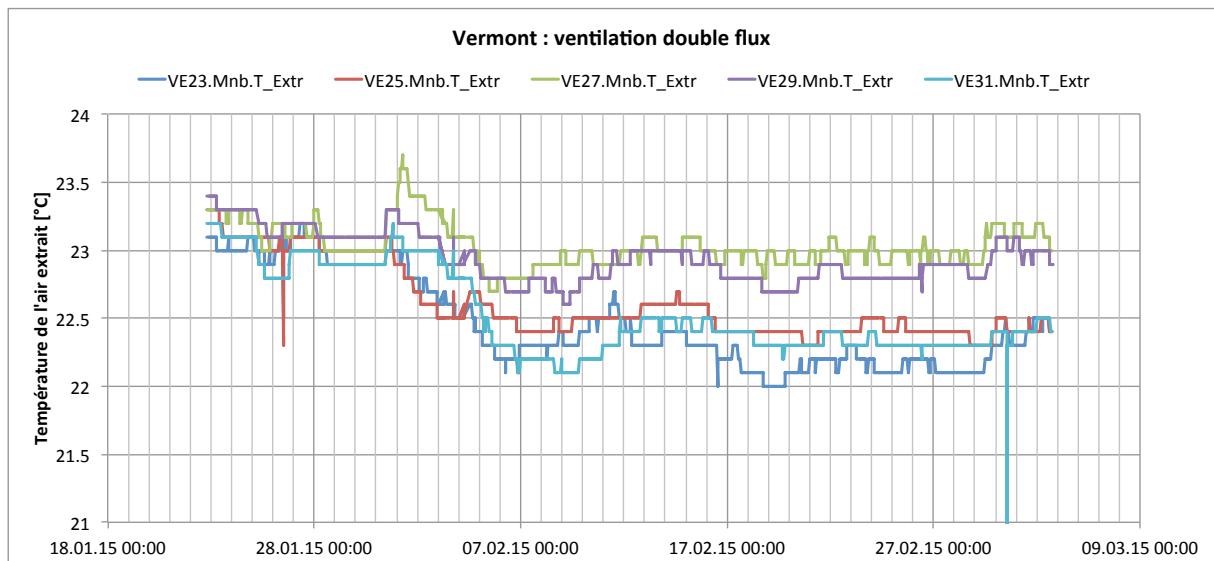


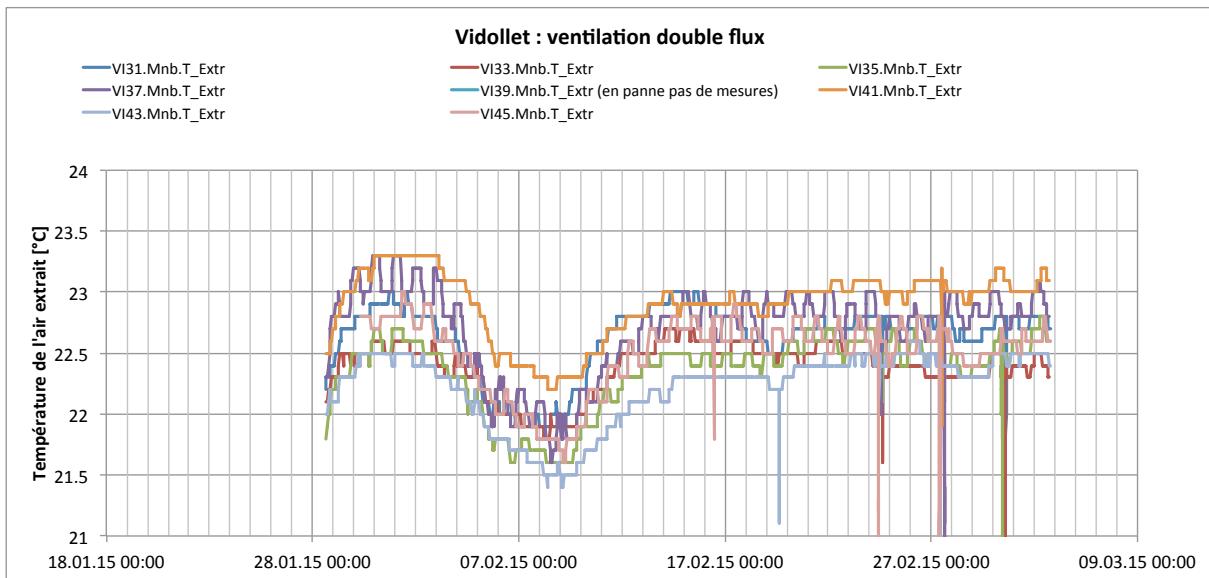
3.4.2.1 Température ambiante des appartements trop élevée !

Les premières mesures des températures de l'air extrait sur chacune des 13 entrées d'immeuble indiquent une température de reprise entre 22 et 23°C !

Si les vannes thermostatiques étaient réglées selon les recommandations, cette température devrait être plus basse. La température ambiante de dimensionnement était de 22°C au maximum et celle nominale de 21°C.

D'après les observations du concierge pendant les périodes froides, il y a une température très élevée dans les étages 4 à 7 alors qu'elle est normale voir parfois limite dans les étages inférieurs. Comme la distribution de chauffage se fait à partir des combles (en « parapluie »), si les vannes thermostatiques des étages supérieurs sont réglées à plus de 3 (20°C) ces étages seront effectivement favorisés par rapport aux étages du bas car il n'y a pas de vannes d'équilibrage par étage.





Un abaissement de la courbe de chauffage (actuellement aux valeurs de dimensionnement), qui semblait à priori une bonne idée, pourrait conduire à ne plus chauffer suffisamment les étages 1 à 3 si les vannes thermostatiques des étages supérieurs ne sont pas correctement positionnées.

Une nouvelle campagne de sensibilisation, pour une utilisation correcte des vannes thermostatiques, devra donc absolument être menée avant la prochaine saison de chauffage.

Une diminution des températures ambiantes dans les appartements de 1°C permettrait donc de s'approcher des valeurs nominales sans réduire drastiquement le confort des usagers.

Le travail d'isolation réalisé sur l'enveloppe est en tout cas excellent car malgré ces températures exagérées, la consommation est inférieure aux valeurs de dimensionnement.

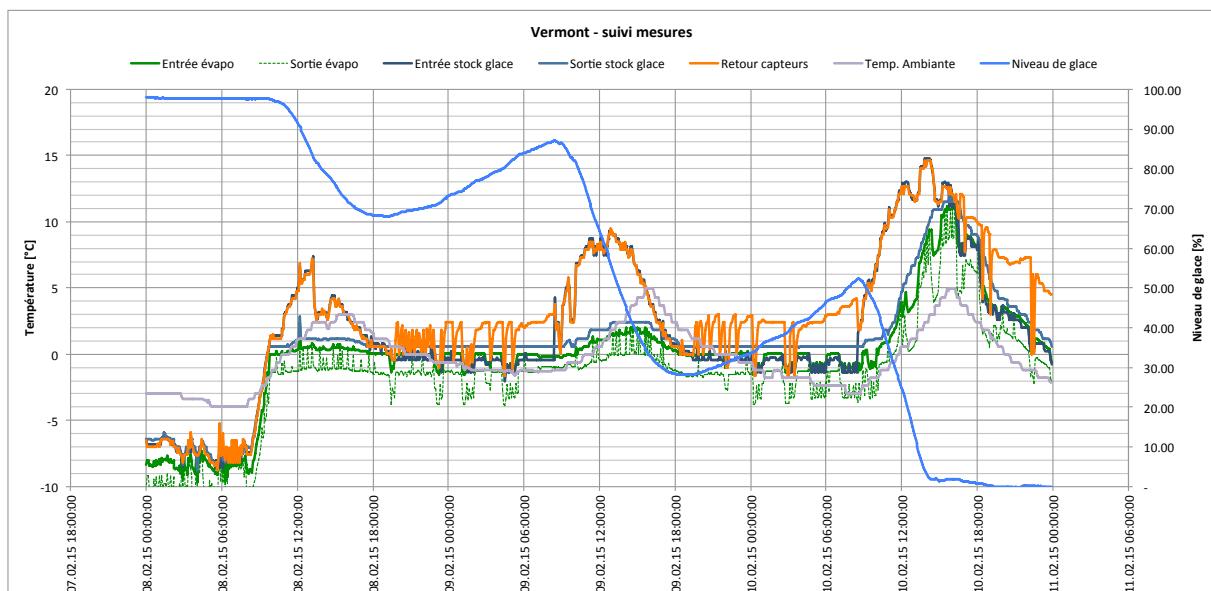
3.4.3 Production de chaleur

3.4.3.1 Stock de glace et capteurs sélectifs sans vitrage :

Après quelques gros soucis de fuites sur les raccords des échangeurs des stocks de glace après la mise en service, le fonctionnement des stocks de glace est depuis satisfaisant. Ils sont régulièrement exploités à leur capacité maximale. Les puissances échangées tant en phase de production de glace qu'en fonte correspondent aux attentes.

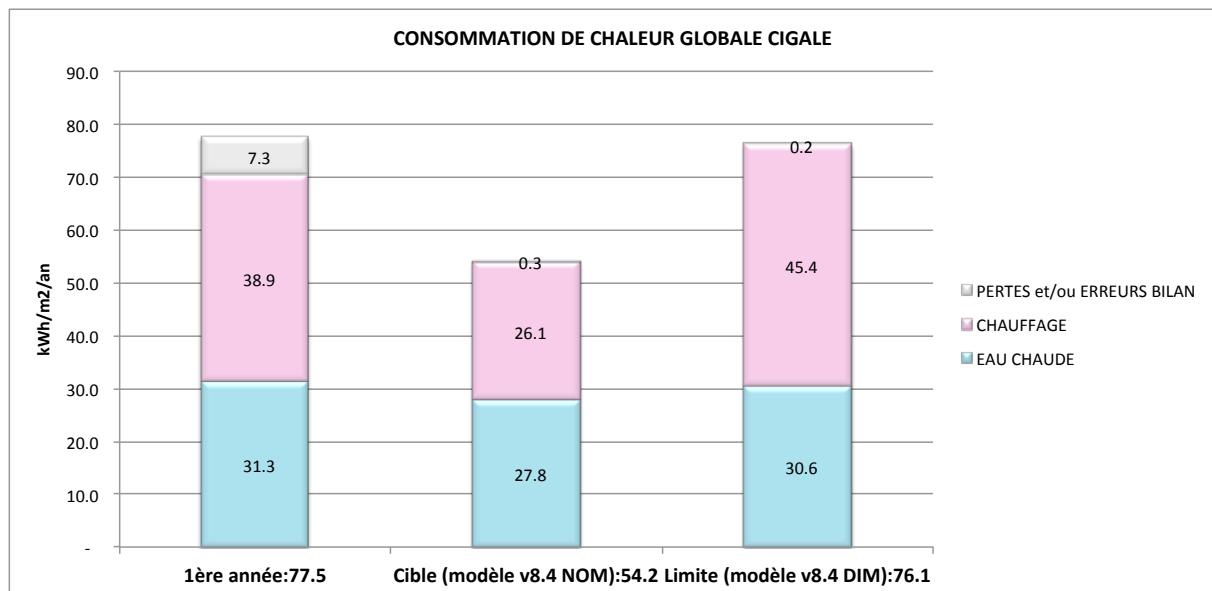
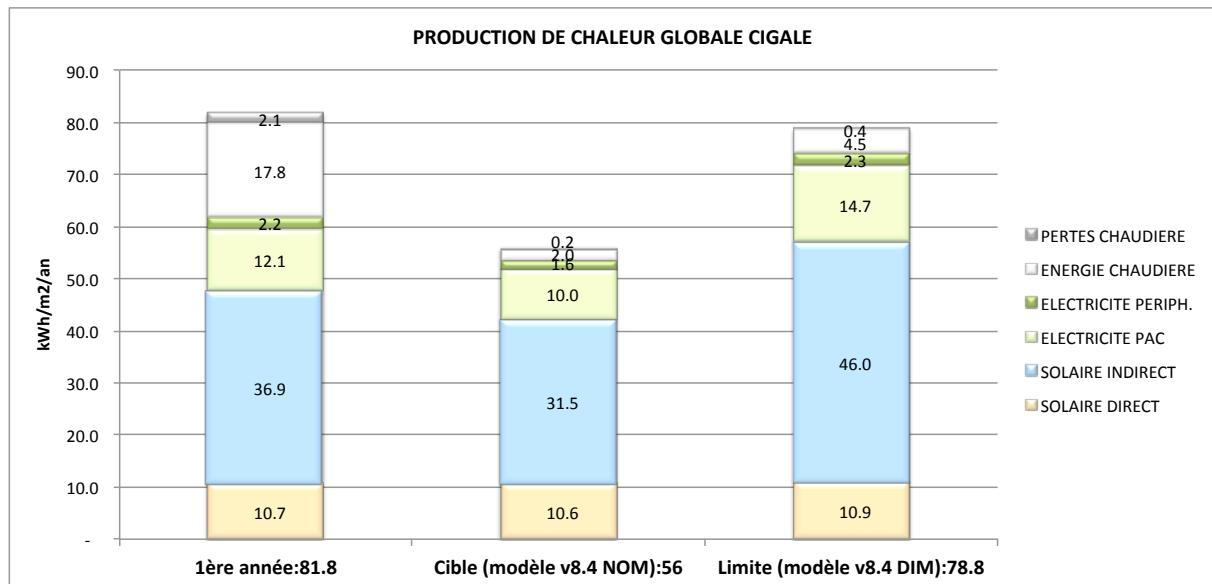
Les Toitures Solaires fonctionnent de manière stable et atteignent les performances attendues aussi bien en été qu'en hiver.

La figure ci-dessous illustre un fonctionnement typique entre le 8 et le 10 février 2015. On démarre avec un stock saturé en glace (Niveau de 100%) avec une température ambiante de -4°C. Un faible ensoleillement permet de faire fondre partiellement la glace et de faire remonter la température entrée évaporateur au-dessus de 0°C. Le lendemain un ensoleillement plus marqué permet de réduire le niveau de glace à 30%. Pendant la nuit la production de glace permet d'éviter que la température entrée évaporateur ne descende en dessous de la température ambiante. Finalement le troisième jour le stock de glace est totalement liquide. On remarque que grâce à la surface généreuse de capteurs sans vitrage et à leur performance exceptionnelle à basse température, la fonte de la glace est très rapide. Seules les situations avec un stock de glace saturé (neige sur les capteurs) conduisent à une température entrée évaporateur inférieure à la température ambiante.



3.4.3.2 Résultat brut de la production de chaleur

Le graphique ci-dessous présente le bilan de production effectif de la 1^{ère} année ainsi que ceux correspondant à la cible et aux valeurs limites simulées avec le modèle dans sa version de l'époque (v8.4).



Globalement la quantité totale d'énergie produite dépasse légèrement la valeur de dimensionnement et un problème de bilan entre production et consommation de chaleur devra être élucidé.

L'énergie solaire captée et fournie en directe est conforme aux prévisions et se situe entre la cible et la limite, malgré un mois de juillet 2014 avec un ensoleillement très en dessous (-50%) de la normale.

La quantité d'énergie fournie par les pompes à chaleur n'est en revanche pas encore suffisante ce qui implique une utilisation trop importante de la chaudière à gaz. Une analyse détaillée des raisons de cette sur-utilisation de la chaudière et aux mesures d'optimisation prises pour corriger cela est donnée plus loin.

3.5 Optimisations mises en œuvre

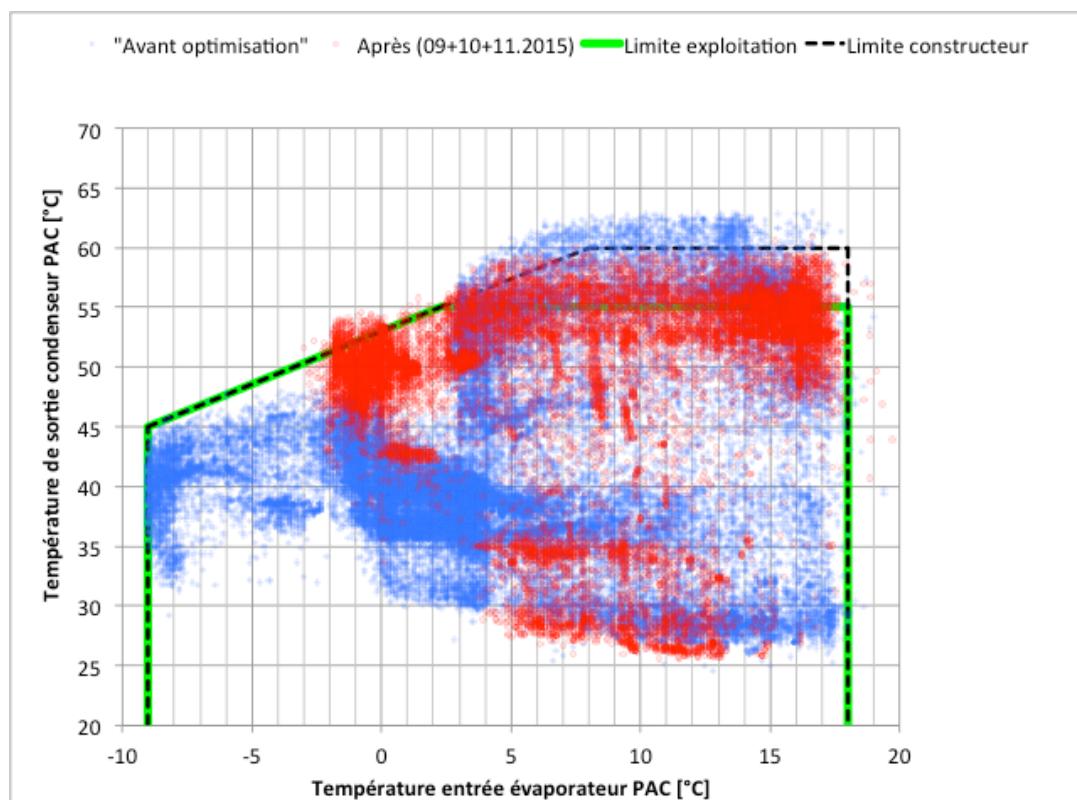
3.5.1 pompes à chaleur

3.5.1.1 Modification de la consigne de température sortie condenseur

Au cours de la première année de suivi l'utilisation des pompes à chaleur n'était pas optimale lorsque la température entrée évaporateur était inférieure à +3°C (limite pour obtenir une température de +55°C à la sortie du condenseur pour la production d'ECS), ce qui provoquait une consommation anormalement élevée de la chaudière à gaz d'appoint.

Ainsi depuis mai 2015 lorsque la température entrée évaporateur est supérieure à +3°C la consigne pour les PAC est soit +55°C pour la production d'ECS soit la température de départ chauffage.

Si la température entrée évaporateur descend en-dessous de +3°C la consigne sortie condenseur des PAC est celle maximale selon constructeur. Le but premier de cette mesure d'optimisation était de réduire au strict minimum l'utilisation de la chaudière à gaz d'appoint en demandant aux PAC de fournir la température maximale possible. Leur coefficient de performance est certes réduit mais globalement plus favorable au bilan global que de faire tourner la chaudière à gaz.



Le graphique ci-dessus illustre les points de fonctionnement « avant optimisation » en bleu et ceux « après optimisation » en rouge. La zone en-dessous de +3°C entrée évaporateur est en train de se combler et les sur-températures, au-dessus de +55°C, sont mieux maîtrisées.

3.5.1.2 Valeurs limites de fonctionnement

Lors de la pointe de demande chauffage de l'hiver 2014-2015, une différence dans le fonctionnement des pompes à chaleur de Vermont et de Vidollet avait été mise en évidence. Alors que les machines de Vermont fournissaient les puissances aux températures demandées, celles de Vidollet dans les mêmes conditions s'arrêtaient très souvent et ne fournissaient plus de puissance. La chaudière d'appoint de Vidollet avait donc été libérée pour préserver le confort des habitants.

Après analyse, une erreur dans la configuration des machines de Vidollet a été constatée et corrigée

par le fournisseur en mai 2015. Il s'agissait de la température minimale sortie évaporateur qui était fixée à -8°C au lieu de -12°C.

3.5.2 Ventilation double-flux

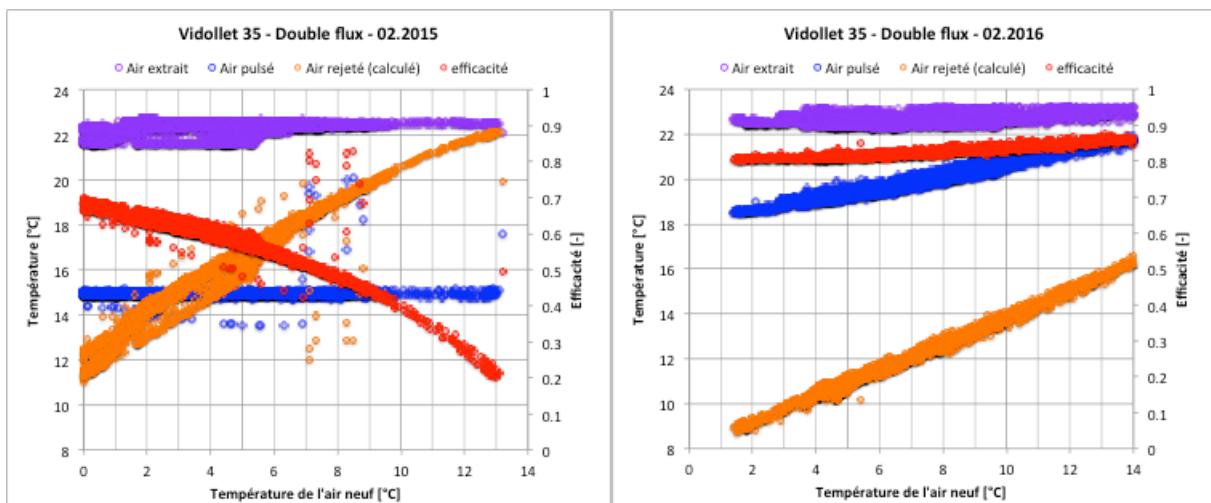
Pendant le début de la saison de chauffage 2015-2016, les S.I.G. et Thiébaud + Perritaz S.A. ont détecté un fonctionnement anormal de la ventilation double flux, en raison d'une valeur de consigne de température de reprise trop basse. Dès que la température de l'air repris atteignait 20°, la récupération de chaleur était interrompue et de l'air frais extérieur était pulsé. Ce qui provoquait une remise en chauffe des radiateurs.

Dès Novembre 2015, les consignes de reprise d'air ont été augmentées à 22° puis à 25° au début du mois de Décembre 2016 sur l'ensemble des 13 monoblocs de Vermont et de Vidollet.

Cette augmentation de la consigne permet d'éviter que la ventilation ne pulse de l'air froid dans les logements, lorsque la température de reprise d'air dans les logements est supérieure à la température de consigne.

D'autre part la consigne de température minimale de pulsion a été réglée à sa valeur maximale possible de 18°C.

Les graphiques ci-dessous illustrent l'effet de ces changements sur les températures de pulsion qui sont de 18°C minimum au lieu de 15°C et sur l'efficacité de la récupération de chaleur qui est de 80% au minimum à Vidollet 35 (état initial février 2015 et après optimisation en février 2016).



Grâce à ce travail, une économie d'énergie minimale estimée à environ 14% est attendue pour la fin de la saison de chauffage.

3.5.3 Réglage du chauffage

3.5.3.1 Coupure du chauffage selon température moyenne journalière et instantanée:

Jusqu'au mois de mai 2015, la gestion de l'enclenchement des groupes chauffage était basée uniquement sur la mesure instantanée de la température extérieure. Avec la forte inertie du bâtiment cette solution n'était pas optimale et conduisait à chauffer pendant la nuit à certaines périodes et à engendrer une surchauffe des appartements le lendemain.

Pour corriger ce problème et réduire la consommation de chauffage la gestion a été modifiée.

La température de départ chauffage est toujours calculée selon la courbe de chauffe en fonction de la température extérieure instantanée.

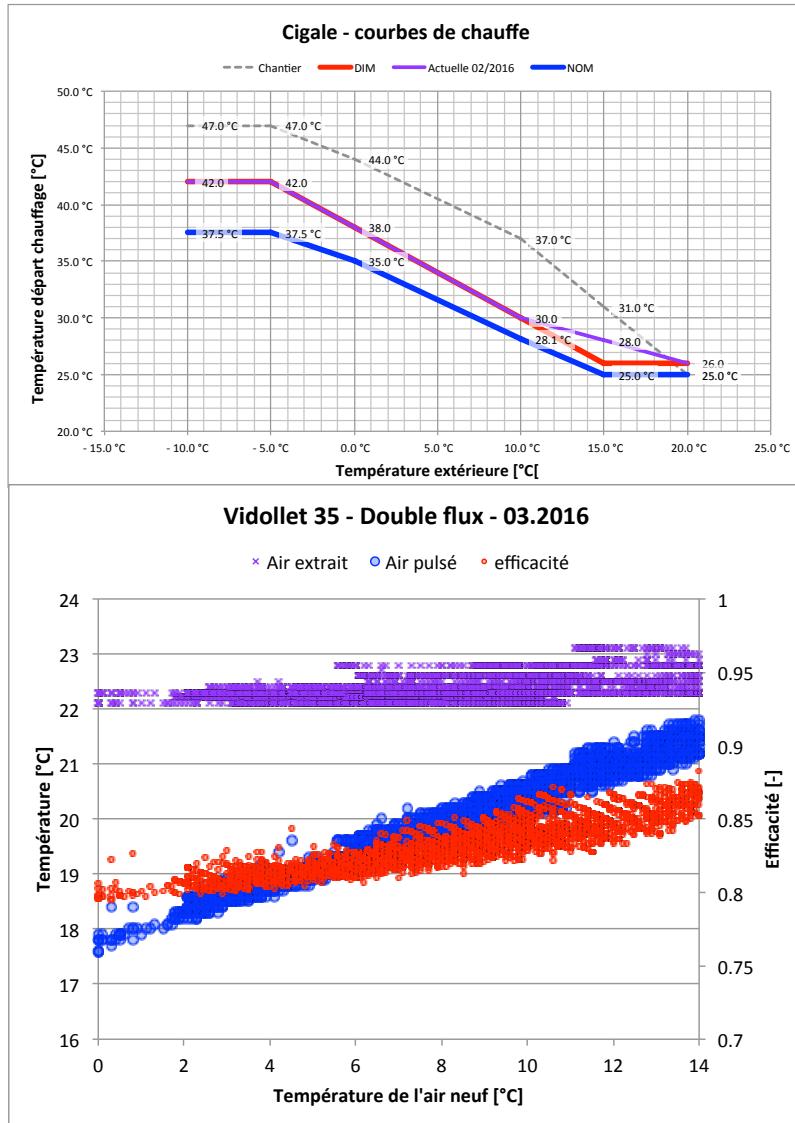
La température extérieure moyenne pondérée sur 24 heures est maintenant calculée.

Pour que la pompe du groupe chauffage soit enclenchée il faut que la température extérieure instantanée et la température pondérée soient inférieures à +15°C.

Pour que la pompe du groupe chauffage soit arrêtée il faut que la température extérieure instantanée ou la température pondérée soit supérieure à +15°C.

3.5.3.2 Courbe de chauffage

Une première correction des courbes de chauffage a consisté à les ramener en février 2015 des valeurs « chantier » aux valeurs de dimensionnement « DIM ».



un réglage de base de débit maximum.

Les SIG ont réalisé une campagne des mesures dans les appartements afin de vérifier l'équilibrage du réseau de chauffage. Des températures plus élevées dans les appartements des étages supérieurs (4 à 7) ont effectivement pu être mises en évidence, confirmant qu'un remplacement des vannes thermostatiques actuelles serait la seule solution.

3.5.4 Horaire de fonctionnement de la circulation d'eau chaude sanitaire

Initialement le fonctionnement de la circulation d'eau chaude sanitaire (bouclage) était prévu de façon permanente par le bureau d'ingénieurs. Après constat des consommations déjà très élevées d'eau chaude sanitaire, la régie a demandé que ce système puisse être arrêté selon un horaire journalier. Le système MCR des chaufferies a été adapté pour permettre de paramétrier facilement le fonctionne-

L'objectif pour le début de l'année 2016 est de profiter de l'optimisation de la ventilation double flux, démarrée conjointement par les SIG et l'entreprise en charge de l'entretien en novembre 2015, pour réduire les températures de départ.

Les courbes de chauffage ont finalement été réglées selon les valeurs nominales « NOM » (déterminées pour assurer une température ambiante de 21°C) le 24 février 2016 sans pouvoir observer de baisse significative des températures moyennes de l'air repris au niveau des monoblocs en mars 2016 qui restent supérieures à 22°C.

Pour poursuivre la réduction apparaît le problème d'équilibrage entre étages qui n'est pas possible actuellement. Les étages inférieurs risquent d'être mal desservis lorsqu'il y a forte demande des étages supérieurs. Une action est cependant possible en remplaçant les vannes thermostatiques par un modèle permettant

ment de la circulation de l'eau chaude sanitaire.

La coupure est effective de 23h00 à 4h00 tous les jours depuis le mois de mai 2015.

3.6 Résultats de la 2^{ème} année

La période prise en considération pour la deuxième année d'analyse s'étend du 1^{er} juin 2015 au 31 mai 2016.

3.6.1 Problèmes techniques rencontrés à Vidollet

La deuxième année de fonctionnement a été le théâtre de plusieurs problèmes techniques sérieux dans le bâtiment de Vidollet qui ont conduit à devoir délester les pompes à chaleur entre mi-novembre 2015 et début mars 2016 et à utiliser uniquement la chaudière à gaz de secours. Les raisons de cet arrêt sont résumées ci-après.

3.6.1.1 *Rupture de la membrane du système d'expansion « solaire »*

Fin octobre 2015, des alarmes à répétition des pompes à chaleur sont apparues à Vidollet. Les codes d'alarmes correspondaient systématiquement à un problème de débit évaporateur. Après contrôle la pression avait effectivement baissé et de l'air s'était introduit dans le circuit. Après purge et remise en pression du circuit, les alarmes sont réapparues seulement quelques jours après. Les machines, privées de source de chaleur, se retrouvaient aux températures limites de fonctionnement (-9°C entrée évaporateur), ont été délestées par sécurité le 18 novembre 2015. Après investigations il s'est avéré que la membrane d'un des deux vases d'expansion situés dans les combles était percée. L'expertise a révélé que la membrane n'avait ni supporté la température maximale de 95°C en été et pas non plus la température minimale de -10°C découlant du système IceSol. La seule solution pour protéger cette membrane est d'ajouter un vase intermédiaire permettant de refroidir ou de réchauffer le liquide avant qu'il n'arrive à la membrane. Faute de place dans les combles et par sécurité, leur remplacement par un vase d'expansion à compresseur avec vase intermédiaire a été retenu. Préventivement la même optimisation du système a été décidée pour l'installation de Vermont. Ces nouveaux équipements ont finalement pu être mis en service fin février 2016.

3.6.1.2 *Fuite d'antigel dans le stock de glace et dans la toiture solaire*

Une fuite d'antigel a été décelée dans l'accumulateur de glace au début du mois de décembre 2015. La réparation, compliquée par différents autres facteurs, n'a pu être terminée que fin janvier 2016. Parallèlement et très certainement liée à la chute brutale de pression engendrée par la rupture du système d'expansion une fuite a été également détectée, mais que tardivement lors de la remise en service de l'accumulateur de glace.

Un raccord de la distribution solaire au bas de la toiture pratiquement sans pression depuis mi-novembre 2015 est insuffisamment serré a fui pendant probablement deux mois et demi...

Le circuit antigel n'a ainsi pu être remis en service, de même que les pompes à chaleur, que le 7 mars 2016.

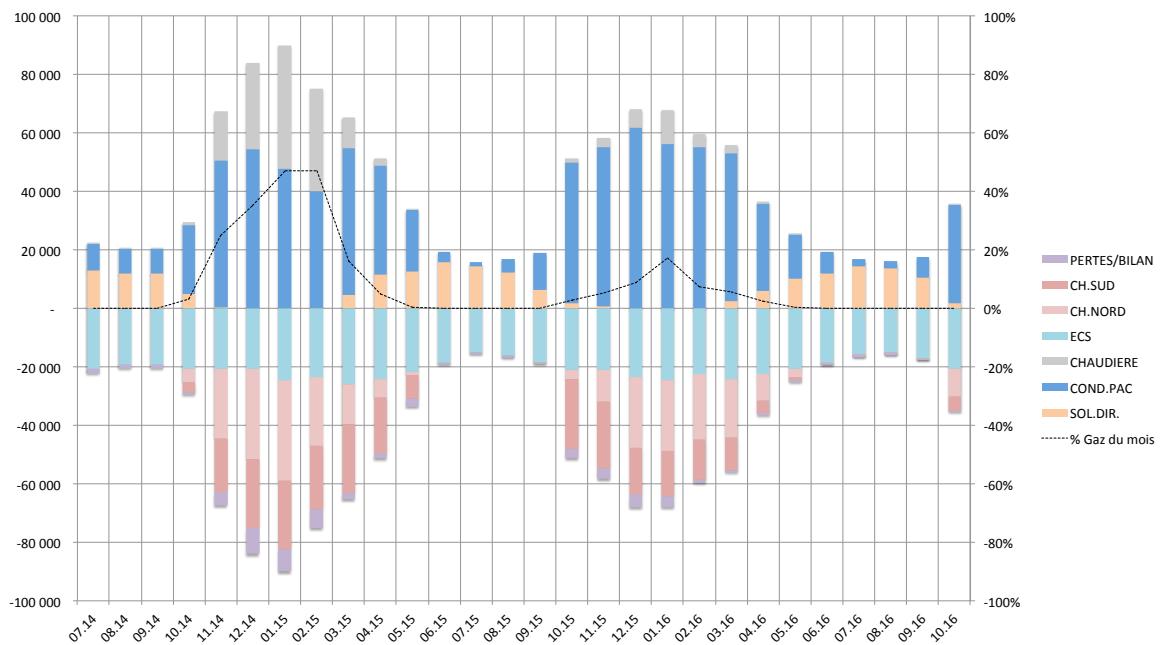
3.6.1.3 *Blocage à répétition du compteur de chaleur d'eau chaude sanitaire à Vidollet*

Le débitmètre du compteur de chaleur de production d'eau chaude de Vidollet se bloque de façon récurrente. La première année une intervention avait été nécessaire. Lors de la période estivale, ce compteur s'est à nouveau bloqué puis s'est débloqué de lui-même. Suite à ces constatations, des alarmes liées au blocage de compteurs, envoyées automatiquement, ont été définies afin d'optimiser les temps d'intervention.

3.6.2 Résultats mensuels bruts

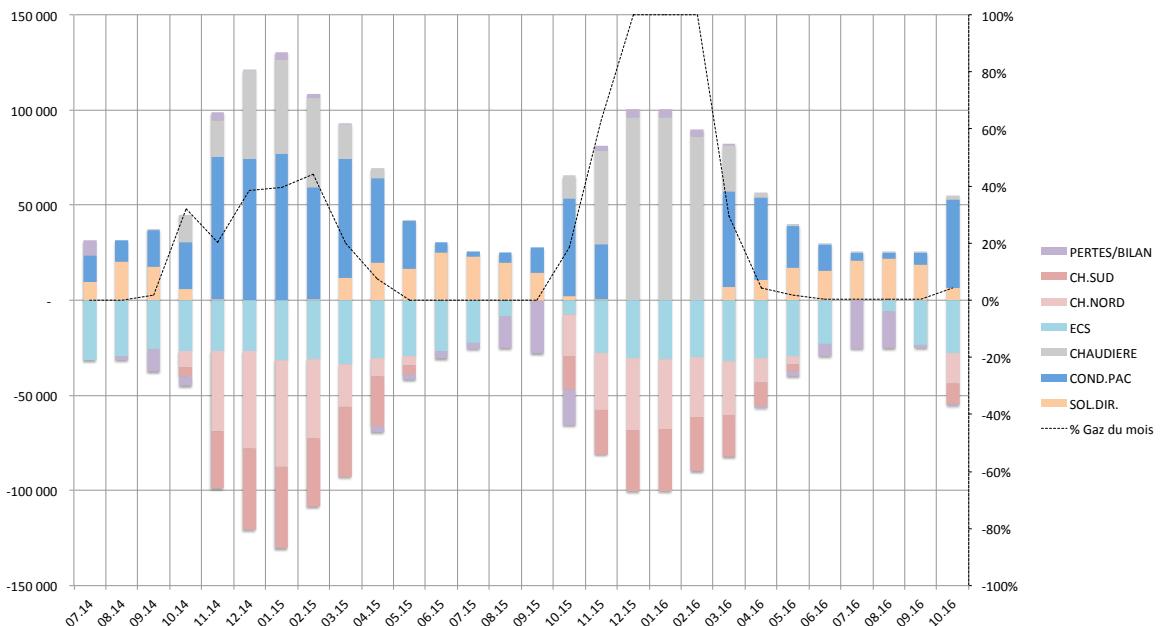
Les graphiques ci-dessous illustrent les résultats mensuels bruts depuis le début du suivi en juillet 2014 jusqu'à fin octobre 2016 des deux chaufferies. On peut immédiatement percevoir une nette réduction des consommations de chauffage durant la saison de chauffage 2015-2016 par rapport à la saison précédente.

Vermont suivi mensuel au 31.10.2016



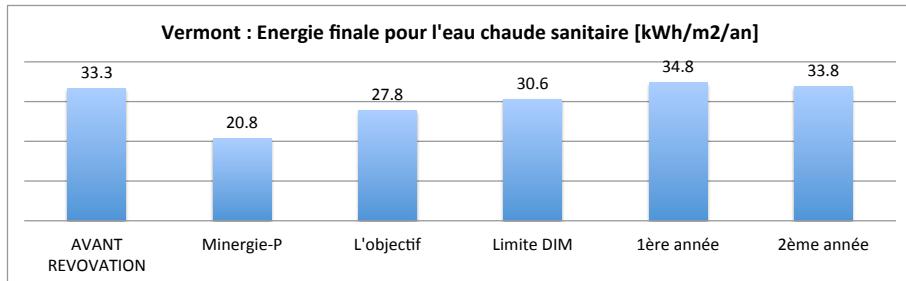
On remarque hélas également le délestage des pompes à chaleur de Vidollet entre mi-novembre et début mars 2016 à cause des différents problèmes techniques comme expliqué précédemment.

Vidollet suivi mensuel au 31.10.2016



3.6.3 Consommation d'eau chaude sanitaire

La consommation d'eau chaude sanitaire à Vermont a très légèrement baissé mais reste néanmoins très proche de la valeur avant rénovation. Elle dépasse nettement la valeur limite et est supérieure à la valeur Minergie-P de 63%, valeur qui semble d'ailleurs sous-estimer la consommation d'eau chaude dans des immeubles.

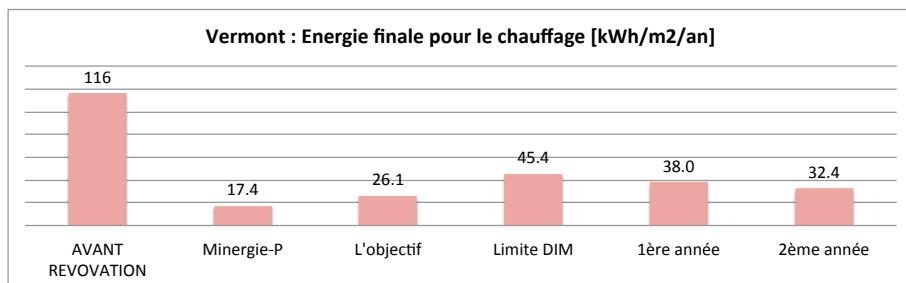


Elle est supérieure comme l'année précédente à celle de Vidollet qui est d'environ 28 kWh/m². Une multitude d'analyse ont été menées par tous sans pouvoir en expliquer la raison.

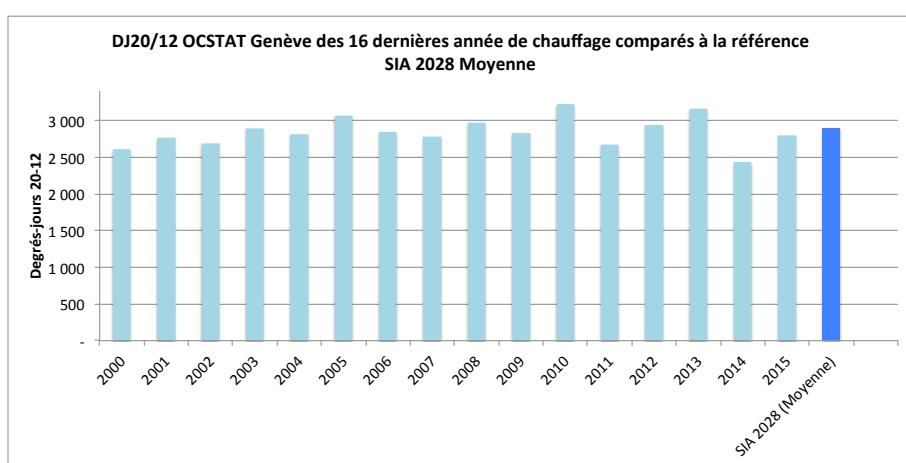
Néanmoins, comparée à d'autres immeubles du parc immobilier genevois cette valeur n'est cependant pas hors tolérances.

3.6.4 Consommation de Chauffage

La baisse de la consommation de chauffage est nettement plus marquée et atteint -15% par rapport à la première année. La consommation est pratiquement identique à celle mesurée à Vidollet qui est de 32.2 kWh/m².



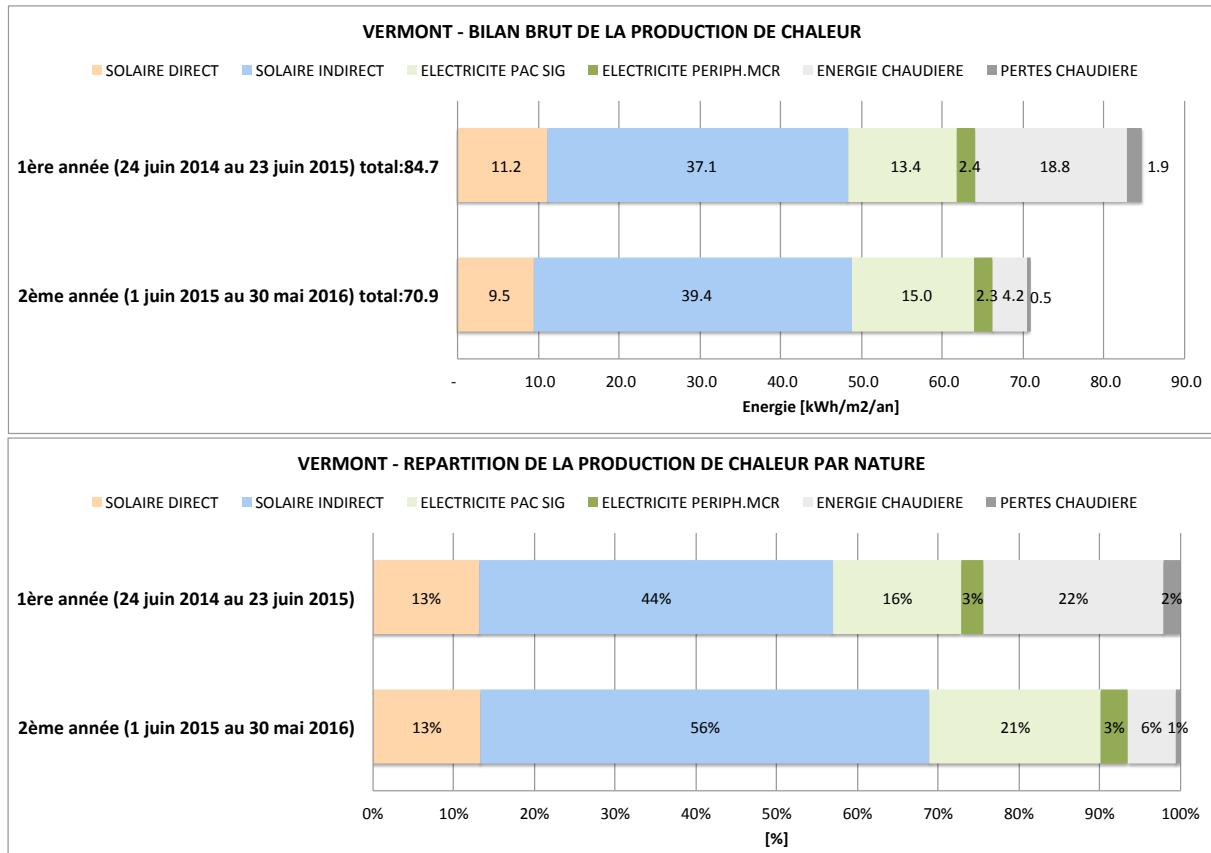
Les optimisations sur la distribution de chauffage (Courbes de chauffe et température de coupure) mais surtout de la ventilation double flux expliquent en partie ce très bon résultat.



Ce n'est dans tous les cas pas un hiver plus doux qui peut expliquer ces résultats car les degrés-jours officiels du canton (Cointrin) indiquent un besoin brut en chauffage supérieur pour la saison 2015-2016 par rapport à la saison de chauffe précédente.

3.6.5 Production de chaleur

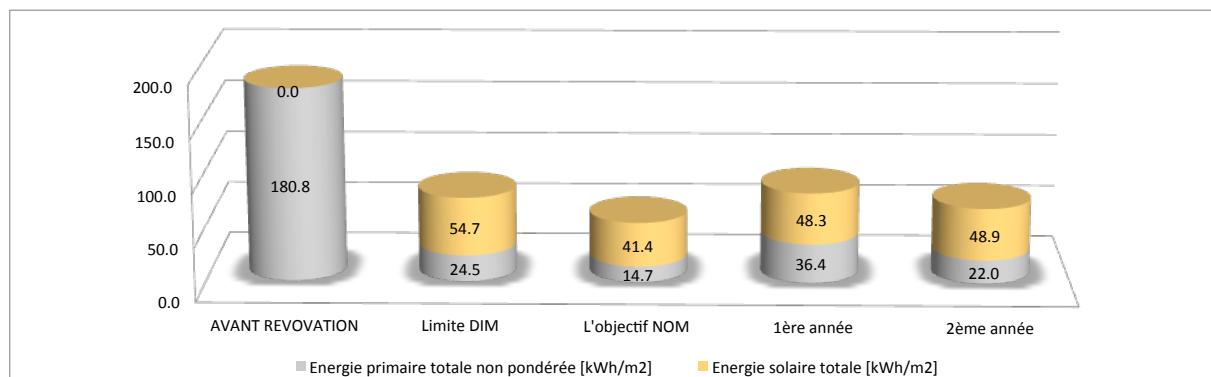
Le bilan brut des deux premières années de suivi ainsi que la répartition par nature de la production de chaleur à Vermont sont indiqués ci-dessous.



A l'image de la consommation de chauffage qui a sensiblement baissé, la production de chaleur a également baissé de manière significative la deuxième année. La production solaire conventionnelle (solaire direct) accuse un très léger recul mais sa part reste identique à 13%.

La mise à contribution plus intense des pompes à chaleur après la première année fait progresser très légèrement la part indirecte (+2.3 kWh/m²) et la consommation d'électricité des compresseurs (+1.6 kWh/m²). Par contre en pourcentage cela fait bondir la part des PAC qui atteint 77% la deuxième année contre 60% la première année.

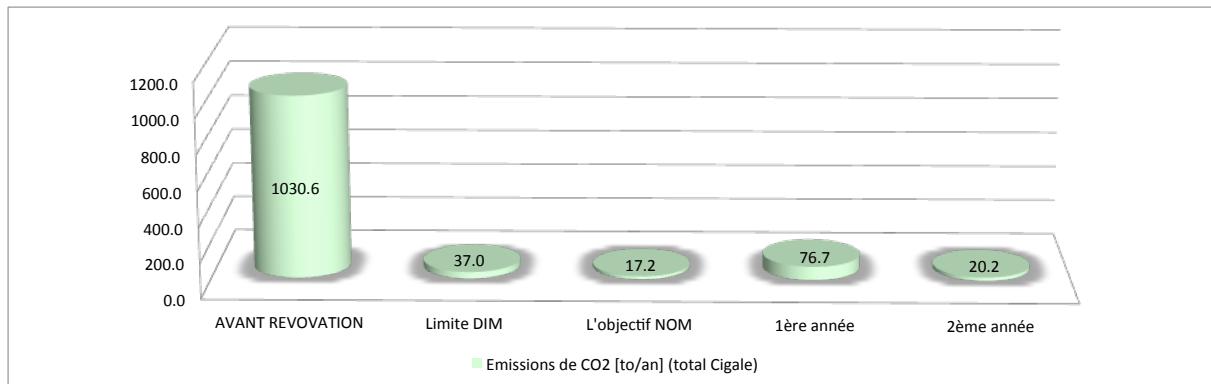
La progression la plus positive est la réduction drastique de la contribution de la chaudière à gaz qui n'est plus que de 7% contre 24% lors de la première année.



En termes d'énergie primaire « gaz » cela représente 4.7 kWh/m² en 2015-2016 contre 20.7 kWh/m² en 2014-2015 soit une baisse de 16 kWh/m². La quantité totale d'énergie primaire brute

(gaz+électricité) a ainsi baissé de 14.4 kWh/m² soit de 40% et se situe entre l'objectif et la valeur limite du projet.

Par rapport aux émissions de CO₂ les résultats de la 2^{ème} année se sont bien rapprochés de la valeur cible grâce à la réduction de consommation de gaz. La réduction par rapport à la situation avant réno-



vation est spectaculaire atteignant plus de 1'000 tonnes par année. Les émissions de la dernière année représentent moins de 2% de la situation initiale.

Les résultats obtenus en termes de production de chaleur avec le système « IceSol » au cours de la deuxième année de suivi sont plus que satisfaisants. Si on prend en compte le fait que les pompes à chaleur installées ne sont pas parfaitement adaptées à ce système (choix économique) et que leur caractéristique ne permet pas d'exploiter pleinement le stock à changement de phase lors de la production d'ECS, très supérieure à la norme, une participation limitée de 8% de la chaudière d'appoint est un très bon résultat.

3.7 Bilan énergétique et analyse des sous-systèmes

3.7.1 Objectif et méthodologie

Ce chapitre concerne le bilan énergétique annuel de l'installation de production et demande de chaleur du bâtiment Vermont, ainsi que l'analyse des sous-systèmes correspondants.

Les objectifs de ces analyses sont les suivants :

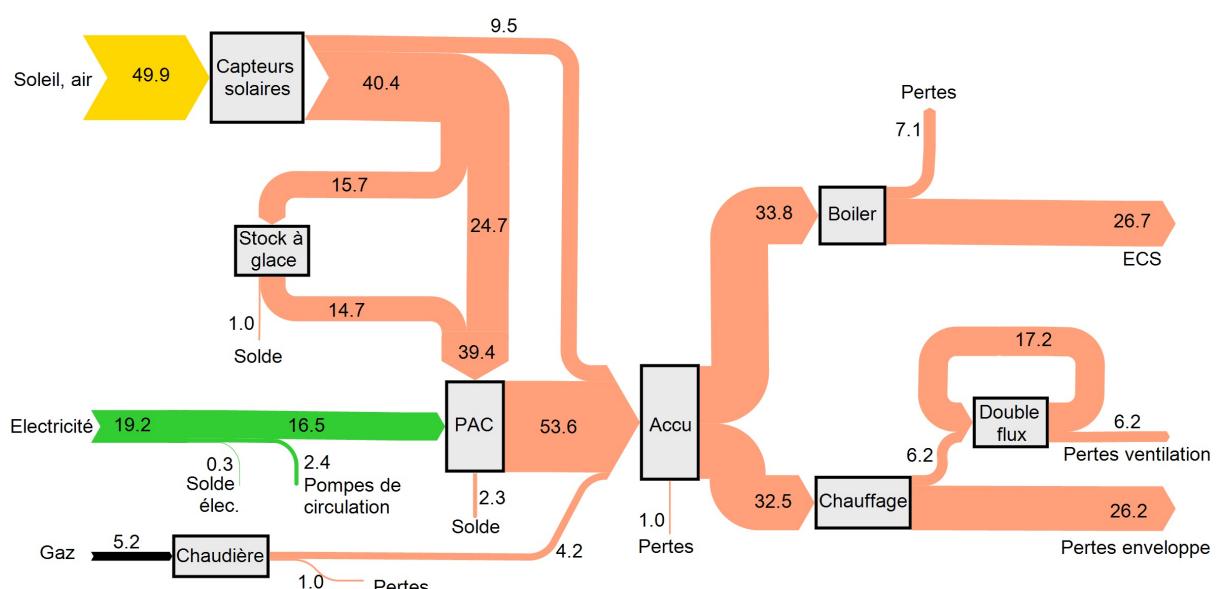
- Etablissement d'un diagramme de flux complet de la production / demande de chaleur, sur une année complète, en procédant notamment à la désagrégation des flux énergétiques principaux (mesurés directement par compteur de chaleur ou d'électricité) en flux énergétiques secondaires.
- Détermination de la robustesse des données et des défauts de bilan (imprécision des mesures).
- Caractérisation des sous-systèmes et vérification de leur conformité par rapport aux données fabriquant / projet.

Le bilan annuel et la dynamique de fonctionnement du bâtiment Vidollet (dont la PAC a subi une panne prolongée durant l'hiver 2015-2016) seront comparés de façon synthétique à ceux du bâtiment Vermont.

Ces analyses résultent d'un traitement détaillé des mesures à disposition (en provenance essentiellement de l'automate de régulation, auxquelles s'ajoutent quelques mesures complémentaires, cf. chapitre 3.2). Les mesures ont été agrégées en somme / moyenne horaires, puis journalières. Afin de pallier à deux pannes de débitmètres (Vermont : panne du compteur de chauffage secteur nord, 30/9/2015 – 11/1/2016; Vidollet : panne du compteur ECS, 14/8/2015 à 23/10/2015), un important travail de reconstitution de données a également été mené et validé (débits reconstitués à partir de données sur l'état des pompes de circulation, chaleur reconstituée à partir des débits et températures associées).

3.7.2 Bilan énergétique

Le bilan annuel de la production et demande de chaleur du bâtiment Vermont est présenté dans le diagramme de flux ci-dessous.



Production et demande de chaleur du bâtiment Vermont, juin 2015 – mai 2016 (en kWh/m²)

Ce bilan couvre la période allant du 1/6/2015 au 31/5/2016 (366 jours, étant donné que 2016 est bis-sextile). A noter que cette période fait suite à la première série de réglages post-chantier (au printemps 2015) et qu'elle se termine, au niveau du chauffage, par la deuxième série de réglages et d'optimisation (en mars 2016).

Au niveau de la météo, cette année est caractérisée par une contrainte climatique de 3054 degrés-jours en base 21/15 °C (respectivement 2474 degrés-jours en base 20/12 °C).

La demande annuelle mesurée en sortie du bus thermique / accumulateur de chaleur (66.3 kWh/m^2) provient pour 51% des besoins brut d'ECS (33.8 kWh/m^2) et pour 49% des besoins de chauffage (32.5 kWh/m^2). En ce qui concerne l'ECS, cette valeur couvre la demande nette au niveau du soutirage (26.7 kWh/m^2), ainsi que les pertes thermiques du boiler et de la circulation (7.1 kWh/m^2). Au niveau du chauffage, la plus grande part (26.2 kWh/m^2) correspond à des pertes par l'enveloppe (fraction non couverte par les gains solaires et internes). Le solde (6.2 kWh/m^2) correspond à des pertes par ventilation (fraction non couverte par la récupération de chaleurs double-flux). Par rapport à la perte de ventilation brute (23.4 kWh/m^2), la récupération de chaleur (17.2 kWh/m^2) correspond à une efficacité annuelle de 73%. (en période de chauffage).

La production de chaleur mesurée en amont du bus thermique / accumulateur de chaleur (67.3 kWh/m^2) est couverte pour la plus grande partie par la PAC (53.6 kWh/m^2 , 78%), suivie du solaire (9.5 kWh/m^2 , 14%) et de la chaudière à gaz (5.2 kWh/m^2 , 8%).

En ce qui concerne la PAC, la chaleur absorbée à l'évaporateur (39.4 kWh/m^2) provient pour un peu moins des 2/3 directement des capteurs (24.7 kWh/m^2), le complément transitant/activant le stock à glace (14.7 kWh/m^2). Au niveau de ce dernier, le différentiel input - output (1.0 kWh/m^2) comprend les pertes thermiques et le défaut de bilan (incertitude au niveau des sondes de températures). Finalement, en tenant compte de l'électricité absorbée par la PAC (16.5 kWh/m^2 , hors pompes de circulation), celle-ci fait l'objet d'un défaut de bilan de 2.3 kWh/m^2 (4% de la production de la PAC).

En ce qui concerne l'électricité auxiliaire, la consommation des diverses pompes de circulation (2.4 kWh/m^2) correspond pour 65% à la production de chaleur (stock à glace, évaporateur et condenseur : 1.4 kWh/m^2 ; solaire primaire et secondaire : 0.1 kWh/m^2 ; chaudière à gaz primaire et secondaire : inférieur à 0.1 kWh/m^2), et pour 35% à la demande de chaleur (chauffage : 0.6 kWh/m^2 ; ECS primaire, secondaire et circulation : 0.2 kWh/m^2). Le solde (0.3 kWh/m^2) correspond aux usages annexes (vannes, régulation, éclairage) ainsi qu'au défaut de bilan électrique.

En ce qui concerne la chaudière à gaz, la production de chaleur ramenée à la consommation de gaz (5.2 kWh/m^2 , sur la base d'un PCS de 11.33 kWh/m^3) correspond à une efficacité PCS de 80%.

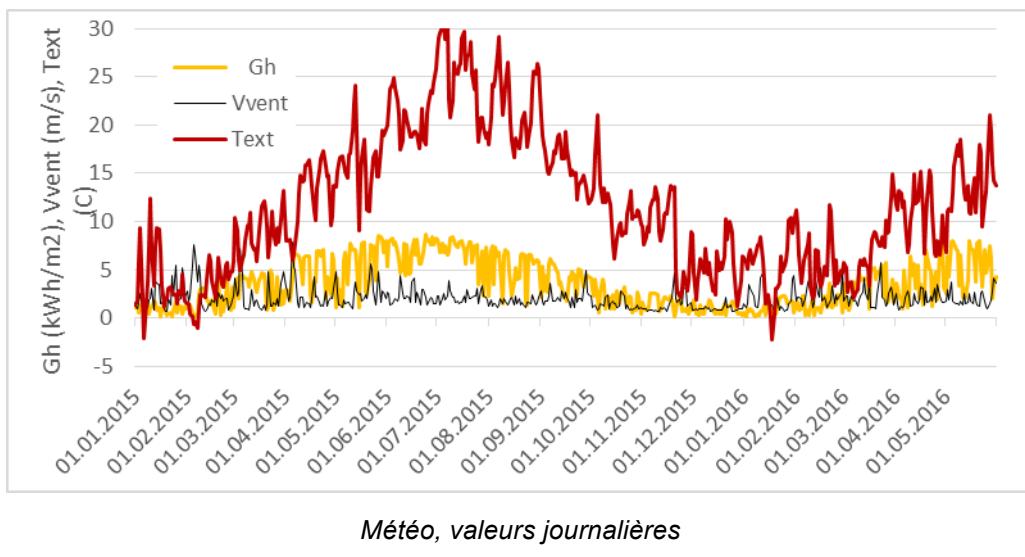
Finalement, aux niveaux des ressources mobilisées (74.4 kWh/m^2), 67% correspondent à la ressource solaire / air ambiant (49.9 kWh/m^2), 26% à de l'électricité (19.2 kWh/m^2) et 7% à du gaz (5.2 kWh/m^2).

Au niveau global, le COP de la PAC s'élève ainsi à 3.2 (hors auxiliaires), respectivement à 3.0 (y compris pompes de circulation pour stock à glace, évaporateur et condenseur). Grâce à l'apport solaire direct, le COP du système IceSol (y compris auxiliaires) s'élève quant à lui à 3.5. Dans le cas présent, étant donné que la production auxiliaire est assurée par du gaz, le calcul d'un COP système concernant la totalité de la production de chaleur ne fait pas de sens. Dans le cas hypothétique où la production auxiliaire aurait été assurée par de l'électricité directe (comme cela est observé sur d'autres systèmes, cf. Mermoud et al, 2014), le COP s'élèverait à 2.5 système (rapport entre demande brute de chaleur et consommation électrique totale).

Finalement, en tenant compte que l'électricité utilisée par le système est labélisée d'origine renouvelable, la fraction annuelle d'énergie renouvelable (rapport entre ressources renouvelables et ressources totales mobilisées) s'élève à 93%, ce qui est un excellent résultat. A noter que cette fraction s'élèverait à 79% pour une électricité comptabilisée avec le mixe fournisseur suisse (45% renouvelable, cf. Stolz & Frischknecht, 2011).

3.7.3 Dynamique de fonctionnement

La dynamique de fonctionnement du bâtiment Vermont est présentée sur les figures des deux pages suivantes, en valeurs journalières, pour la période allant du 1/1/2015 au 31/5/2016 (17 mois). La dynamique météo correspondante se trouve ci-dessous.



(*Gh : ensoleillement global horizontal, Vvent : vitesse du vent, Text : température*)

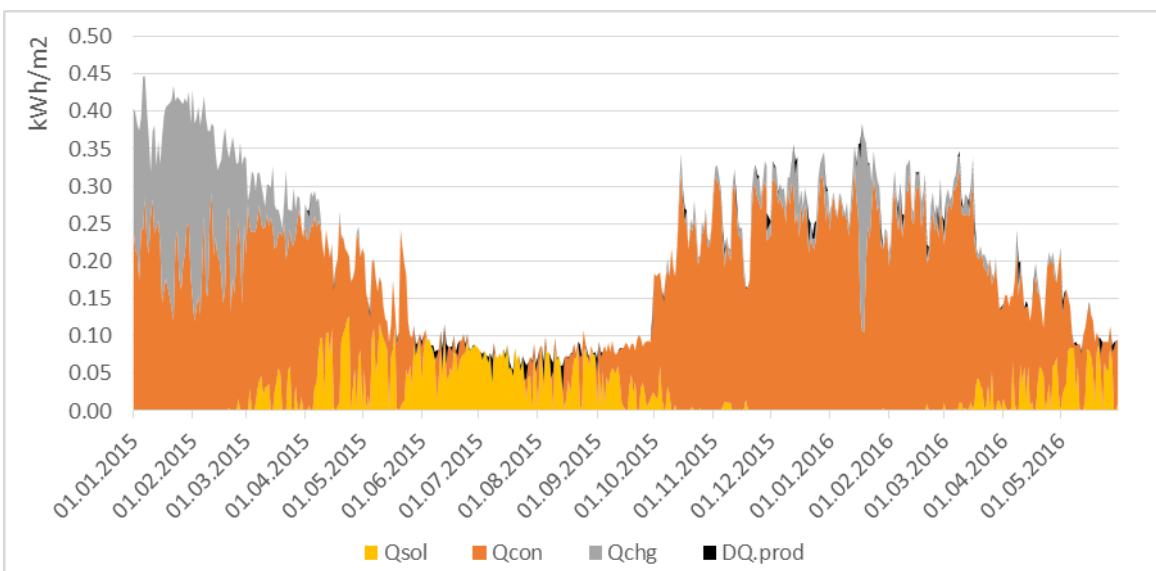
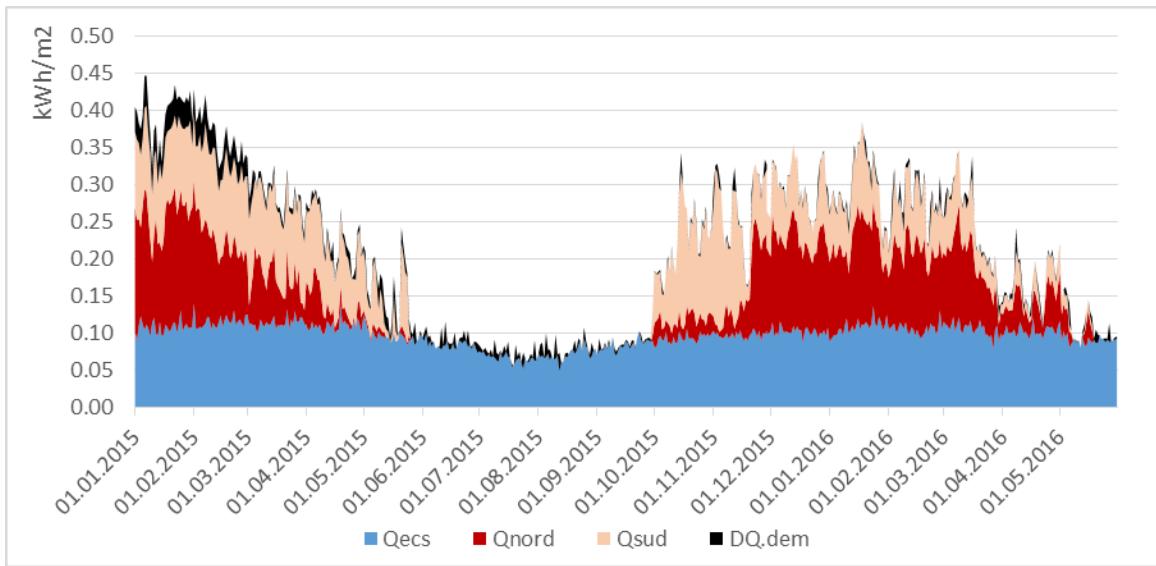
Au niveau de la demande, on observe le ruban de la demande ECS, aux alentours de 0.1 kWh/m^2 par jour, avec une légère chute à la belle saison, qui s'accentue pendant les deux mois de vacances estivales. La demande de chauffage, qui dépend de la température extérieure, disparaît complètement entre fin-mai et début octobre. Lors de la relance du chauffage et jusqu'à fin novembre, la demande du secteur sud dépasse largement celles du secteur nord, en raison d'une vanne de mélange bloquée sur position manuelle. Par conséquent, la demande de chauffage atteint pendant cette période des pics relativement élevés ($0.15 - 0.20 \text{ kWh/m}^2$ par jour), malgré une température extérieure encore clémente, et l'excès de demande du secteur sud compense partiellement la demande du secteur nord, par transfert entre appartements.

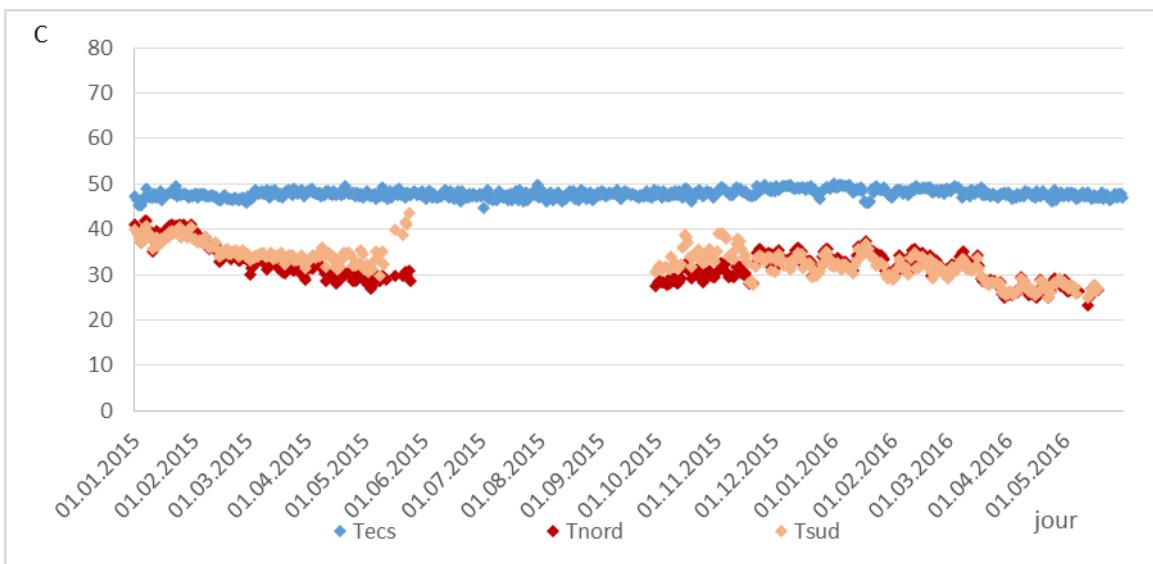
Au niveau de la production, on observe lors du premier hiver un appel important de la chaudière, en raison d'un défaut de régulation de la PAC (cf. chapitre 3.5.1). Ce défaut de fonctionnement n'apparaît plus du tout lors du deuxième hiver, pendant lequel la PAC assure l'essentiel de la production. La production solaire n'apparaît, quant à elle, qu'entre les mois de mars et octobre, et assure près de la totalité de la production pendant les mois de juin à août.

Finalement, le défaut de bilan journalier (excès de production ou de demande) correspond essentiellement au stockage/déstockage de chaleur dans l'accumulateur, et dans une moindre mesure aux pertes thermiques de l'accumulateur et du bus thermique (voir section 3.7.4.6). La période initiale (jusque fin avril 2015) constitue à cet égard une exception, pendant laquelle un important défaut de bilan (excès de production ou défaut de demande) n'a pas pu être expliqué.

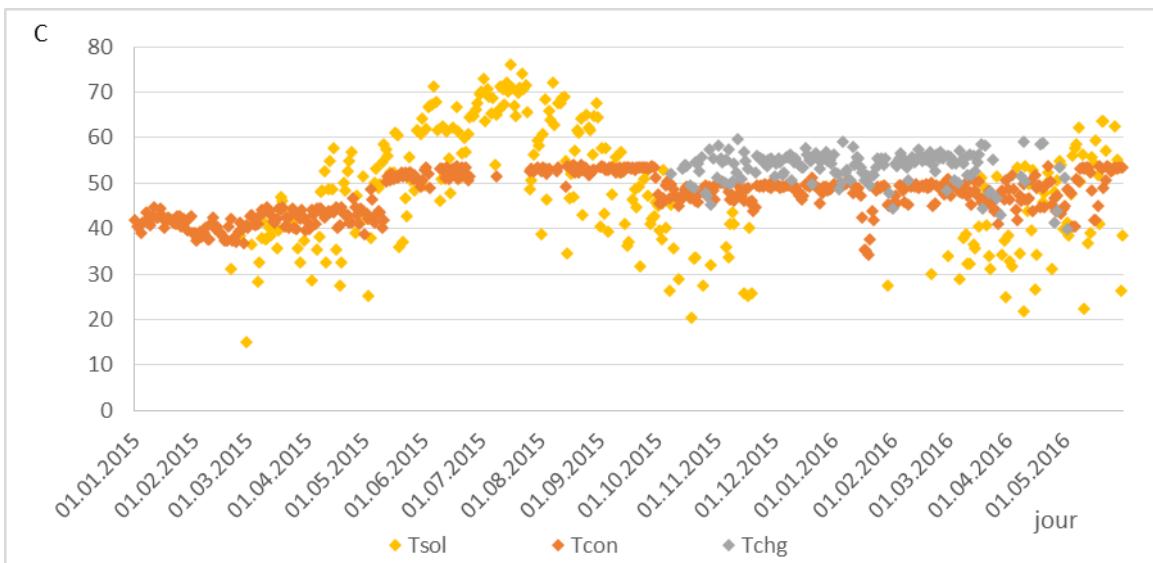
Au niveau des températures de fonctionnement (moyennes journalières), on observe pour l'ECS (charge du boiler) une température légèrement inférieure à 50°C . La température de distribution de chauffage varie quant à elle entre environ 30 et 40°C , en fonction de la température extérieure ; suite à l'ajustement de la courbe de chauffage en mars 2016, elle descend même aux alentours de 25°C .

En ce qui concerne la production, on observe la limitation de la production de la PAC aux alentours de $40 - 45^\circ\text{C}$ pendant le premier hiver, défaut corrigé par la suite. En complément la température de production de la chaudière monte à $55 - 60^\circ\text{C}$ (mesures disponibles uniquement sur le deuxième hiver). Enfin, la température de production solaire varie entre 20 et 80°C , en fonction de la saison.





Températures de demande, moyennes journalières
(Tecs : demande ECS, Tnord et Tsud : demande chauffage nord et sud)



Températures de production, moyennes journalières
(Tsol : solaire, Tcon : pompe à chaleur - condenseur, Tchg : chaudière)

3.7.4 Analyse des sous-systèmes

3.7.4.1 Demande ECS

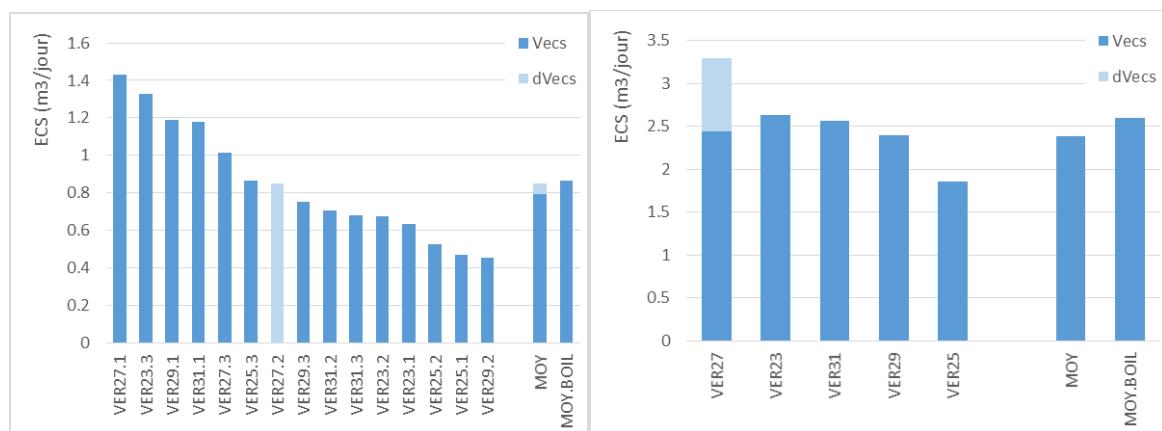
La demande annuelle nette d'ECS, au niveau du soutirage (26.7 kWh/m^2), est 19% supérieure à la valeur observée sur le bâtiment Vidollet (22.4 kWh/m^2) et 28% supérieure à la norme SIA (20.8 kWh/m^2). L'écart entre les deux bâtiments est légèrement inférieur lorsque comptabilisé par rapports aux habitants (Vermont : 1'066 kWh/hab ; Vidollet : 953 kWh/hab). Les même écarts entre bâtiments sont observé pour la demande brute d'ECS, au niveau de la charge du boîtier (Vermont : 33.8 kWh/m^2 ou 1'351 kWh/hab ; Vidollet : 28.0 kWh/m^2 .an ou 1'190 kWh/hab).

Si ces écarts peuvent à priori sembler importants, il convient de remarquer que, de façon générale, la demande d'ECS varie énormément d'un bâtiment à l'autre, et se situe en moyenne au-dessus de la norme SIA, du moins dans le résidentiel collectif.

Ainsi, une analyse comparative sur 13 bâtiments résidentiels collectifs du Canton de Genève, indique une demande nette d'ECS s'élevant en moyenne à 27.5 kWh/m^2 , ou 1'077 kWh/hab (Khoury, 2014). Ces valeurs, proches de celles observées sur le bâtiment Vermont, sont nettement supérieures à la norme SIA.

Des résultats similaires sont obtenus dans le cadre de l'analyse comparative de la demande brute (production) d'ECS de 62 sous-stations du réseau CADSIG, alimentant 440 bâtiments, principalement dédiés au logement collectif, représentant 5.4% de la demande de chaleur totale (ECS + chauffage) du secteur résidentiel collectif du canton (Quiquerez, 2016). En valeur médiane, la demande brute d'ECS (34.0 kWh/m^2 ou 1'478 kWh/hab) est proche de la valeur observée sur le bâtiment Vermont. Par ailleurs, la variation observée entre les 62 sous-stations atteint un facteur 2.5 entre valeurs minimale et maximale (de 21.7 à 56.8 kWh/m², respectivement de 947 à 2'352 kWh/hab).

A cet égard (voir graphique ci-dessous), il est intéressant de noter que la consommation d'ECS des 15 colonnes du bâtiment Vermont affichent elles aussi une dispersion importante (facteur 3.1 entre le minimum et le maximum). Cette dispersion se resserre passablement lorsque les valeurs sont agrégées au niveau des 5 allées (facteur 1.8).



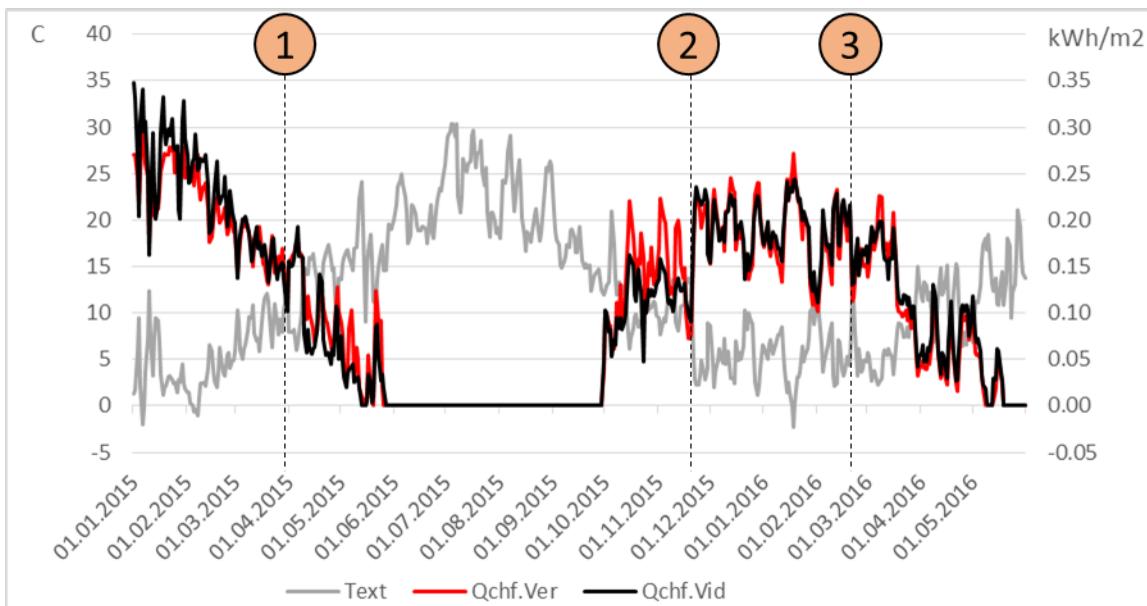
Volume journalier de soutirage ECS des 15 colonnes, respectivement des 5 allées du bâtiment.

(Bleu foncé : valeur mesurée, bleu clair : valeur reconstituée ; la valeur tout à droite correspond au soutirage total sur le boîtier)

3.7.4.2 Demande de chauffage

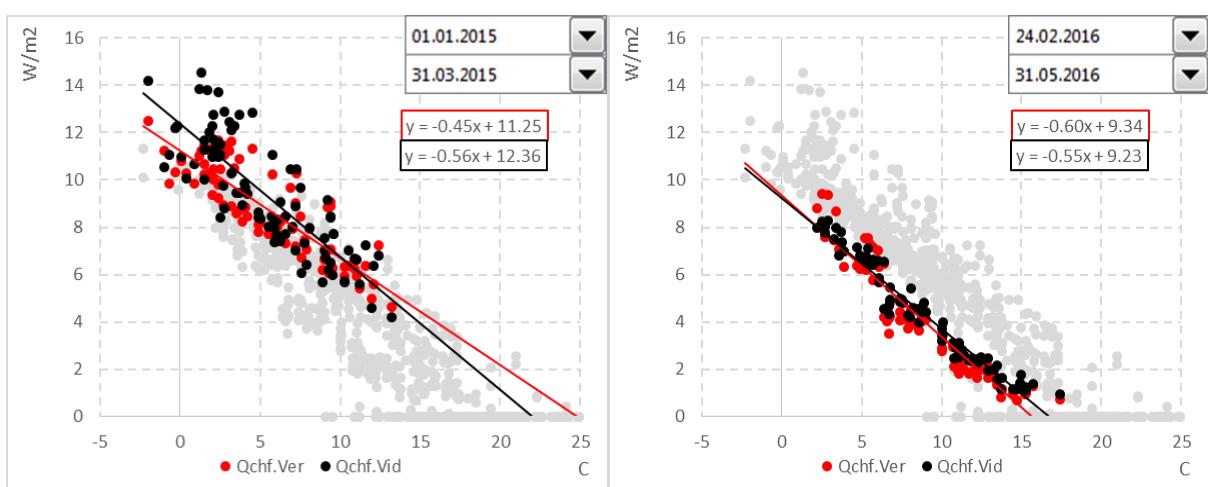
Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la température extérieure et de la demande de chauffage des bâtiments Vermont et Vidollet, en valeurs journalières. On y distingue également les trois phases de réglages et optimisation :

- Mai 2015 : réglage des courbes de chauffe.
- Mi-novembre 2015 : réglage des consignes de la récupération de chaleur double-flux, et déblocage d'une vanne de mélange bloquée sur position manuelle (Vermont, secteur sud).
- Fin février 2016 : optimisation des courbes de chauffe.



Températures extérieure et demande de chauffage des bâtiments en valeurs journalières (Vermont : rouge, Vidollet : noir) et indication des trois principales périodes de réglage

L'effet de ces réglages est clairement visible sur la signature de chauffage (ci-dessous). Sur le bâtiment Vermont, la puissance de chauffage à 0°C extérieur se situait à 11.3 W/m² avant réglages, pour une température de non-chauffage aux alentours de 20 - 25°C. Après réglages ces valeurs ont baissé à 9.3 W/m² et 15°C.



Signature de chauffage des bâtiments Vermont (rouge) et Vidollet (noir), en valeurs journalières (à gauche : avant réglages ; à droite : après réglages ; points gris : ensemble de la période de mesure).

Ainsi que le montre la comparaison ci-dessous, l'effet de ces réglages se répercute sur les bilans annuels. A défaut d'avoir ici à disposition 24 mois de mesures, nous effectuons cette comparaison sur deux années « à cheval » l'une sur l'autre : i) la première année de mesure (1/1/2015 – 31/12/2015), comprenant la situation avant réglage et la première série de réglages ; ii) l'année de référence (1/6/2015 – 31/5/2016), qui comprend les trois réglages successifs. Nous calculons également la demande de chaleur que l'on obtiendrait avec la signature de chauffage optimisée (observée dès fin février 2016, voir ci-dessus), pour cette même année de référence. Pour comparaison entre elles ainsi qu'avec les diverses variantes de dimensionnement, ces valeurs sont corrigées climatiquement avec la météo SIA 2028, qui a servi de base au dimensionnement du projet.

Contexte	Période		DJ 21/15	Qchf brut	Qchf corr. *)
	début	fin	K.j	kWh/m ²	kWh/m ²
Mesure, avant réglages	01.01.2015	31.12.2015	2914	38.9	47.0
Mesure, pendant réglages	01.06.2015	31.05.2016	3054	32.5	37.4
Calcul, après réglages **)	01.06.2015	31.05.2016	3054	25.4	29.3
Minergie P					17.4
Objectif (NOM)					26.1
Dimensionnement (DIM)					45.3

*) correction climatique avec météo SIA 2028 (3519 DJ 21/15) **) calcul avec signature énergétique optimisée

Demande de chauffage avant/après réglages (en valeur brute et avec correction climatique), ainsi que valeurs de références (projet).

Pour l'année 1, la demande de chauffage corrigée (47.0 kWh/m²) se situe à peine au-dessus de la valeur de dimensionnement (45.3 kWh/m²), mais bien au-dessus de la valeur cible (26.1 kWh/m²) et de la valeur Minergie (17.4 kWh/m²). Grâce aux réglages successifs, on observe une réduction de 20% sur la demande de chauffage de la deuxième année (37.4 kWh/m²). Finalement, si la signature finale devait se confirmer, on devrait à l'avenir s'attendre à une demande optimisée (29.3 kWh/m²) proche de l'objectif du projet. La valeur Minergie, qui repose sur une température de chauffage et un débit de ventilation normés, n'est quant à elle pas atteinte en situation réelle d'utilisation.

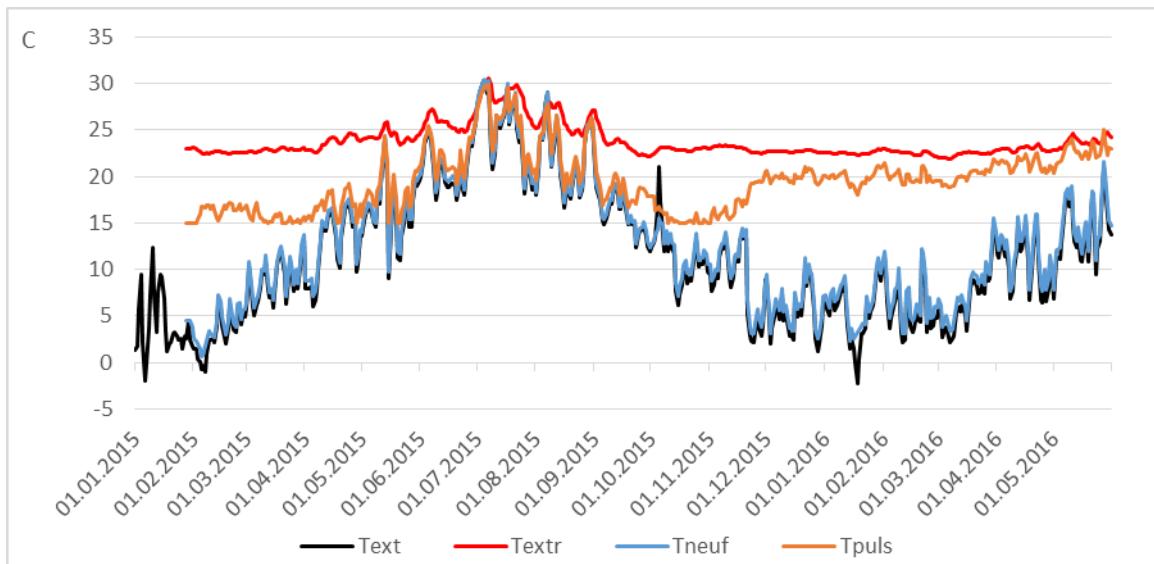
3.7.4.3 Ventilation, températures des logements, récupération de chaleur

La ventilation mécanique du bâtiment Vermont s'effectue avec un débit d'extraction moyen de 7124 m³/h (0.97 m³/h.m²), très stable au cours de l'année. Le débit de pulsion correspondant est de 6822 m³/h (0.93 m³/h.m²). Ces valeurs sont légèrement supérieures à la norme SIA (0.7 m³/h.m²).

Le graphique ci-dessous représente la dynamique des températures de ventilation sur l'ensemble de la période de mesure. Il est complété par les deux graphiques suivants : i) température d'extraction (température moyenne des logements) en fonction de la température extérieure ; ii) ΔT récupéré (différence entre air pulsé et air neuf) en fonction du ΔT disponible (différence entre air repris et air neuf).

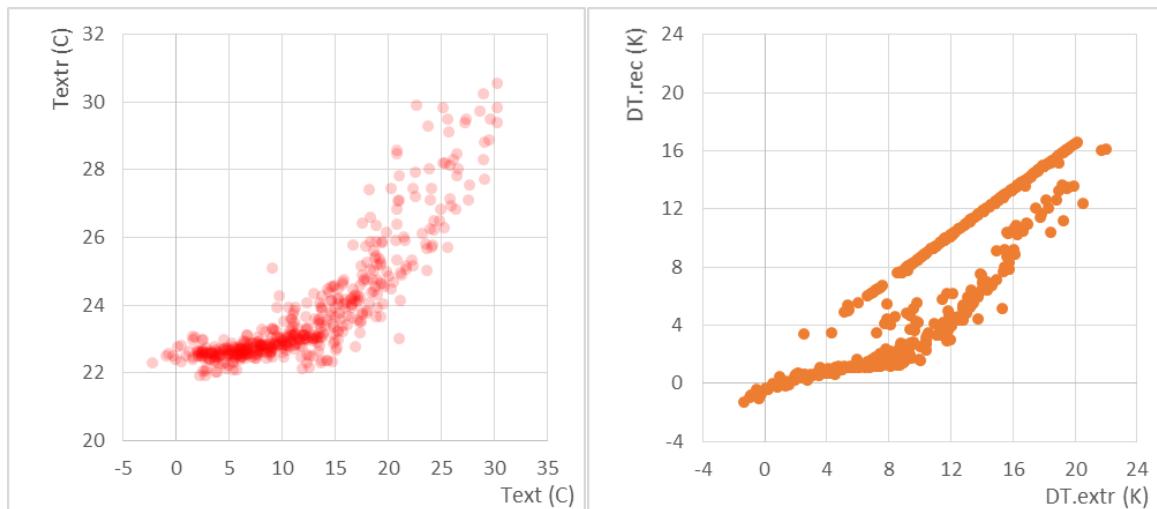
Jusqu'à la fin novembre 2015, une température de reprise dépassant 22°C était interprétée par la régulation comme une situation de surchauffe estivale. Le récupérateur de chaleur était alors partiellement bipassé, de façon à maintenir (dans la mesure du possible) la température de pulsion à 15°C. Cependant, en période de chauffage, la température de reprise se situe à 22.8°C en moyenne, si bien que le récupérateur de chaleur était alors systématiquement bipassé (de façon partielle). L'efficacité du récupérateur de chaleur oscillait alors entre 20 et 70% (en fonction de la température extérieure).

Ce problème de régulation a été réglé fin novembre 2015, en remontant le set point de surchauffe à 25°C. Depuis lors, le récupérateur de chaleur a fonctionné durant tout l'hiver avec une efficacité de 80% (voir ci-dessous le ΔT récupéré en fonction du ΔT disponible).



Dynamique des températures de ventilation, moyennes journalières.

(Text : extérieur, Textr : air extrait, Tneuf : air neuf, Tpuls : air pulsé)



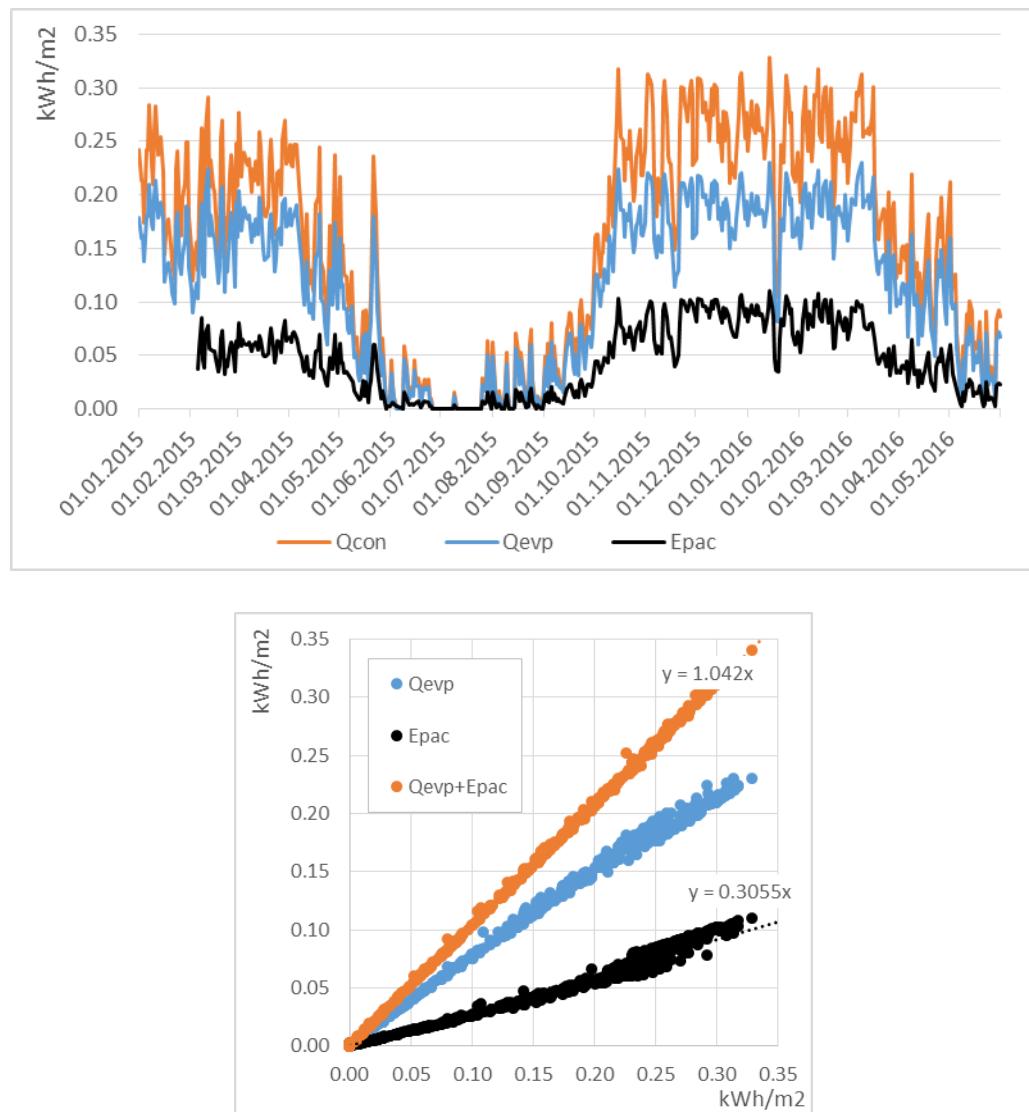
A gauche : température d'extraction en fonction de la température extérieure. A droite : ΔT récupéré en fonction du ΔT disponible ($DT.rec = Tpuls - Tneuf$, $DT.extr = Textr - Tneuf$). Valeurs journalières.

Ceci dit, les déperditions thermiques par ventilation dépendent également de l'ouverture manuelle des fenêtres. Afin de déterminer le taux d'ouverture des fenêtres, nous avons mené une campagne de photos infrarouges couvrant l'ensemble des 930 fenêtres des bâtiments Vermont et Vidollet, à raison d'une photo toutes les 2 heures sur 7 jours consécutifs de fin février 2016 (caractérisés par une température moyenne de 4.9°C). Pour chacune des fenêtres et pas de temps, ces photos ont été analysées en distinguant les situations suivantes : i) fenêtre fermée ; ii) fenêtre entre-ouverte (imposte) ; iii) fenêtre complètement ouverte.

L'étude statistique indique un taux moyen d'entre-ouverture de 14% pour les fenêtres donnant directement sur les appartements, respectivement de 7% pour les fenêtres donnant sur les loggias. En ce qui concerne les fenêtres complètement ouvertes, ce taux chute à 2% pour les fenêtres donnant directement sur les appartements, respectivement à 3% pour les fenêtres donnant sur les loggias. Les résultats complets de cette étude seront disponibles début 2017 (Compare-Renove, 2017).

3.7.4.4 Pompe à chaleur

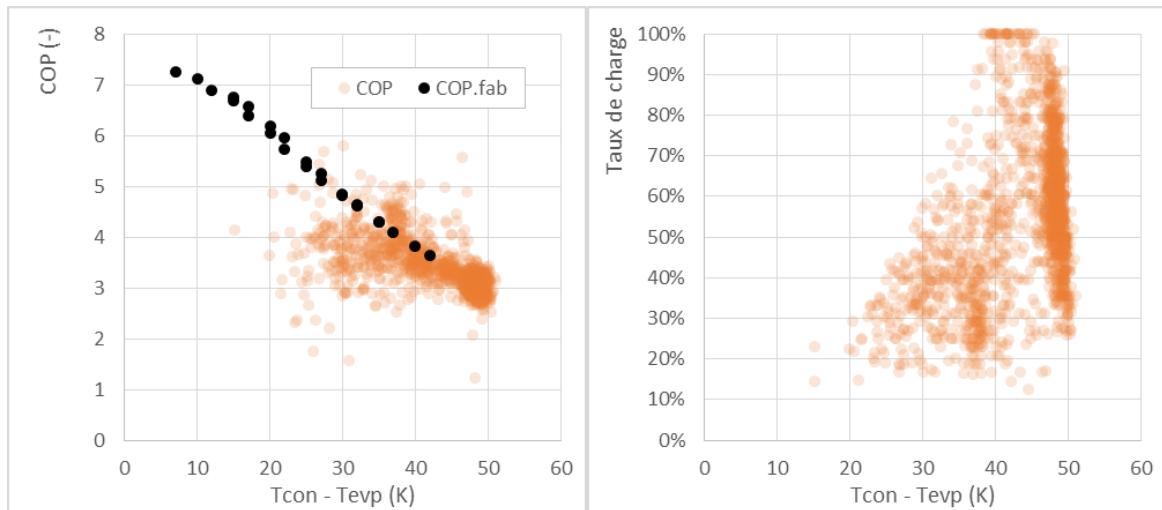
Le fonctionnement combiné des deux pompes à chaleur est visible sur le graphique ci-dessous. On observe la relation proportionnelle quasi parfaite, en valeurs journalières, entre l'output des deux PAC (chaleur produite au condenseur) et leurs inputs (chaleur absorbée à l'évaporateur + électricité, non-compris les auxiliaires), qui se traduit par un COP journalier quasi constant (3.27), très proche de la valeur annuelle (COP = 3.24). On note également le solde positif de 4% entre inputs et output, déjà observé au niveau du bilan annuel.



Fonctionnement des PAC, en valeurs journalières. Haut : dynamique ; Bas : input (électricité et évaporateur) en fonction de l'output (condenseur)

(Qcon : condenseur, Qevp : évaporateur, Epac : électricité pac)

Les PAC sont également caractérisées ci-dessous en fonctionnement horaire (note : afin d'éliminer les régimes transitoires, impropre à cette caractérisation, les heures pendant lesquelles les PAC n'ont pas fonctionné en continu ne sont pas retenues dans cette analyse).



Caractérisation du fonctionnement des PAC, valeurs horaires. A gauche : COP en fonction du différentiel de température condenseur (output) – évaporateur (input). A droite : taux de charge moyen des deux PAC.

Sur le graphique de gauche, les mesures horaires du COP (points oranges) sont comparées aux valeurs issues du catalogue fabriquant (points noirs), en fonction du différentiel de température entre la sortie du condenseur et l'entrée de l'évaporateur.

On remarque une forte dispersion des points de mesure, liée à la faible résolution du compteur de chaleur (une impulsion par 10 kWh, en principe impropre à une analyse au pas de temps horaire). Malgré cela, on observe que les PAC fonctionnent majoritairement avec un ΔT entre 45 et 50 K, supérieur à la plage de fonctionnement habituel prévu. Le COP mesuré pour un tel ΔT se situe cependant dans le prolongement des données fabriquant, attestant en ce sens d'un fonctionnement correct des PAC.

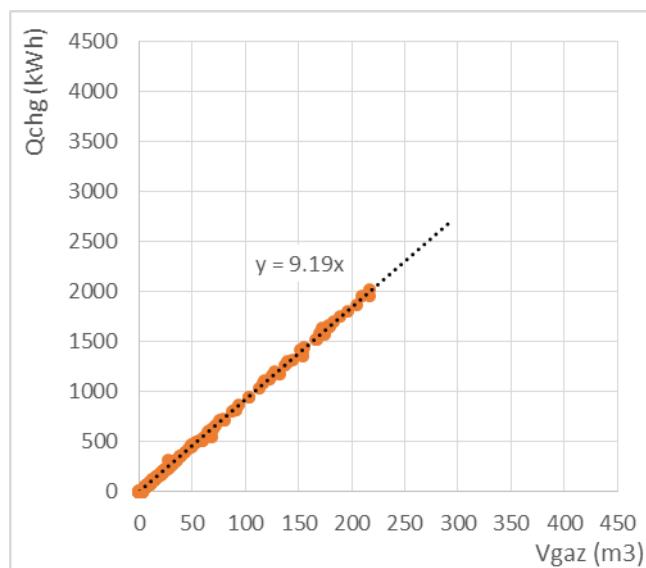
Pour rappel, cet important ΔT provient essentiellement de la production d'ECS, aux alentours de 50°C, alors que la production de chauffage se situe entre 30 et 40°C (cf. chapitre 3.7.3).

A plus faible ΔT , le COP mesuré se situe globalement dans une plage de valeurs inférieures à celle du fabricant. Bien que la dispersion rende difficile un jugement définitif à ce propos, une telle chute du COP pourrait s'expliquer par le fonctionnement des PAC à taux de charge partiel.

Finalement, étant donné ce qui précède, nous calculons la consommation électrique à laquelle on pourrait s'attendre avec une PAC à haut rendement (efficacité thermodynamique constante de 50%, définie comme le rapport entre le COP réel et le COP de Carnot), dans l'hypothèse où il n'y aurait pas de dégradation à charge partielle, ni à haut ΔT . Pour une telle PAC, le COP annuel s'élèverait à 3.64 (hors auxiliaires), correspondant à une consommation électrique annuelle de 14.7 kWh/m², soit à peine 1.8 kWh/m² de moins que dans le cas actuel. Ce résultat confirme que le COP relativement modeste de la PAC est à mettre en relation, dans un bâtiment à faible demande de chauffage tel que celui-ci, avec la fraction importante de la demande ECS et la haute température de production associée.

3.7.4.5 Chaudière à gaz

Tout comme pour les PAC, on observe pour la chaudière une relation proportionnelle entre input (volume de gaz consommé) et output (production de chaleur), en valeurs journalières. Le coefficient de proportionnalité de 9.19 kWh/m³ est à mettre en relation avec un PCS moyen de 11.33 kWh/m³, ce qui correspond à une efficacité de 81% (en PCS). Bien que cette efficacité soit assez faible pour une chaudière de nouvelle génération, il s'agit de rappeler qu'il s'agit uniquement d'une chaudière de backup : son usage reste relativement sporadique, et les pertes associées s'élèvent annuellement à 1.0 kWh/m² (1.6% de la demande de chaleur brute du bâtiment).



Caractérisation de la chaudière à gaz, en valeurs journalières.

(Vgaz : consommation de gaz, Qchg : production de chaleur en sortie chaudière)

3.7.4.6 Accumulateur

Ainsi que nous l'avons relevé plus haut (section 3.7.3), le défaut de bilan journalier observé au niveau de l'accumulateur (excès de production ou de demande) correspond essentiellement au stockage/déstockage de chaleur dans l'accumulateur, et dans une moindre mesure aux pertes thermiques de l'accumulateur et du bus thermique.

Cette observation provient de la caractérisation de l'accumulateur via le modèle bilinéaire suivant, qui met en relation le défaut de bilan (input – output), avec les des composantes de stockage/déstockage et de perte thermique :

$$Q_{in} - Q_{out} = C(T_{acc,24h} - T_{acc,0h}) + H(T_{acc} - T_{local})dt$$

Avec :

$$Q_{in} = Q_{sol} + Q_{con} + Q_{chg}$$

$$Q_{out} = Q_{ecs} + Q_{chf}$$

Q_{sol} : production solaire (kWh)

Q_{con} : production pac, sortie condenseur (kWh)

Q_{chg} : production chaudière à gaz (kWh)

Q_{ecs} : demande brute ECS, input boiler (kWh)

Q_{chf} : demande chauffage (kWh)

C : capacité thermique effective (kWh/K)

H : facteur de perte effectif, accumulateur + bus thermique (kW/K)

$T_{acc,24h}$: température de l'accumulateur, à 24 h (°C)

$T_{acc,0h}$: température de l'accumulateur, à 0 h (°C)

T_{acc} : température de l'accumulateur, moyenne sur 24 h (°C)

T_{local} : température du local de chaufferie, moyenne sur 24 h (°C)

dt : pas de temps (24 h)

Sur la période faisant l'objet du bilan annuel (juin 2015 – mai 2016), la régression bilinéaire sur les valeurs journalière est bien déterminée ($R^2 = 0.92$) et les coefficients de régression sont les suivants :

$$C = 11.7 \pm 0.2 \text{ (kWh/K)}$$

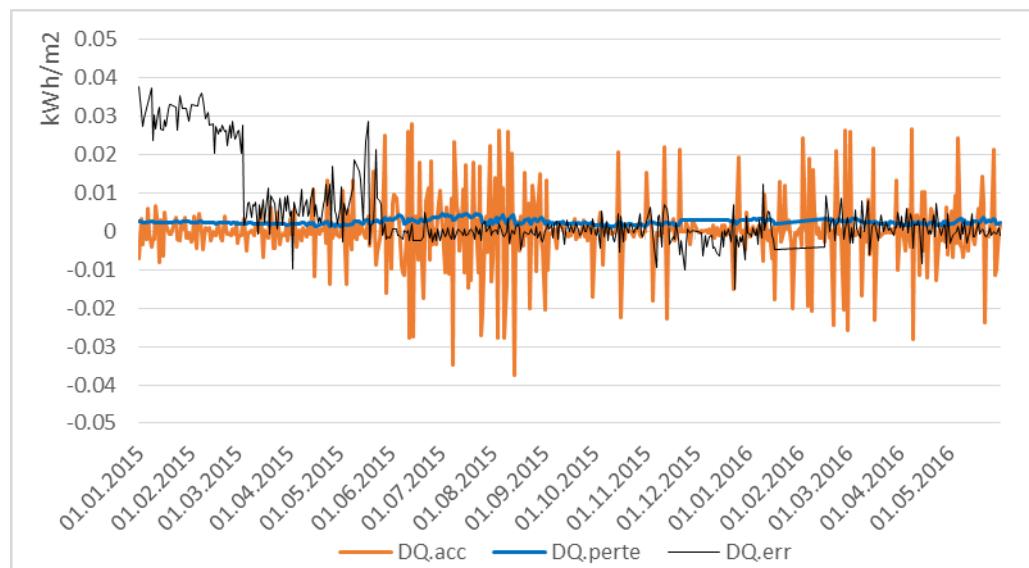
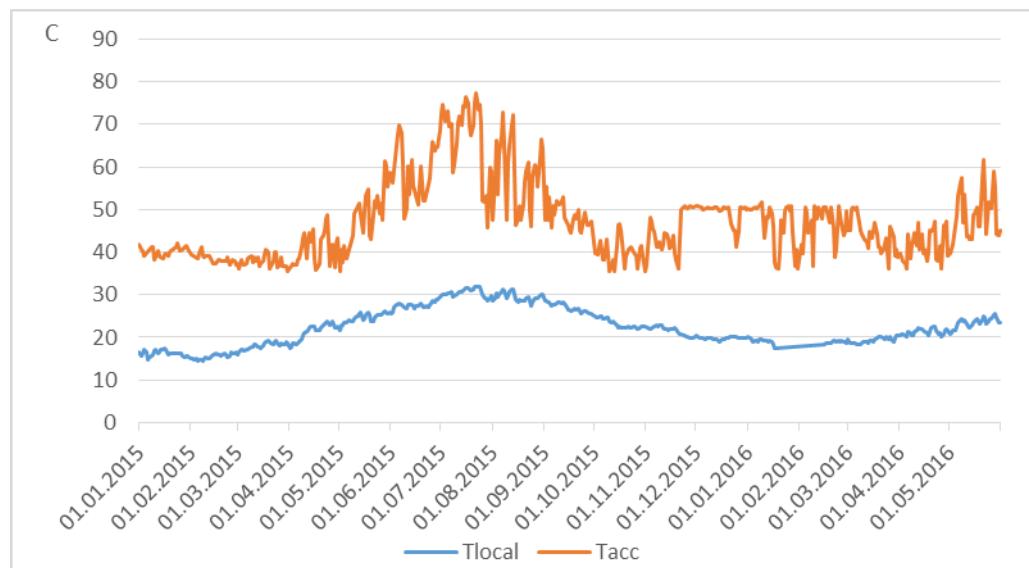
$$H = 31.0 \pm 1.9 \text{ (W/K)}$$

La capacité thermique effective C correspond à 9'960 lit, valeur proche du volume total de l'accumulateur (11'850 lit). Le facteur de perte effectif H est quant à lui environ 5 fois supérieur au facteur de perte théorique de l'enveloppe de l'accumulateur ($28 \text{ m}^2 \times 0.2 \text{ W/K.m}^2 = 5.6 \text{ W/K}$), mais il inclut les pertes thermiques de l'ensemble du bus thermique, des échangeurs et les divers ponts thermiques.

Sur les graphiques suivants on observe : en haut, la dynamique des températures de l'accumulateur et du local de chaufferie ; en bas, la décomposition du défaut production – demande : stock-

age/déstockage, perte thermique, erreur nette de bilan. Dès juin 2015, on constate que l'erreur nette de bilan est quasiment réduite à zéro, ce qui atteste de la grande cohérence des mesures des divers flux de production et demande de chaleur. La période initiale (jusque fin avril 2015) constitue à cet égard une exception, pour laquelle un important défaut de bilan (excès de production ou défaut de demande) n'a pas pu être expliqué.

Finalement, ainsi que nous l'avons mentionné plus haut, les pertes thermiques de l'accumulateur / bus thermiques restent faibles (0.1 kWh/m^2 sur l'année de référence, soit 1.4% de la production de chaleur).

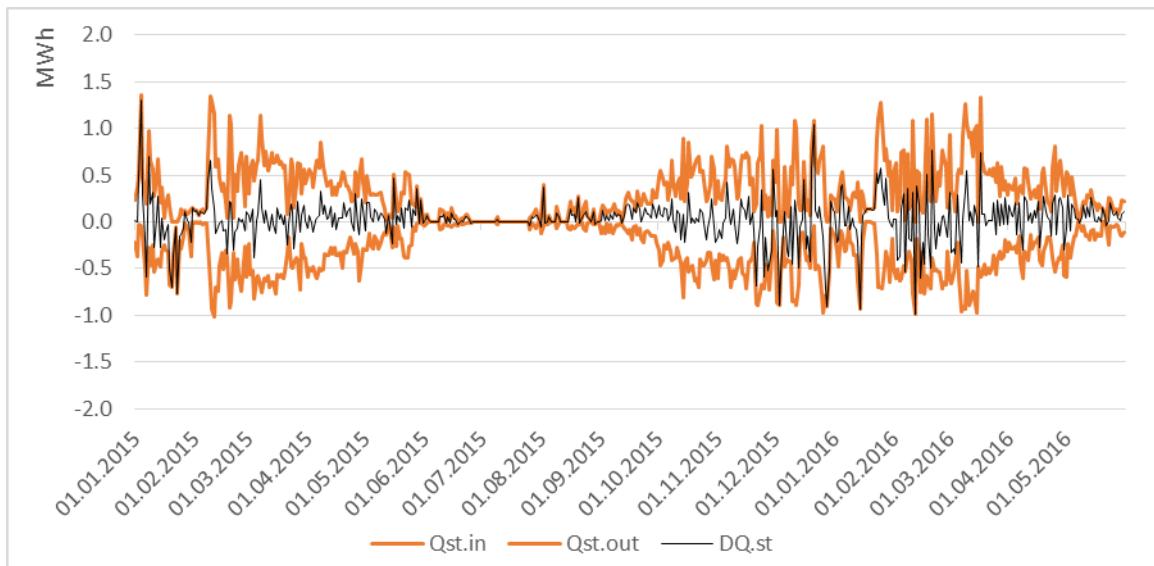
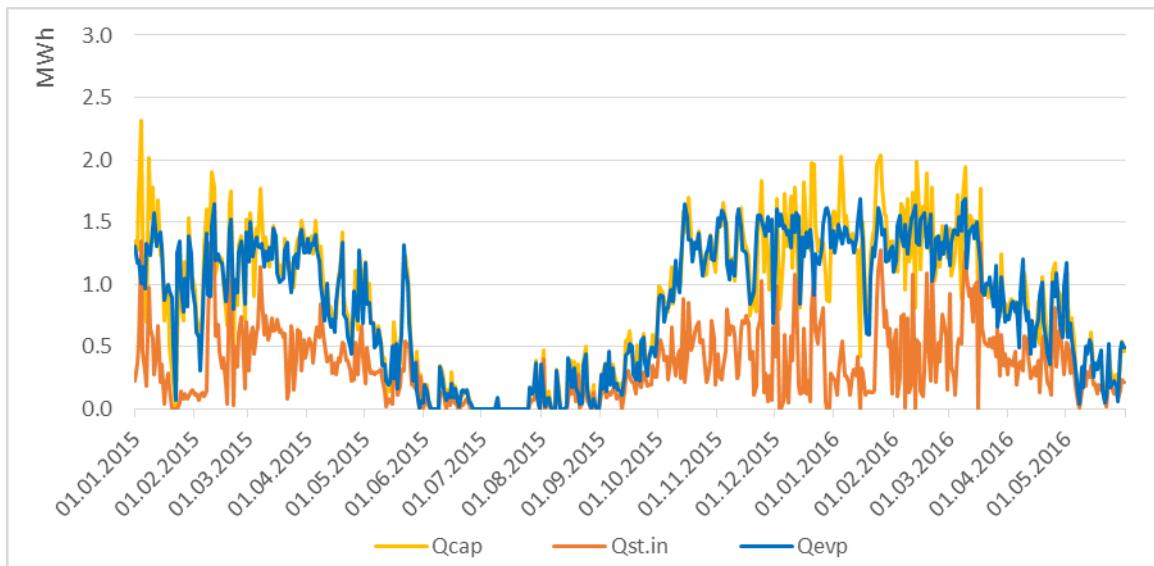


Dynamique de fonctionnement de l'accumulateur de chaleur / bus thermique, en valeurs journalières.

(Tacc : température moyenne de l'accumulateur, Tlocal : température de la chaufferie, DQ.acc : stockage(+) / déstockage(-), DQ.perte : perte thermique, DQ.err : erreur de bilan)

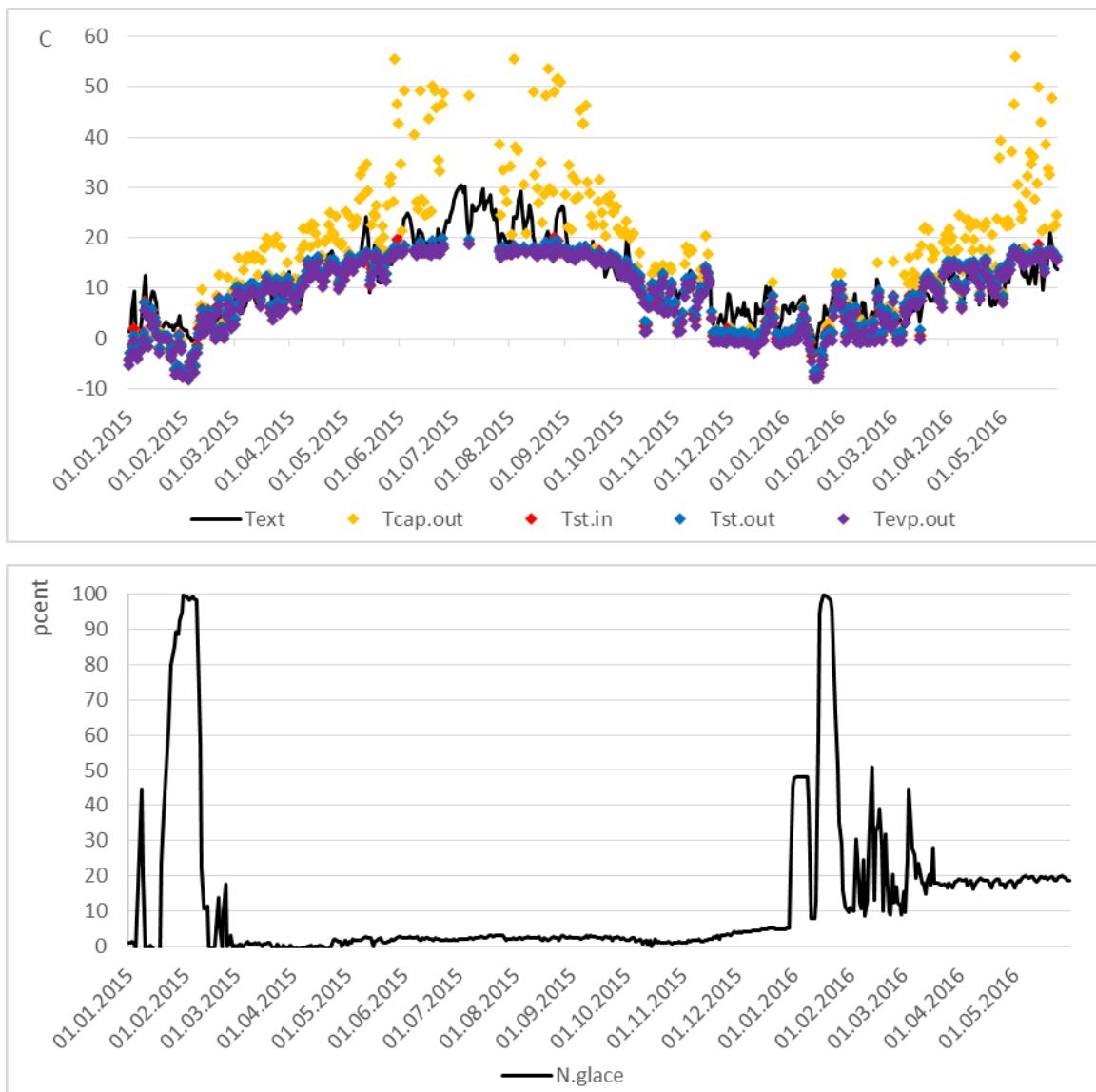
3.7.4.7 Evaporateur et stock à glace

On observe ci-dessous la dynamique des flux de chaleur au niveau de l'évaporateur et du stock à glace, et en page suivante les températures associées et le niveau de glace du stock.



Dynamique du stock à glace, flux de chaleur, valeurs journalières.

(Qcap : production capteurs vers stock/évaporateur, Qst.in : stockage, Qst.out : déstockage, DQ.st : stockage – déstockage ; Qevp : évaporateur)



Dynamique du stock à glace, températures et niveau de glace, valeurs journalières.

(Text : extérieur, Tcap.out : sortie capteurs, Tst.in : entrée stock, Tst.out : sortie stock, Tevp.out : sortie évaporateur, N.glace : niveau de glace).

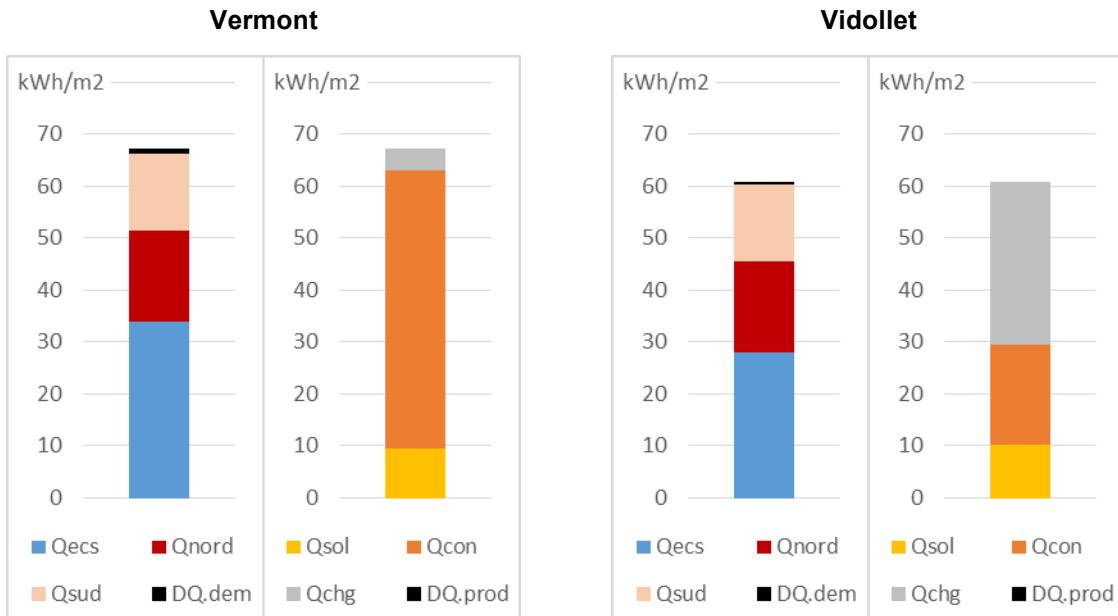
Le stock à glace est surtout utilisé en hiver et en mi-saison, avec des cycles de stockage/déstockage essentiellement intra-journaliers ou inter-journaliers. Un effet saisonnier est également visible sur l'évolution de la température du stock (entrée et sortie) et sur l'évolution du niveau de glace.

En mi-saison et en été, le stock est complètement dégelé. La température du stock (et avec elle la température de l'évaporateur) est progressivement élevée jusqu'aux alentours de 18°C, en jouant sur l'ouverture de la vanne qui libère l'accès au champ solaire (le solde étant utilisé pour de la production solaire direct). Une fois la consigne de 18°C atteinte (température maximale acceptée par la PAC), le champ solaire est entièrement dédié à la production solaire directe.

Dès l'automne, avec le recours accru à la PAC, la température du stock chute à nouveau, jusqu'à atteindre 0°C. Dès ce moment, le stock commence à geler, le niveau de glace augmentant et la température se maintenant à 0°C. Une fois le stock complètement gelé (début février 2015, ainsi que fin janvier 2016), la température du stock chute en dessous de zéro, jusqu'à atteindre -9°C (température limite pour l'utilisation de la PAC), suite à quoi la chaudière à gaz reprend la relève.

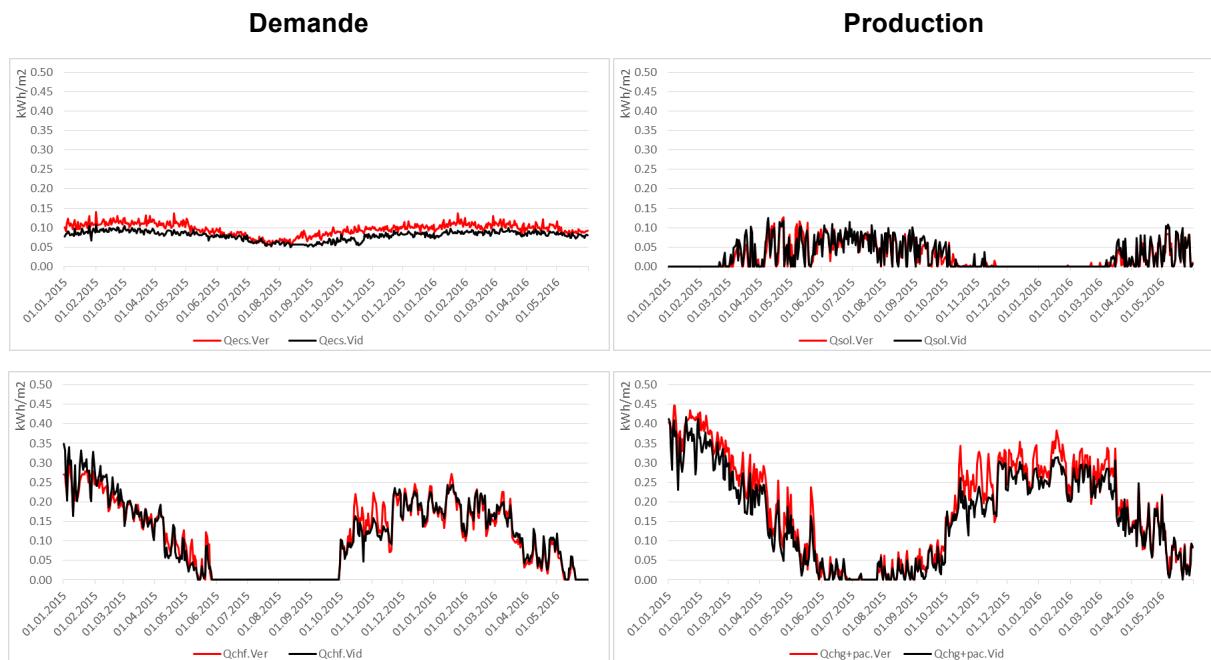
3.7.5 Comparaison Vermont / Vidollet

On trouve ci-dessous les bilans annuels (1/6/2015 – 31/5/2016) de demande et production de chaleur pour les bâtiments de Vermont et Vidollet. Ainsi que nous l'avons vu plus haut, la demande d'ECS de Vidollet (28.0 kWh/m^2) est environ 20% inférieure à celle de Vermont, alors que la demande de chauffage (32.2 kWh/m^2) est sensiblement égale, de même que le défaut de bilan (0.6 kWh/m^2), correspondant aux pertes de l'accumulateur de chaleur. Au niveau de la production l'apport solaire direct est également très proche (10.3 kWh/m^2). Suite à une panne de la PAC durant l'hiver 2015/2016, on observe par contre sur Vidollet le transfert de la production de la PAC (19.1 kWh/m^2) sur la chaudière (31.5 kWh/m^2).



Bilans demande et production de chaleur, bâtiments de Vermont et Vidollet (1/6/2015 – 31/5/2016)

(Qecs : ECS, Qnord et Qsud : chauffage secteurs nord et sud, Qsol : solaire, Qcon : pompe à chaleur, Qchg : chaudière, DQ.dem et DQ.prod : solde production / demande)



Dynamique demande et production de chaleur, bâtiments de Vermont et Vidollet

(Qecs : ECS , Qchf : chauffage, Qsol : solaire, Qchg+pac : chaudière + PAC)

Ci-dessus, la similitude de fonctionnement entre les deux installations est également visible au niveau de la dynamique en valeurs journalières.

On en déduit qu'en dépit de la panne impondérable sur l'installation Vidollet, les deux installations ont un fonctionnement tout à fait similaire et cohérent, ce qui atteste de leur reproductibilité.

3.7.6 Synthèse

Grâce à un traitement en une analyse détaillée des mesures à disposition, le bilan de la production et demande de chaleur des bâtiments Vermont et Vidollet a pu être établi sur une année de référence complète (juin 2015 – mai 2016, 3054 degrés-jours en base 21/15). En ce qui concerne le bâtiment Vermont on observe que:

- La demande annuelle de chaleur (66.3 kWh/m^2) provient pour 51% des besoins brut d'ECS (33.8 kWh/m^2) et pour 49% des besoins de chauffage (32.5 kWh/m^2).
- La production de chaleur (67.3 kWh/m^2) est couverte pour la plus grande partie par la PAC (53.6 kWh/m^2 , 78%), suivie du solaire (9.5 kWh/m^2 , 14%) et de la chaudière à gaz (5.2 kWh/m^2 , 8%).
- Le COP de la PAC s'élève à 3.2 (hors auxiliaires), respectivement à 3.0 (y compris pompes de circulation pour stock à glace, évaporateur et condenseur). Grâce à l'apport solaire direct, le COP du système IceSol s'élève quant à lui à 3.5 (y compris auxiliaires).
- En tenant compte que l'électricité utilisée par le système est labélisée d'origine renouvelable, la fraction annuelle d'énergie renouvelable (rapport entre ressources renouvelables et ressources totales mobilisées) s'élève à 93%, ce qui est un excellent résultat. A noter que cette fraction s'élèverait à 79% pour une électricité comptabilisée avec le mixe fournisseur suisse.

Au niveau des sous-systèmes, on relève les points suivants :

- La demande annuelle nette d'ECS, au niveau du soutirage (26.7 kWh/m^2), est 19% supérieure à la valeur observée sur le bâtiment Vidollet (22.4 kWh/m^2) et 28% supérieure à la norme SIA (20.8 kWh/m^2). Si ces écarts peuvent à priori sembler importants, il convient de remarquer que, de façon générale, la demande d'ECS varie énormément d'un bâtiment à l'autre, et se situe en moyenne au-dessus de la norme SIA, du moins dans le résidentiel collectif. A cet égard, la demande observée sur le bâtiment Vermont est très légèrement inférieure aux valeurs de benchmark observées sur le parc résidentiel collectif genevois.
- Avant réglages, la demande de chauffage (47.0 kWh/m^2 , corrigés climatiquement) se situe à peine au-dessus de la valeur de dimensionnement (45.3 kWh/m^2), mais bien au-dessus de la valeur cible (26.1 kWh/m^2) et de la valeur Minergie (17.4 kWh/m^2). Grâce aux réglages successifs, on observe une réduction de 20% sur la demande de chauffage de la deuxième année (37.4 kWh/m^2). Finalement, si la signature finale devait se confirmer, on devrait à l'avenir s'attendre à une demande optimisée (29.3 kWh/m^2) proche de l'objectif du projet. La valeur Minergie, qui repose sur une température de chauffage et un débit de ventilation normés, n'est quant à elle pas atteinte en situation réelle d'utilisation.
- Ce dernier point montre que les défauts de jeunesse de l'installation étaient essentiellement liés à des questions de réglages faisant partie de la gestion traditionnelle des systèmes techniques, et non au caractère innovant de la technique mise en place. On relève une fois de plus l'importance d'une réception correcte des installations techniques, ainsi que du suivi de ces dernières.
- Les PAC fonctionnent majoritairement avec un ΔT entre 45 et 50 K, supérieur à la plage de fonctionnement habituel prévu. Le COP mesuré pour un tel ΔT se situe cependant dans le prolongement des données fabriquant, attestant en ce sens d'un fonctionnement correct des PAC. Pour rappel, cet important ΔT provient essentiellement de l'importante fraction d'ECS, avec une température de production aux alentours de 50°C, alors que la production de chauffage se situe entre 30 et 40°C. A cet égard, une PAC à haut rendement (efficacité thermodynamique de 50%, sans dégradation à charge partielle ni à haut ΔT) permettrait de ramener le COP annuel à 3.64 (hors auxiliaires), correspondant à une baisse de consommation électrique de seulement 1.8 kWh/m^2 .

- Bien que l'efficacité de la chaudière soit assez faible (81% PCS), il s'agit de rappeler qu'il s'agit uniquement d'une chaudière de backup : son usage reste relativement sporadique, et les pertes associées s'élèvent annuellement à 1.0 kWh/m² (1.6% de la demande de chaleur brute du bâtiment).

En ce qui concerne le bâtiment Vidollet, on observe finalement les points suivants :

- Alors que la demande d'ECS (28.0 kWh/m²) est environ 20% inférieure à celle de Vermont, la demande de chauffage (32.2 kWh/m²) est sensiblement égale.
- Au niveau de la production, l'apport solaire direct est également très proche (10.3 kWh/m²). Suite à une panne de la PAC durant l'hiver 2015/2016, on observe par contre sur Vidollet le transfert de la production de la PAC (19.1 kWh/m²) sur la chaudière (31.5 kWh/m²).
- La similitude de fonctionnement entre les deux installations est également visible au niveau de la dynamique en valeurs journalières. On en déduit qu'en dépit de la panne impondérable sur l'installation Vidollet, les deux installations ont un fonctionnement tout à fait similaire et cohérent, ce qui atteste de leur reproductibilité.

3.8 Actions mises en œuvre pour maintenir les performances du système dans le futur

3.8.1 Formation des utilisateurs

La formation des utilisateurs a également été une priorité. Le 26 octobre 2015 les résultats de la première année de fonctionnement ont été présentés à tous les membres de la Coopérative de « La Cigale ». Dans ce contexte, les points clés de l'utilisation d'un bâtiment Minergie P ainsi que le fonctionnement du système de chauffage ont été développés dans les présentations. Des formations de ce type doivent être organisées afin de sensibiliser les utilisateurs et les amener ainsi à réduire la consommation d'énergie dans le but, petit à petit, de se rapprocher de la consommation des bâtiments aux normes Minergie-P.

Nous n'avons pas encore trouvé l'explication pour la consommation élevée d'eau chaude sanitaire du bâtiment de Vermont. Les résidents ont été informés et sensibilisés. Courant 2016 les SIG ont poursuivi l'analyse pour trouver une explication à ce phénomène mais sans succès. Il doit donc s'agir d'un comportement un peu différent des locataires.

3.8.2 Plateforme de suivi de performance avec rapports automatiques

Les SIG ont développé au cours de l'année 2016, une plateforme qui collecte et analyse automatiquement les mesures du système MCR et des compteurs officiels SIG.

Cet outil intègre des fonctions d'analyse automatiques permettant de déceler des écarts de fonctionnement par rapport au fonctionnement normal. Il peut ainsi transmettre des alarmes techniques résultant d'une analyse qu'un système MCR traditionnel ne peut pas détecter. Il fournit également mensuellement un rapport comportant des indicateurs de performance qui permettent d'identifier toute dérive ou comportement anormal en fonction des périodes, ainsi que les effets des optimisations ou corrections apportées.

3.8.2.1 Alarmes techniques et de suivi de performance

La plateforme permet par exemple une détection des blocages des compteurs de chaleur à une fréquence hebdomadaire et peut transmettre des d'alarmes techniques à l'entreprise en charge de la maintenance.

Un autre exemple est la surveillance des températures de reprise de la ventilation double flux et du rendement de récupération. Si le rendement descend en-dessous d'une valeur limite, une alarme technique est également transmise.

3.8.2.2 Rapports automatiques

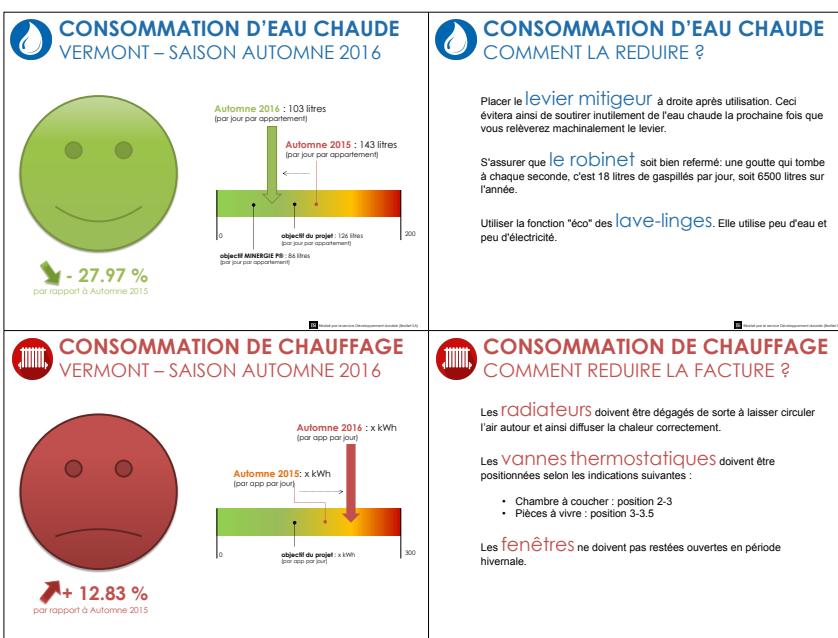
Chaque mois la plateforme établit un rapport et le transmet à la régie Brolliet et aux entreprises concernées par la maintenance. Le rapport comporte une analyse assez complète avec entre autres les indicateurs suivants :

- consommation d'eau chaude sanitaire (ECS) par rapport à des valeurs de référence
- variation de la consommation d'ECS et de chauffage par rapport au mois précédent et à l'année précédente
- consommation de chaleur avec répartition entre ECS et chauffage
- production de chaleur avec répartition entre solaire direct, pompe à chaleur et chaudière
- signature énergétique
- signature du fonctionnement moyen de la ventilation
- signature du COP des pompes à chaleur et du rendement des chaudières à gaz

Un exemple de rapport complet est fourni en annexe.



Le suivi des installations à travers la plateforme de suivi énergétique des SIG a permis des corrections sur les installations afin d'optimiser leur fonctionnement, ainsi qu'un suivi de certaines mesures après modifications d'optimisation afin de vérifier le bon fonctionnement des installations et le confort des usagers. Cette constatation permet de souligner l'importance d'un suivi afin d'adapter les paramètres de réglage à la réalité de l'installation et de corriger certains dysfonctionnements après mise en service tout en maintenant ou améliorant le confort des usagers lors de l'exploitation. A titre d'exemple, la correction des récupérations sur la ventilation permet d'effectuer une économie d'énergie sur le chauffage chiffrée à 8 %, tout en améliorant le confort des usagers avec une température d'air fourni plus élevée en hiver grâce au fonctionnement des récupérations.



Cette information sera affichée sur les écrans TV situés dans les entrées d'immeuble à partir de l'automne 2016. L'information sera complétée par des messages donnant des conseils de comportement pour réduire la consommation.

3.8.3 Informations aux utilisateurs par le biais des écran TV dans les entrées des allées

La régie Brolliet analyse les rapports automatiques mensuels et en réalise une synthèse par saison. L'information finale aux utilisateurs est ainsi contrôlée et vulgarisée sous forme d'une symbolique facile à interpréter permettant de situer la consommation par rapport à l'année précédente et à des références du projet.

3.9 Simulation du système « IceSol »

3.9.1 Modèle Polysun

De nombreux efforts ont été consacrés par Energie Solaire SA pour mettre en place un modèle du système « IceSol » dans le logiciel Polysun. Un avantage évident est que les rapports produits par ce programme sont bien accueillis et considérés comme acceptables par les différents acteurs d'un projet à évaluer.

En théorie cette mise en œuvre devait être possible depuis que :

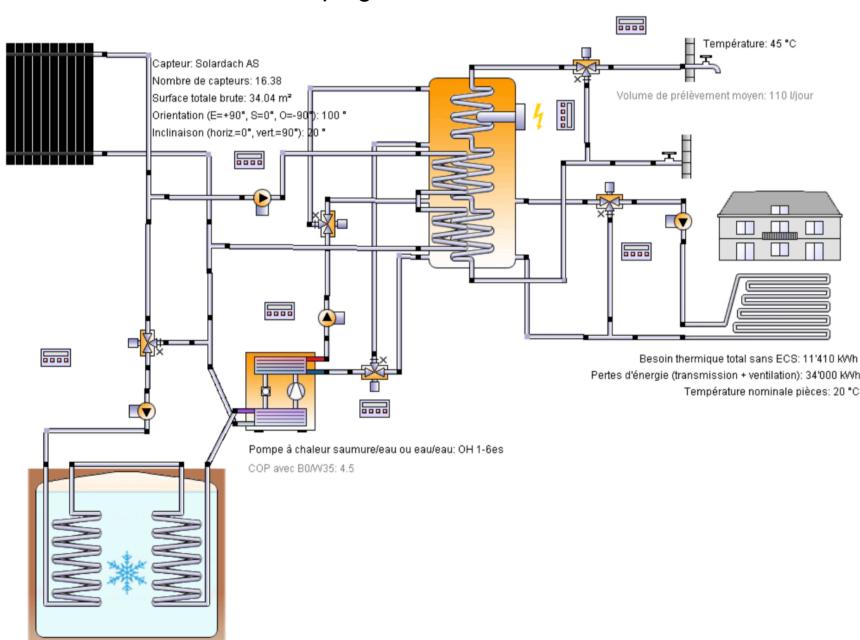
- la formulation des capteurs sans vitrage a été introduite dans Polysun, ce qui permet de décrire les échanges d'un capteur avec et sans ensoleillement
- un module de régulation « librement programmable » est disponible et permet donc de décrire les lois de comportement de la régulation « IceSol »
- les stocks de chaleur latente « eau+glace » sont disponibles

La pratique s'avère plus ardue que prévu ! En effet après la construction de nombreux schémas et la mise en place de la régulation, les résultats sont variables et très (trop ?) optimistes. La majeure partie des cas simulés indique que la pompe à chaleur est à même de satisfaire la demande à 100% ce qui n'est malheureusement pas possible.

La source de ce problème semble être la gestion de la pompe à chaleur dans Polysun qui n'a pas encore pu être bien comprise. En effet la PAC continue à fournir de la puissance lorsque la source de chaleur est en dehors des plages de fonctionnement définies. Il faudrait donc apparemment prendre

en charge la libération de la PAC lorsque la source est dans la tolérance admise et la verrouiller si ce n'est pas le cas.

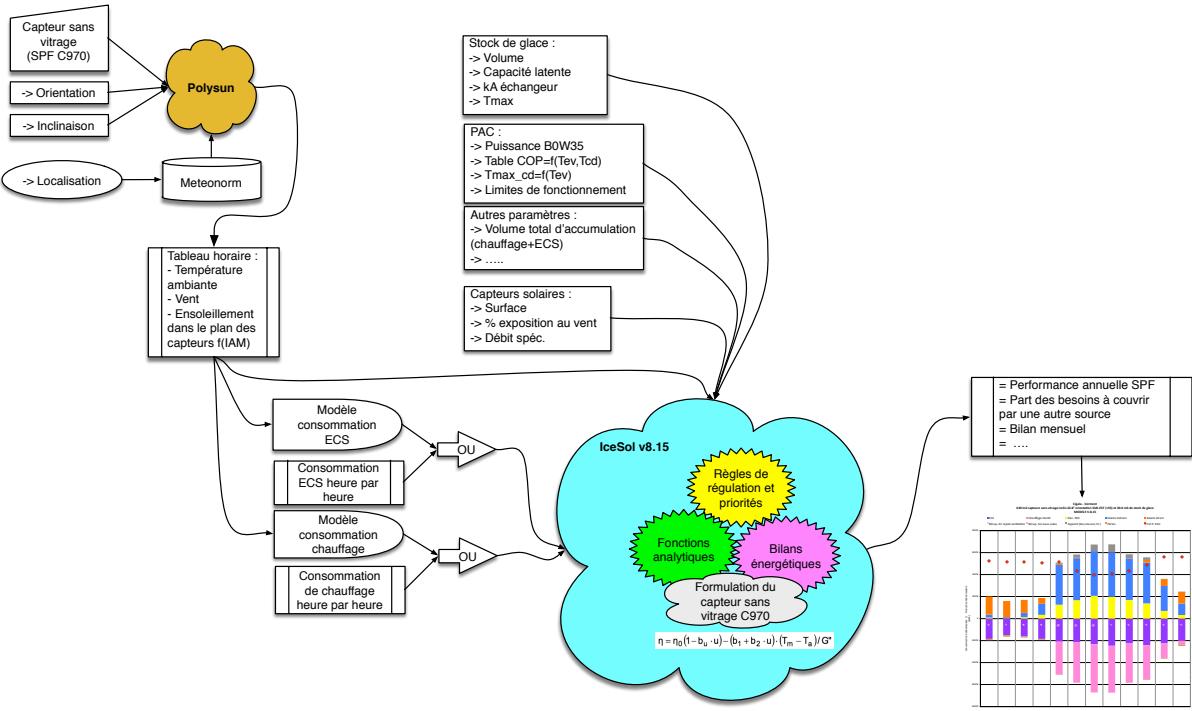
Le schéma illustré ci-contre est un des seuls qui fournit un résultat certes optimiste mais surtout dans un délai plausible d'environ 20 minutes. Les autres schémas ne fournissent que des résultats partiels et toujours optimistes après des heures de calcul.



3.9.2 Modèle Excel

Un modèle de simulation du système de production de chaleur „IceSol“ a été développé par Energie Solaire SA dès 2011 afin de pouvoir dimensionner et optimiser les différents composants de son système. Il décrit de manière simplifiée les caractéristiques des composants principaux, il intègre leurs lois de comportement ainsi que le principe général de la régulation.

Implémenté sous la forme d'un tableur Excel, il effectue un calcul du système heure par heure et permet de fournir extrêmement rapidement la performance prévisible d'une configuration donnée. Il est donc facile de réaliser une analyse de sensibilité pour optimiser les surfaces de captage et les volumes d'accumulation sensible et latent.



3.9.3 Calage selon résultats de la 2ème année

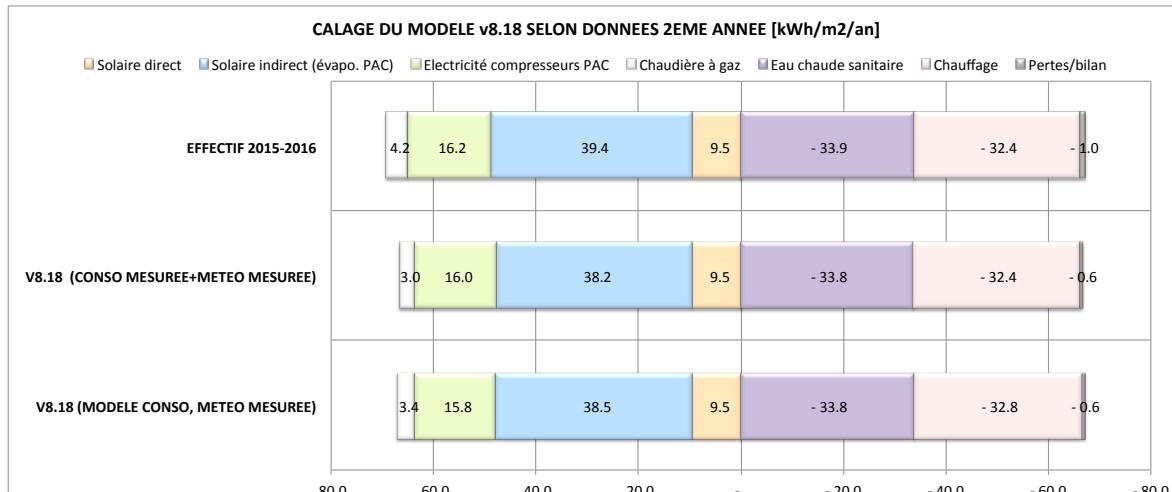
Dans le but de valider le modèle Excel « IceSol v8.18 » l'Université de Genève à fournit la base de données nécessaire sur une année du 1.6.2015 au 31.5.2016 comprenant :

- Les données météo horaires enregistrées par la station météo « Prairie »
- Les mesures horaires de consommation d'eau chaude sanitaire et de chauffage, complétées par les températures aller-retour, enregistrées dans la chufferie du bâtiment de Vermont

La base météo a été importée dans le logiciel Polysun de manière à recalculer le rayonnement global dans le plan des capteurs et intégrant l'IAM (Incidence Angle Modifier) propre au capteur sélectif sans vitrage installé en toiture du bâtiment (Toiture Solaire AS – C970) et à l'importer dans le modèle « IceSol v8.18 ».

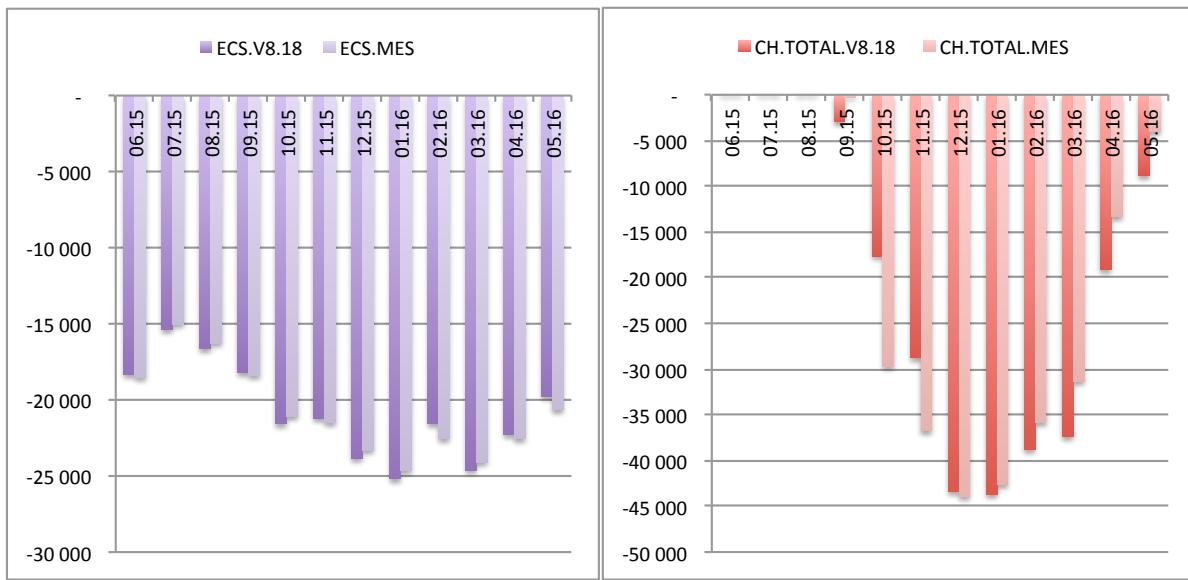
Les valeurs des surfaces de capteurs, des volumes de stockage sensible et latent ainsi que les caractéristiques des pompes à chaleur installées ont été introduites.

Le diagramme ci-dessous fournit les valeurs annuelles de production effectives (valeurs brutes) et simulées selon deux variantes. La 1^{ère} utilise les mesures des consommations effectives et la 2^{ème} le modèle simplifié de consommation, comprenant un profil journalier et mensuel pour l'eau chaude et un modèle linéaire pour le chauffage.



3.9.3.1 Consommations

Les graphiques ci-dessous donnent les consommations mensuelles (en kWh/mois) du modèle v8.18 comparées aux mesures effectives. Pour l'eau chaude sanitaire la concordance est excellente le profil adopté étant basé sur l'analyse des mesures. En revanche pour le chauffage on peut remarquer que



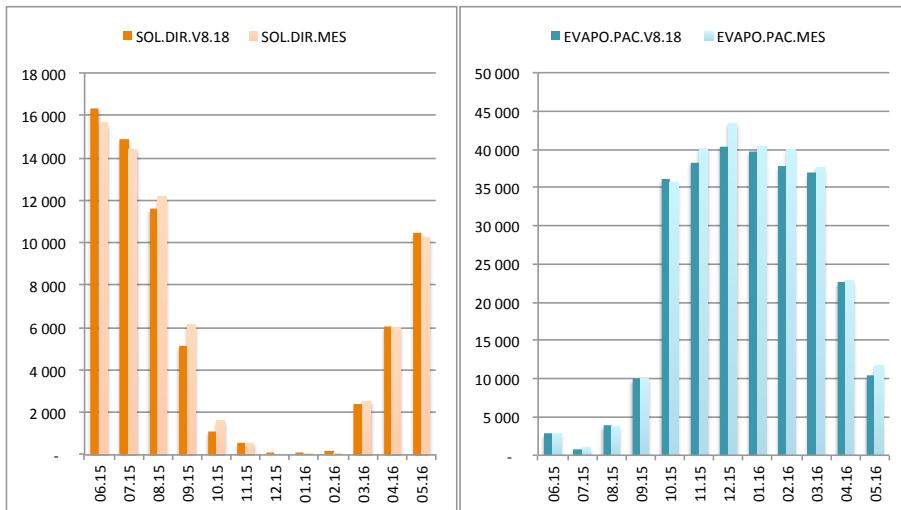
le modèle (16 W/m² pour une température extérieure de -5°C) sous-estime la consommation en début de saison de chauffe et qu'il la surestime en fin de saison. En septembre l'explication est simple le chauffage étant en réalité manuellement coupé. En octobre et novembre le fonctionnement anormal de la ventilation double-flux, réglé en décembre, peut expliquer la différence. De février à mai, le modèle étant calé pour obtenir un bilan annuel identique il s'agit donc de la compensation du début de saison de chauffage. Pour prévoir le comportement de la nouvelle saison de chauffage 2016-2017 il faudra donc diminuer la pente du modèle linéaire.

3.9.3.2 Production

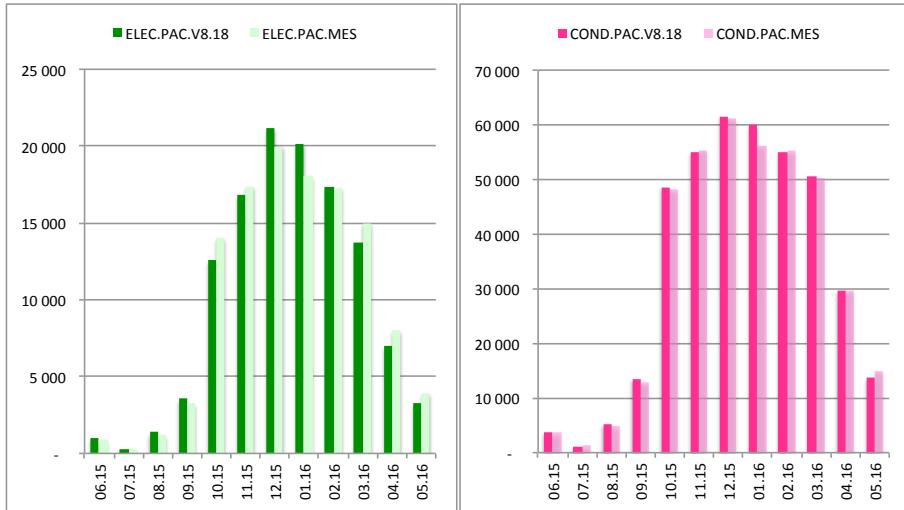
Les écarts sont très faibles, inférieurs à 2%. La légère différence par rapport à la chaudière s'explique par l'apparition de la neige mi-janvier 2016 comme démontré plus loin dans ce chapitre.

Les graphiques suivants illustrent les résultats mensuels fournis par le modèle comparés aux mesures effectives (en kWh/mois).

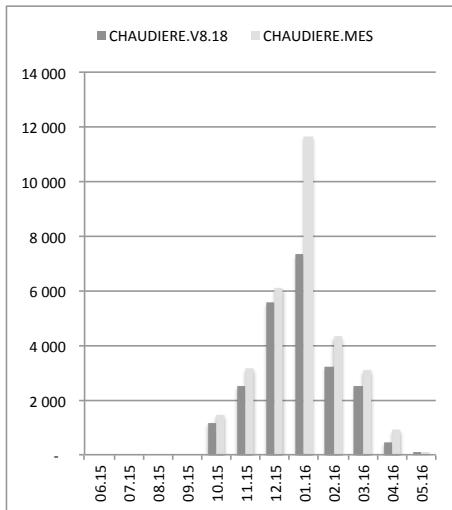
La concordance pour le solaire « direct » et le « solaire indirect » (évaporateur PAC) est bonne.



Elle l'est également pour la pompe à chaleur.



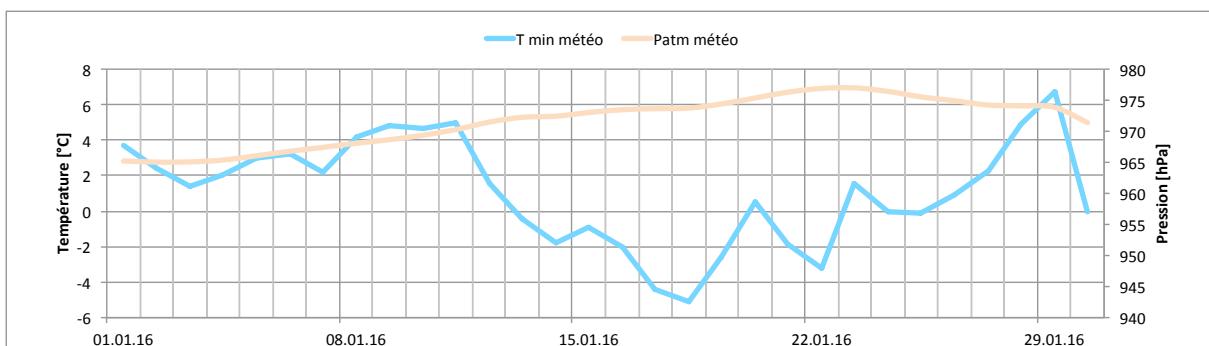
Pour la chaudière les valeurs sont comparables sauf au mois de janvier.



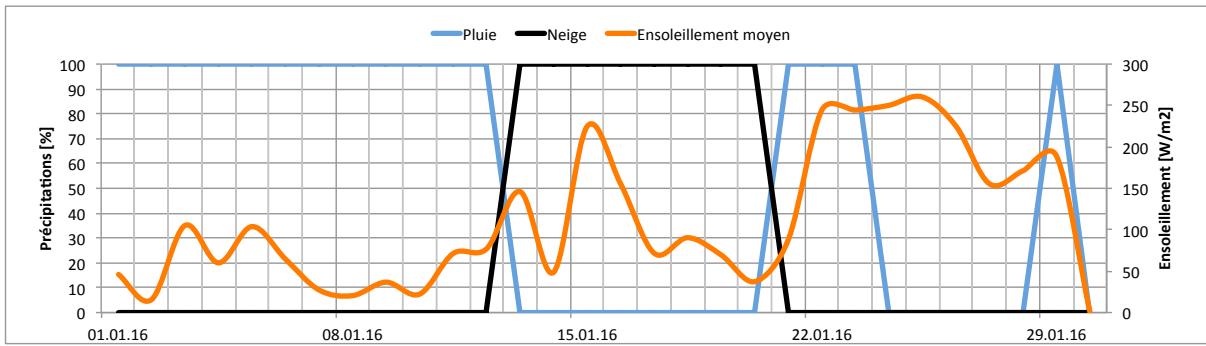
Une explication plausible par rapport à la consommation de la chaudière plus grande en janvier que la simulation est très certainement l'effet de la neige sur les capteurs. Cette donnée ne figure pas dans les fichiers météo disponibles. Une couche de neige fraîche, même que de quelques centimètres d'épaisseur, réduit la capacité d'échange des capteurs sans vitrage.

Les graphiques ci-dessous montrent la réaction de l'installation réelle lors des chutes de neige de mi-janvier 2016.

La température extérieure minimale, assez douce au début, baisse rapidement pour atteindre une température négative :

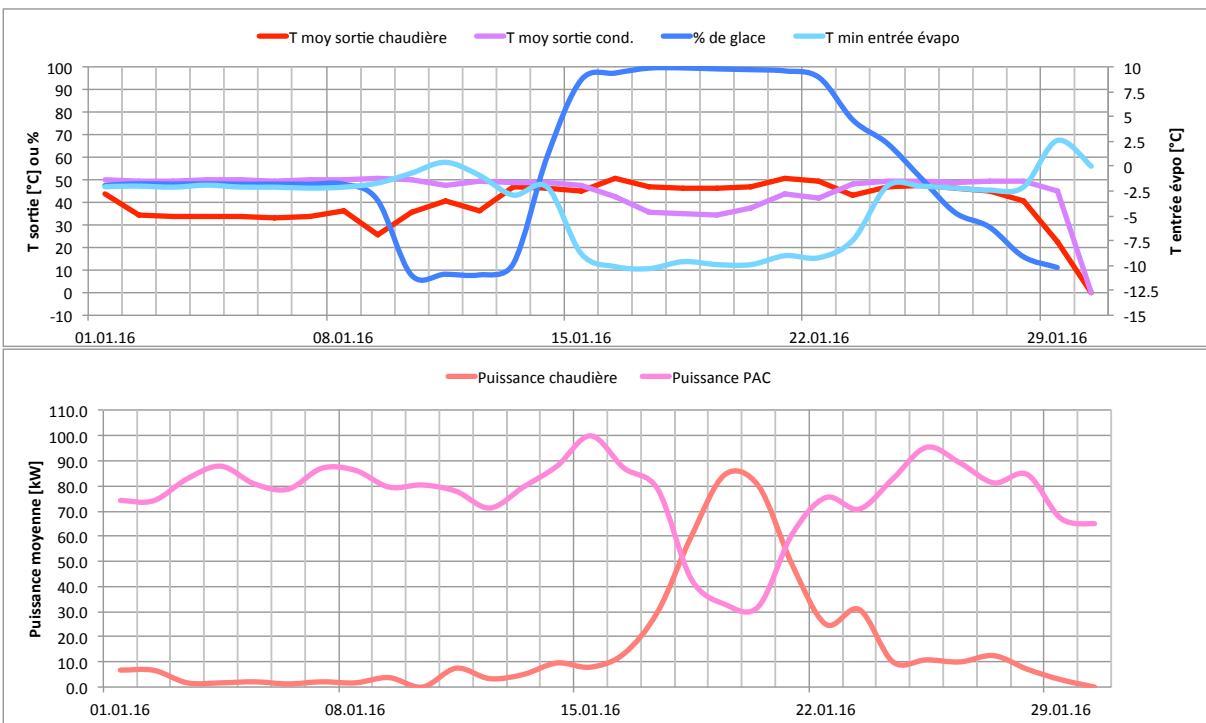


Les précipitations sous forme de pluie se transforment en neige :



Le niveau de glace varie entre 50% et 10% au début de la période grâce à une température extérieure douce mais sans soleil puis augmente rapidement lors de la baisse de température pour atteindre 100%. A ce moment le stock latent est « by-passé » et les capteurs sont connectés en direct aux évaporateurs. La neige engendre une baisse de puissance captée et la température entrée évaporateur atteint rapidement la limite de fonctionnement de -9°C.

La température de sortie condenseur et la puissance de la PAC baissent et la chaudière doit être libérée pour assurer la disponibilité de l'eau chaude sanitaire et en partie du chauffage.



3.9.4 Réaction du système « IceSol » aux variations de consommation et de météo

Le modèle complet étant validé, il est maintenant intéressant de remplacer les données météo effectives par d'autres jeux de dimensionnement standards comme ceux de la norme SIA 2028 (DRY pour Design Reference Year) et de varier les niveaux de consommation d'eau chaude et de chauffage de manière à tester la réaction du système de production de chaleur.

Les valeurs de référence de consommation du projet initial ont été reprises :

Valeurs nominales (NOM) :
<i>Eau chaude sanitaire = 30% de plus que la norme (75 MJ/m²/an * 1.3 = 97.5 MJ/m²/an) soit 27.1 kWh/m²/an comme mesuré avant la rénovation</i>
<i>Chauffage : une température ambiante de 21°C soit environ 14% de moins que les consommations actuelles permettant 23°C de température ambiante</i>
Valeurs dimensionnement (DIM) :
<i>Eau chaude sanitaire = 10% de plus que NOM (75 MJ/m²/an * 1.3 * 1.1 = 107.3 MJ/m²/an) soit 29.8 kWh/m²/an</i>
<i>Chauffage : une température ambiante de 22°C soit environ 7% de moins que les consommations actuelles permettant 23°C de température ambiante</i>

Le tableau ci-dessous résume les conditions météo SIA comparées à celles de la 2^{ème} année de mesure (1.6.2015-31.5.2016).

Donnée	Unité	Réf. 2015-2016	SIA 2028 Année moyenne	SIA 2028 Année froide	SIA 2028 Année chaude
<i>Temp. Minimum</i>	°C	-3.3	-9.7	-18.2	-3.4
<i>Temp. Moyenne</i>	°C	12.7	10.9	7.8	13.9
<i>Temp. Maximale</i>	°C	37.5	34.7	33.5	36.9
<i>Ensoleillement global horizontal</i>	kWh/m ²	1313	1156	1093	1305
<i>DJ21/15 (NOM)</i>	K.j	3054	3526	4561	2632

Il faut relever que le nombre de degrés-jours indiqué est basé sur une température ambiante dans les appartements de 21°C correspondant à la valeur nominale cible. Si la température effective est plus élevée (22°C pour DIM et 23°C actuellement) le nombre de DJ augmente de manière significative (entre 6 et 8% par degré) et influence directement la consommation de chauffage !

Les données météo SIA d'une année chaude n'ont pas été prises en compte car elles ne sont pertinentes pour analyser un système de production de chaleur.

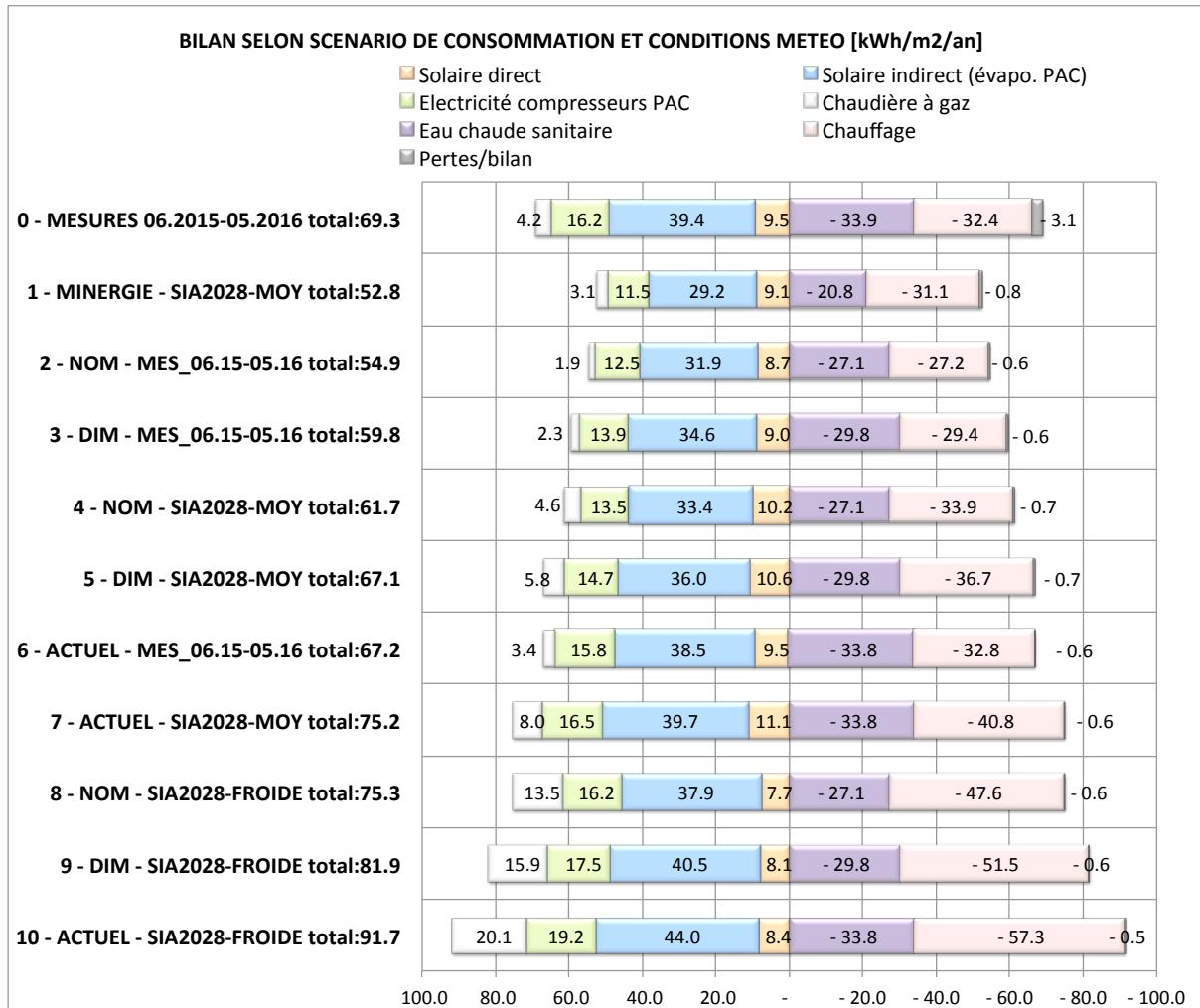
Il est également important de comprendre que les données météo SIA d'une année froide résultent de l'assemblage des périodes mensuelles les plus froides observées entre 1984 et 2003 et qu'elles ne servent normalement qu'à des analyses de risques.

Il donc important pour l'interprétation des résultats de considérer que les valeurs de dimensionnement d'un point de vue météorologique sont celles d'une année moyenne SIA2028 !

Dix scénarios ont été considérés et exploitent quatre comportements types de consommation (basées sur le bâtiment de Vermont) et trois jeux de données météo. L'objectif est d'évaluer la sensibilité du système de production de chaleur à la consommation et aux conditions météo. Le cas « favorable » est constitué du scénario 1 qui réduit fortement la consommation (standard Minergie) avec une météo moyenne. Le cas « défavorable » donne le résultat probable si la consommation type n'évolue pas et reste au niveau actuel (surconsommation d'ECS et température souhaitée de 23°C dans les appartements) et que la météo correspond à une année extrêmement froide mais pas réaliste...

Scénario n°	Type de consommation	Données météos
« 0 - MESURES 06.2015-05.2016 »	Effective 2015-2016	Effective 2015-2016
« 1 - MINERGIE - SIA2028-MOY »	Base Minergie	SIA2028 année moyenne
« 2 - NOM - MES_06.15-05.16 »	Valeurs NOMinales	Effective 2015-2016
« 3 - DIM - MES_06.15-05.16 »	Valeurs DIMensionnement	Effective 2015-2016
« 4 - NOM - SIA2028-MOY »	Valeurs NOMinales	SIA2028 année moyenne
« 5 - DIM - SIA2028-MOY »	Valeurs DIMensionnement	SIA2028 année moyenne
« 6 - ACTUEL - MES_06.15-05.16 »	Comportement actuel	Effective 2015-2016
« 7 - ACTUEL - SIA2028-MOY »	Comportement actuel	SIA2028 année moyenne
« 8 - NOM - SIA2028-FROIDE »	Valeurs NOMinales	SIA2028 année froide
« 9 - DIM - SIA2028-FROIDE »	Valeurs DIMensionnement	SIA2028 année froide
« 10 - ACTUEL - SIA2028-FROIDE »	Comportement actuel	SIA2028 année froide

Le résultat est sous forme de bilan annuel classés par quantité d'énergie croissante est le suivant.



De manière générale on remarque une dispersion assez importante des résultats. Seule la production « solaire-direct » est pratiquement stable car elle dépend majoritairement de la consommation d'eau chaude sanitaire.

Le résultat du modèle avec comportement actuel et météo effective 2015-2016 se situe en 6^{ème} position malgré des conditions climatiques favorables par rapport à celles d'une année SIA moyenne. Cela s'explique par la surconsommation d'ECS à Vermont et les températures ambiantes très élevées.

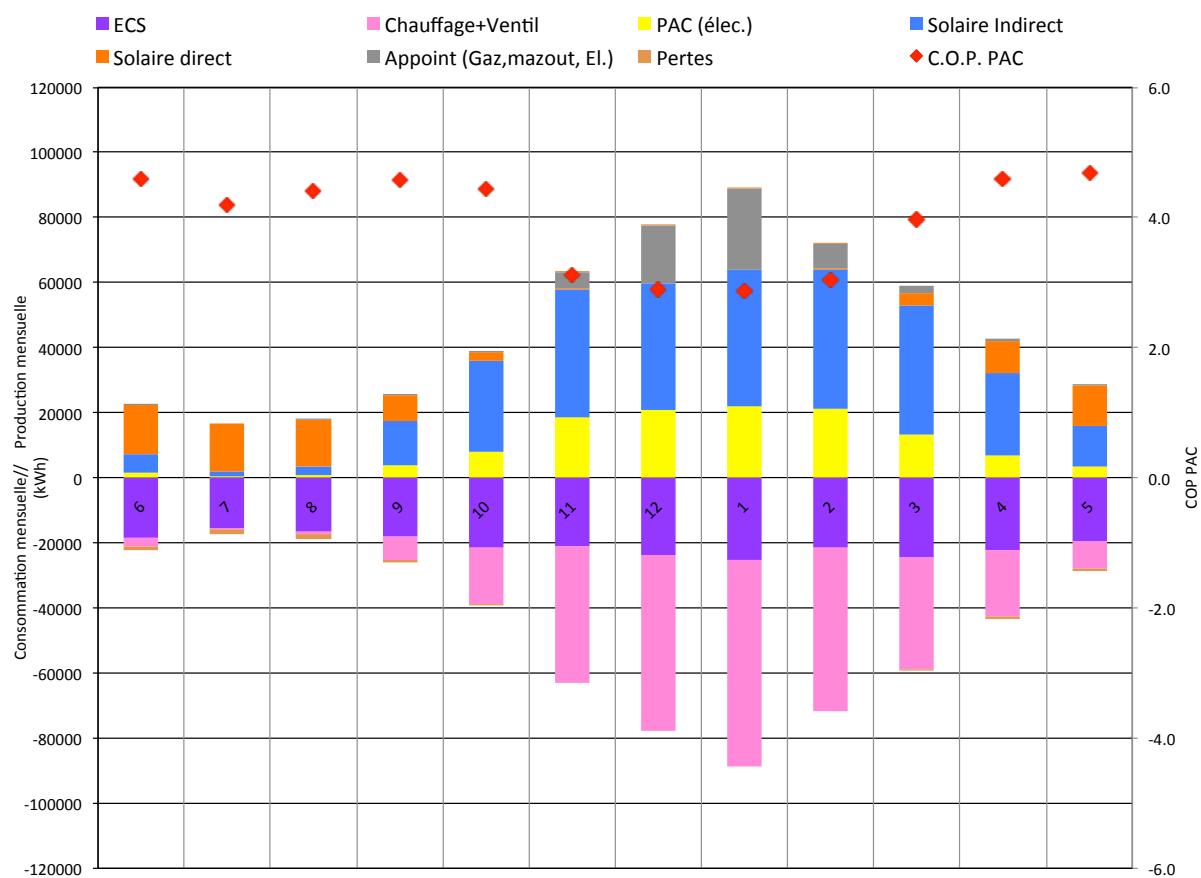
Le résultat prévisible du scénario n°5, si les niveaux de consommation se réduisent pour rejoindre les valeurs de dimensionnement, serait très proche malgré une météo plus sévère en hiver (SIA moyenne).

Le chemin pour atteindre le scénario n°1, avec les valeurs Minergie est encore long et probablement impossible car il nécessiterait de réduire la consommation d'ECS de 38%, sans avoir de solution, et de baisser les températures ambiantes de 2 à 3°C de façon à réduire la consommation de chauffage de 24%.

Les résultats 8,9 et 10, avec météo extrême (SIA froide), sont bien évidemment en dernière position. La contribution de la chaudière à gaz augmente de manière très importante pour la simple raison que la puissance totale nécessaire dépasse celle des pompes à chaleur installées et que par moment la température extérieure est plus basse que celle de sortie des évaporateurs. Les pompes à chaleur doivent ainsi être arrêtées ! Le système de production devient alors bivalent ce qui n'est pas l'objectif initial du projet et la puissance requise dépasse dans certaines périodes celle installée de la chaudière à gaz.

Le scénario 7 est le plus pertinent car il décrit la performance du système « IceSol » s'il doit satisfaire les niveaux de consommation actuels mais avec un hiver sévère mais plausible (SIA2028 moyenne). Il est intéressant de relever que la consommation totale de ce scénario n'augmente que de 9% par rapport au scénario effectif et que la part théorique à couvrir par la chaudière à gaz (sans compter les effets de la neige) passerait de 3.4 à 8.0 kWh/m² soit légèrement plus que 10% du total de l'énergie produite. Cette augmentation provient du fait que la puissance maximale nécessaire pour le chauffage dépasse la valeur de dimensionnement et que les pompes à chaleur ne suffisent plus pendant les quelques jours de froid extrême. On observe cette saturation des PAC sur le résultat mensuel ci-dessous.

7 - MODELE v8.18 - ACTUEL + METEO SIA2028 ANNEE MOYENNE



L'utilisation d'un modèle de simulation pour le dimensionnement d'un système de type « IceSol » est dans tous les cas nécessaire pour vérifier lors des phases de projet que les composants principaux sont adéquats. Le modèle permet en outre d'évaluer, de manière finalement assez précise, la part des besoins à couvrir par une autre source de chaleur pour autant que la réalisation soit faite dans les règles de l'art.

4 Collaboration nationale, internationale et communication

La coopération étroite entre les partenaires de La Cigale depuis le début du projet de rénovation Minergie-P a été l'un des facteurs de succès. Les mêmes partenaires sont restés soudés et réunis dans l'objectif d'améliorer la performance énergétique tout au long des deux ans du projet P&D ce qui a fortement contribué à la réussite de ce dernier. Dans la partie communication du projet phare, des conférences ont été réalisées au niveau national et international, des nombreux articles ont été publiés dans la presse spécialisée, des participations aux divers concours ont été couronnées de succès, des événements et des visites guidées ont été organisées, des formations ont été réalisées, les résidents ont été sensibilisés et des supports électroniques, comme un site web et des films ainsi que divers supports classiques ont été mis à disposition. Grace à ce travail énorme, le projet La Cigale est devenu une référence et un modèle à suivre dans toute la Suisse et au-delà des frontières. Le système de chauffage novateur IceSol a été depuis intégré dans de nombreux autres projets qui ont été déjà réalisé ou vont être réalisés dans un avenir proche.

4.1 Collaborations nationales

4.1.1 François Baud & Thomas Früh Atelier d'Architecture SA

François Baud & Thomas Früh Atelier d'Architecture SA est un cabinet d'architectes avec 8 employés au centre de Genève, qui s'est spécialisé dans les bâtiments et les rénovations écologiques et efficientes. En tant qu'architecte de la rénovation Minergie-P de La Cigale, François Baud est l'un des acteurs à l'origine du projet et un des moteurs de sa concrétisation. Dans le cadre du projet P&D il s'est beaucoup impliqué dans les visites, la rédaction des articles et la réponse aux concours. Il a également fait des présentations du projet lors de conférences. Le bureau d'architecture Baud & Früh a mérité une grande éloge pour son projet audacieux, son excellent travail et son soutien dans le cadre du projet phare.

4.1.2 Groupe Energie, Université de Genève

Le Groupe Systèmes Energétiques de l'Université de Genève réalise des recherches interdisciplinaires sur les systèmes et les filières énergétiques, dans une perspective de maîtrise de la demande, d'amélioration de l'efficacité énergétique et d'intégration des énergies renouvelables. La spécificité du Groupe consiste en une approche par problèmes, fondée sur des évaluations complètes et fouillées de systèmes énergétiques innovants, en situation réelle, c'est-à-dire mis en œuvre dans le cadre de l'organisation traditionnelle de la construction et de la gestion énergétique.

Dans le cadre des immeubles « La Cigale », le Groupe Systèmes Energétiques de l'Université de Genève a pris en charge l'analyse énergétique des installations de production de chaleur, dans l'objectif d'établir le bilan énergétique intégral des installations sur une année complète de fonctionnement, et l'analyse fine du fonctionnement des sous-systèmes.

Pour l'Université de Genève, cette étude s'inscrit dans le cadre d'un ensemble de retours d'expériences concernant des installations intégrant des pompes à chaleur, en régime mono ou pluri-valent, avec diverses ressources (air, solaire, géothermie, eau du lac), pour divers usages (résidentiel, administratif) et diverses tailles de preneurs (immeuble, complexe immobilier, quartier). Le retour d'expérience sur les immeubles « La Cigale » contribue ainsi à générer une base de connaissances des pratiques et des réalités dans le domaine de l'utilisation des pompes à chaleur dans le système énergétique.

Cette étude est également en lien avec le projet de recherche « COMPARE-RENOVE », financé par l'OFEN, dans lequel est effectué un benchmark de plusieurs opérations de rénovation énergétique sur des immeubles résidentiels collectifs.

L'UNIGE a été un partenaire précieux et a participé activement au groupe des acteurs du projet P&D. Avec le matériel mis à disposition et sa participation aux séances multiples, très rapprochées, elle a

fourni des prestations au-delà du mandat initial.

4.1.3 Services Industriels de Genève (SIG)

Les Services Industriels de Genève (SIG) sont une entreprise autonome de droit public placée sous la surveillance du Conseil d'Etat du canton de Genève depuis 1973. La mission de ses 1'700 collaborateurs consiste à produire et à distribuer de l'eau, du gaz, de l'électricité et de l'énergie thermique à la population du Canton de Genève, ainsi que d'assurer la mise à disposition d'un réseau de fibres optiques et de réaliser le traitement de déchets. Un de ses piliers fondamentaux et stratégiques est le développement durable au sein de l'entreprise et comme soutiens pour ses clients. La Coopérative La Cigale a mandaté les SIG pour s'assurer que le livrable soit en tout point conforme au concept énergétique ainsi de suivre et participer aux démarches de l'optimisation de la performance énergétique des deux bâtiments. Les SIG ont été un partenaire précieux tout au long du projet P&D. Ses services ont été intégralement payés par la Coopérative La Cigale.

4.1.4 BG Ingénieurs conseils

Le groupe BG est une société d'ingénieurs conseils d'envergure internationale. Fondé en 1954, il opère en Suisse, en France, en Algérie, et accompagne ses clients partout dans le monde. Le groupe BG compte actuellement environ 650 collaborateurs répartis dans 21 agences et possède une longue expérience dans les projets complexes et d'envergure. En tant que bureau d'ingénieur du projet La Cigale, BG était depuis le début l'un des partenaires. Dans le cadre du projet P&D, BG a suivi l'évolution des améliorations techniques de l'installation.

4.1.5 Signa Terre

Signa Terre est une entreprise qui accompagne ses clients dans les projets d'économie d'énergie dans le domaine du bâtiment. De la stratégie à l'audit, de l'étude au conseil, Signa Terre s'engage en faveur de la gestion durable immobilière pour la création de valeur. Depuis le début du projet La Cigale, Signa Terre fait partie des partenaires du projet et a aussi contribué de manière active au projet P&D.

4.1.6 A. Desplats SA et Econowatt SA

Dans le cadre du projet La Cigale, l'entreprise Desplats a réalisé les installations techniques de la chaufferie des deux bâtiments. Sa société Econowatt s'occupe de la maintenance des équipements. Le responsable des interventions a participé fréquemment aux séances techniques du projet P&D et a réalisé de manière efficace et professionnelle les modifications techniques.

4.1.7 Thébaud + Perritaz SA

L'entreprise Thiébaud + Perritaz SA a été créée en 1964 à Genève dans le but de réaliser des études, d'effectuer des installations et d'entretenir les équipements. Avec ses 22 employés, elle est spécialisée dans les domaines de la ventilation, de la climatisation et du rafraîchissement.

Thiébaud + Perritaz était un partenaire précieux dans le cadre du projet P&D. Comme la ventilation double flux a une grande influence sur la consommation de chauffage de La Cigale, l'approche coordonnée a été bénéfique pour ce projet.

4.1.8 SPS Institut für Solartechnik:

L'Institut für Solartechnik SPF est un institut de l'Université des Sciences Appliquées HSR à Rapperswil. Depuis 1981 il s'occupe avec ses 30 employés de tous les aspects techniques des systèmes basés sur l'énergie solaire. Ceci englobe des essais des matériaux, des composants, de stockage, des collecteurs et des sous-systèmes. Le SPF est très impliqués dans les projets nationaux et internationaux de recherche appliquée.

Dans le cadre du P&D et en collaboration avec Energie Solaire SA, le SPF a participé activement au développement et aux premiers tests du nouveau stock de glace pour le système IceSol (voir la sec-

tion 5.1.3).

4.2 Collaborations internationales

Le projet La Cigale a été présenté en novembre dernier à l'atelier Build&Connect 2016 à Strasbourg, cette présentation a été accueillie avec beaucoup de succès.

4.3 Communication

Dans le domaine du bâtiment les décisions prennent généralement beaucoup de temps et les solutions techniques innovantes ne sont utilisées que très timidement. Ceci est principalement causé par l'objet de la construction lui-même. Un bâtiment a un cycle de vie très long (notamment en Suisse) avec une longue phase d'avant-projet, qui peut durer plusieurs années. Les acteurs dans le domaine du bâtiment ne veulent prendre aucun risque et préfèrent souvent, aussi à cause des aspects financiers, garder des techniques éprouvées. Pour positionner une nouvelle technologie comme le système de chauffage IceSol, il faut beaucoup d'efforts, de la persévérance et une communication ciblée.

4.3.1 Les groupes cibles

Dans le secteur de la construction, un grand nombre de groupes cibles doit être convaincu afin de positionner un nouveau système de chauffage comme l'IceSol dans des projets d'envergure.

- **Les clients privés et institutionnels:** En Suisse, la majorité des bâtiments résidentiels appartient à des fonds immobiliers et à des constructeurs privés. Les grands projets sont généralement réalisés par des entreprises générales avec un cahier des charges bien précis et des appels d'offres. Souvent, les maîtres d'ouvrages sont accompagnés d'un conseiller professionnel qui rédige les concours, les cahiers de charges et aide au choix des solutions et partenaires. Même si les aspects financiers sont toujours dominants, la plupart des maîtres d'ouvrages sont intéressés à intégrer des solutions de chauffages écologiques dans leur projets d'ouvrages.
- **Architectes:** Les architectes ont la conviction de réaliser des projets futuristes en termes de design et techniques de bâtiments. Ils sont souvent ouverts à de nouvelles solutions techniques, à condition qu'elles aient été approuvées par le bureau d'ingénieur. Ils sont souvent la source d'inspiration pour les maîtres d'ouvrages et les bureaux d'ingénieurs. Les architectes ont une vue globale du bâtiment et se fient à des spécialistes pour les détails techniques.
- **Bureaux d'ingénieurs:** Les bureaux d'ingénieurs sont des partenaires incontournables pour l'intégration d'un nouveau système de chauffage dans un projet de construction. Bien que le bureau d'ingénieur préfère souvent utiliser une technologie existante pour prévenir des risques, il est toujours à l'écoute de nouveautés techniques. Cependant, avant d'utiliser une nouvelle technique, sa pertinence doit être mise à l'épreuve. Energie Solaire SA avait déjà testé son nouveau système de chauffage dans des maisons individuelles et développé un modèle de simulation avant de le proposer pour un grand projet comme La Cigale. (cf. Projet OFEN N° SI/500'481 – Chauffage par pompe à chaleur solaire avec des capteurs sélectifs non vitrés et accumulateur à changement de phase – rapport final 2012). Ceci a donné confiance au bureau d'ingénieur.
- **Entreprises générales:** Dans le cadre des concours et avant-projets les entreprises générales sont souvent intéressées par des solutions techniques innovantes et écologiques pour se différencier de la concurrence non seulement en termes de prix. Malheureusement quand le projet en question passe en phase de réalisation, les réductions budgétaires sont souvent fatales à ces systèmes de chauffage.
- **Contracteurs en énergie:** Les entreprises proposant du contracting en énergie sont de plus en plus présentes dans les nouveaux projets de construction ou de rénovation majeurs. L'investisseur peut ainsi réduire ses coûts d'investissement et se facilite la vie pour l'exploitation de son immeuble. Le contracteur, la plupart du temps une entreprise de production ou de distribution d'électricité, installe, exploite et facture les coûts d'énergie directement au locataire.

Les contracteurs sont très ouverts aux systèmes de chauffage écologiques et économiques.

- **Installateurs en chauffage:** Les installateurs en chauffage sont des partenaires importants dans la phase de réalisation et d'installation pour garantir un bon fonctionnement du système de chauffage. Le diable se loge dans le détail; des petites inattentions techniques peuvent avoir un effet important sur les performances du système.
- **Autorités politiques:** Les autorités politiques ont un levier non négligeable avec les subventions pour pousser l'utilisation des énergies renouvelables. Dans le cadre du projet de la Cigale, le système IceSol a été officiellement « homologué », le 16 février 2015 par l'agence Minergie à Fribourg.
- **Haute écoles et universités:** Dans le domaine du bâtiment il est important d'avoir une formation appliquée et pour les entreprises de production de confronter les nouveaux systèmes avec le monde plus théorique. L'échange est bénéfique pour les deux parties. Dans le cadre du projet P&D le système IceSol a pu être débattu en détail avec l'UNIGE, HSLU à Lucerne et HEIG à Yverdon-les-Bains.
- **Grand public :** Le grand public crée souvent des nouvelles tendances selon ce qui s'est passé dans le secteur du bâtiment concernant l'utilisation des énergies renouvelables. Avec le référendum, la population en Suisse a un bon outil afin de pousser le secteur de construction vers une consommation énergétique plus raisonnable et propre. Les tendances et nouvelles réglementations sont ensuite prises en considérations dans les nouveaux projets par des architectes et bureaux d'ingénieurs. Dans le cadre du projet P&D le projet « La Cigale » a été présenté lors d'un débat public organisé par la ville de Lausanne et l'Ambassade de France lors de la préparation de COP21 à Paris.

Tous ces groupes cibles ont besoin d'informations spécifiques et personnalisées afin de leur permettre d'évaluer un nouveau système de chauffage comme l'IceSol.

4.3.2 Les moyens de communications

En termes d'outils de communication, nous avons eu recours à la palette la plus large possible en développant aussi bien des supports plus classiques de type papier que des supports numériques.

4.3.2.1 Visites guidées de La Cigale

Les visites sur le site constituent un excellent moyen de communication, car nous pouvons faire découvrir *in situ* les parties du bâtiment qui ont été rénovées : chaufferie, enveloppe du bâtiment et loggias. Cela permet aux visiteurs de prendre la mesure de l'ampleur du projet et de bien saisir les spécificités techniques qui lui sont propres. Dans ce contexte, de nombreuses visites ont été organisées où plusieurs protagonistes du projet ont été présents pour faire visiter le site ainsi que les bâtiments et répondre à toutes les questions relatives à la rénovation et au fonctionnement du système de chauffage IceSol.

Tout au long des deux dernières années nous avons pu accueillir à la Cigale un grand nombre de groupes, des entreprises générales, des bureaux d'ingénieurs, des architectes, des propriétaires d'immeubles, des entreprises contractants de l'énergie, des installateurs et des étudiants. Voici un résumé des visites:

- 05.12.2014 : Visite de la Cigale dans le cadre d'un nouveau projet (MICA) avec le maître d'ouvrage Comptoir Immobilier, le contractants d'énergie ALPIQ et les bureaux d'ingénieurs Weinmann Energies, Pierre Chuard, CSD, Effin'art et Lead'Air.
- 27.01.2015 : Visite du Service de l'Energie de la Ville de Genève et du bureau d'ingénieurs suisse allemand Raumanzug.
- 22.05.2015 : Visite guidée de la Cigale par les étudiants de HEIG-VD dans le cadre de leur formation.
- 04.06.2015 : Visite guidée pour 60 personnes spécialisées dans le domaine du bâtiment dans le cadre d'une invitation personnalisée la veille de l'événement de la remise du « Prix du

Développement Durable du Canton de Genève ».

- 05.06.2015 : Remise du « Prix du Développement Durable du Canton de Genève ». Plus de 300 personnes, du monde politique, de l'économie, du secteur privé et de la presse ont participés à cet événement.
- 06.06.2015 : Visite du Forum Energie Zurich, représenté par environ 35 architectes, ingénieurs et entrepreneurs.
- 24.06.2015 : Visite de la société Alpiq InTec SA.
- 20.07.2015 : Visite des mandataires du projet quartier Concorde à Genève
- 09.02.2016 : Visite de la Fondation HBM
- 19.05.2016 : Visite de La Cigale avec le bureau d'ingénieur Enerlink pour un projet à Chênes Bougeries.
- 27.06.2016 : Visite de l'UNIGE Summer School dans le cadre d'une formation d'étudiants venant du monde entier. C'est la deuxième année de suite.
- 22.08.2016 : Visite du bureau d'ingénieur Amstein Walthert
- 04.11.2016 : Visite de la Cigale avec les étudiants en technique du bâtiment de l'HEPIA

4.3.2.2 Participation à des conférences

La participation à des conférences est un support important de la communication. Cela crée de la visibilité et des échanges autour du projet « La Cigale ».

La liste des conférences où nous avons pu présenter le projet « La Cigale » :

ER'14 Symposium sur l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et l'environnement dans le bâtiment qui s'est déroulé les 19 et 20 novembre 2014 à Yverdon-les-Bains. Cette manifestation se propose de passer en revue des exemples concrets de réalisations dans le domaine de la construction se focalisant sur l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et la qualité environnementale du bâtiment. Ceci dans l'objectif de relayer l'information auprès des professionnels de la construction, pour faire connaître, encourager et promouvoir des solutions existantes liées à l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et l'environnement, appliquées au domaine du bâtiment. Le public de ce Symposium ER regroupe de nombreux acteurs et personnalités du secteur du bâtiment de la Suisse romande. « La Cigale » a été évoquée via deux conférences données par les membres du projet de communication de « La Cigale »:

- M. Baud: « Rénovation Minergie-P en site occupé de treize immeubles d'habitation à Genève », le 19 novembre 2014.
- MM. Thissen (Energie Solaire SA) et Doppenberg (BG): « IceSol : concept pour un chauffage solaire innovant », le 20 novembre 2014.

Les propriétaires d'immeubles et coopérateurs sont susceptibles d'être intéressés au premier chef par le sujet de la rénovation durable. Nous avons fait une présentation de notre projet le 20 janvier 2015 au Groupement des Coopératives d'Habitation Genevoises (<http://gchg.ch/>). A cette occasion, environ 25 participants représentants de coopératives d'habitation étaient présents et un fort intérêt a été manifesté et de nombreuses questions ont été posées à l'issue de la présentation faite par M. Zanetta.

Le 26 février 2015 les SIG avaient organisé la journée Negawatt ECO21 à la Banque Mirabaud à Genève. Le projet « La Cigale » a été présenté par Energie Solaire SA.

Le Groupement professionnel suisse pour les pompes à chaleur GSP avait organisé le 10 mars 2015 la 3ème édition de la Journée professionnelle de la pompe à chaleur, JPPAC15, lors du Salon Habitat & Jardin à Lausanne, au Palais de Beaulieu. Le thème de cette édition était "Progrès techniques et législations". Energie Solaire SA a présenté pendant 30 min. le projet de « La Cigale » et son système de production de chaleur IceSol.

Le 5 juin 2015, le projet de la rénovation Minergie-P « La Cigale » a été le thème central, développé au cours de 3 conférences dans le cadre de la remise du « Prix du Développement Durable du Can-

ton de Genève ».

Le 6 juin 2015, le projet « La Cigale » a été présenté lors d'un débat public organisé par la ville de Lausanne et l'Ambassade de France dans le cadre de la préparation de COP21 à Paris.

Energie Solaire SA a été un des participants de l'atelier d'experts pour discuter les objectifs de la stratégie Cleantech, organisé par l'OFEN le 4 septembre 2015. C'était une excellente occasion de mettre en avant les innovations telles que le système IceSol de « La Cigale ».

Le 25 septembre 2015 le projet « La Cigale » a été présenté dans le cadre des rencontres du Management durable, co-organisée par le service du développement durable du canton de Genève et la CCIG.

Le 8 octobre 2015, l'atelier d'architecture Baud & Früh et Energie Solaire SA ont présenté le projet « La Cigale » et les résultats de la première année de fonctionnement aux Journées de l'Energie 2015 à Martigny devant plus de 400 invités.

Le 30 octobre 2015, Energie Solaire SA était un des orateurs au 4ème Congrès Chaleur Solaire Suisse organisé par Swissolar à Lucerne et a pu montrer ainsi les premiers résultats du projet « La Cigale ».

Lors du Eisspeicherworkshop du 13 novembre à Ittigen, organisés par l'OFEN, le système novateur IceSol a également été présenté et commenté.

De même, au cours de l'Industrieworkshop organisé par le SPF qui a eu lieu le 18 novembre 2015 à Rapperswil, Energie Solaire SA a eu le plaisir de présenter le projet de « La Cigale ».

Le 1 mars 2016, Energie Solaire était un des orateurs au Fachtagung Forum Energie Zürich avec plus de 150 participants du domaine du bâtiment afin de présenter les premiers résultats du projet.

Lors de la journée porte ouverte chez l'entreprise Renggli (fabricant des éléments d'enveloppe et toiture de La Cigale) du 15 mars 2016, Energie Solaire a eu l'occasion de présenter le système de chauffage IceSol et les premiers résultats.

Le 14 octobre 2016, Energie Solaire a présenté le projet La Cigale à la conférence ERFA organisé par Swiss Solar.

Le 22 novembre 2016 : François Baud a été un des orateurs et invité à la table ronde de la conférence « Build & Connect 2016 » : de l'efficacité énergétique aux bâtiments autonome à Strasbourg. Le projet La Cigale a trouvé un énorme succès à notre première conférence internationale.

4.3.2.3 Organisation d'événements

L'organisation d'événements autour du projet constitue également un axe de communication que nous privilégions. Cela est l'occasion de rassembler un public important sur les lieux mêmes de la rénovation menée. Le dernier événement organisé à la Cigale était la remise du « Prix du Développement Durable du Canton de Genève » le 5 juin 2015. La cérémonie a été un grand succès. Plus de 300 personnes, du monde politique, de l'économie, du secteur privé et de la presse ont participés à cet événement. Le projet de la rénovation Minergie-P « La Cigale » a été le thème central, développé au cours de 3 conférences et visualisé en détails dans les nombreuses visites. Les résultats de la première année de fonctionnement ont été présentés et nous encouragent à poursuivre nos efforts afin d'atteindre nos objectifs ambitieux. Notre ambition consistait à toucher la plus grande audience possible, pari gagné !

Le 4 juin 2015, à la veille de l'événement de la remise du « Prix du Développement Durable du Canton de Genève », nous avons pu exploiter au maximum l'infrastructure mise en place afin d'accueillir les experts du secteur de la construction pour une présentation technique du projet "La Cigale". Plus de 60 personnes spécialisées dans le domaine du bâtiment ont accepté notre invitation.

4.3.2.4 Publications dans la presse écrite

Grâce aux nombreuses présentations lors de conférences, visites du site et une communication ac-

tive, le projet La Cigale a été publié dans de nombreuses revues de la Suisse occidentale et alémanique au cours des 2 dernières années.

Trois dossiers de presse ont été envoyés. Une première fois, en juin 2014, lorsque le projet a gagné le Prix cantonal genevois du Développement Durable 2014. Dans un second temps, en octobre 2014 au moment où le projet a remporté le Prix Solaire suisse 2014. Un 3ème dossier de presse a été envoyé en juin lors de la co-organisation de la Cérémonie du Prix cantonal genevois du Développement Durable 2015.

Ces communiqués de presse ont été diffusés au sein de la presse nationale écrite, mais aussi auprès des radios ainsi que des chaînes de télévision.

Durant la première année nous avons obtenu la parution de 15 articles, soit un total d'une quarantaine de pages. Ceux-ci ont parus dans la presse nationale, romande aussi bien que suisse alémanique. Si certains articles ont repris des informations transmises par les communiqués de presse, la plupart ont été fait sur la base d'interviews des protagonistes de notre projet.

A noter que sur cette même période, nous avons fait parvenir deux communiqués de presse aux journalistes suisses (cf. annexe) au sujet de:

- « La Coopérative d'habitation « La Cigale » récompensée par le Prix cantonal du Développement Durable 2014 pour son projet de rénovation durable unique en Suisse. »
- « Le Prix Solaire Suisse 2014 récompense le projet romand « La Cigale » pour une rénovation durable unique en Suisse. »

Voici la revue de presse des articles publiés sur le projet de « La Cigale » (cf. annexe) :

- 01.12.2016: Schweizer Energiefachbuch 2017, article allemand, .
- 01.10.2016 : Haustech 10/2016, article allemand, Energiemengen durch gefrieren, 4 pages
- 16.06.2015 : Article de M. Thomas MADER, directeur Brolliet SA, dans le magasin « Bien Vivre » dont une partie concerne la mise en avant du projet.
- 01.03.2015 : Aqua & Gas, article allemand, Accumulateur de chaleur de glace, 5 pages.
- 01.12.2014 : Grand angle - Magazine SIG, La Cigale a de l'avenir, 2 pages.
- 24.11.2014 : Journal Tout l'immobilier, Le prix solaire suisse 2014 pour « La Cigale », 2 pages.
- 20.11.2014 : Agefi Immo, Prix Solaire Suisse 2014, 2 pages.
- 20.10.2014 : Office fédéral de l'énergie OFEN, Accumulateur de chaleur à glace
- 20.10.2014: BFE, Wärmespeicher aus Eis, 5 pages.
- 15.10.2014: Revue Wohnen, Gewagt und Gewonnen, 4 pages.
- 14.10.2004 : Côté Prestige, article Focus, 2 pages.
- 09.10.2014 : l'Hebdo, L'efficacité énergétique donne des couleurs aux barres des années 50, 1 page.
- 07.10.2014 : Tribune de Genève Immobilier, Le Prix Solaire Suisse à un projet genevois.
- 03.10.2014 : Solar Agentur, Minergie-P Renovation « La Cigale », 2 pages.
- 17.09.2014 : Revue Habitation, Minergie-P pour de grands immeubles-La Cigale a osé, 7 pages.
- 20.08.2014 : Magazine Edifice, La Cigale, un projet de rénovation énergétique unique en Suisse, 2 pages.
- 16.06.2014 : Journal Tout l'immobilier, La Cigale va chanter tout l'été, 2 pages.

4.3.2.5 Participation à des prix

Nous avons présenté le projet de La Cigale à de nombreux prix de cadre national et international. Sa participation a été couronnée à deux reprises :

- Prix Solaire Suisse 2014 : « La Cigale » lauréate de la catégorie Bâtiments/Rénovations
- Prix cantonal genevois du Développement Durable 2014 : « La Cigale » lauréate
- Participation au Prix Watt d'or 2014 et 2015
- Participation au Prix Solaire européen 2014
- Participation au Prix SIA Regard 2017

4.3.2.6 Films

Nous avons développé un film d'une durée de 5 minutes. Il a été tourné en langue française et est également disponible avec des sous-titres en français, allemand et anglais.

Il est disponible sur le site internet de notre projet : <http://renov-lacigale.ch/galerie/#film>. Et il peut également être visionné sur Youtube : <https://www.youtube.com/watch?v=tkSpRH6SCEI>

Tout comme notre site internet, il s'agit d'un support très efficace touchant un large public. En effet, il est accessible par tous, aussi bien en Suisse qu'à l'étranger.

Nous le présentons aussi dans le cadre des conférences données ou événements organisés.

L'OFEN a également réalisé un film sur le projet La Cigale, qui peut être visualisé sur le site officiel sous <http://www.bfe.admin.ch/cleantech/05761/06041/06336/index.html?lang=fr>.

4.3.2.7 Le site internet

Le site internet <http://renov-lacigale.ch/accueil/> dédié au projet a été développé en 3 langues afin de toucher un public national aussi bien qu'international : français, allemand et anglais. Nous considérons qu'il s'agit d'un de nos outils de communication les plus importants faisant office de carte de visite virtuelle pour notre projet. Ainsi, celui-ci a été conçu pour être consulté depuis tout type de support : PC, tablettes tactiles et smartphones. Par ailleurs, sa flexibilité nous permettra de revoir son architecture au fil du temps si cela s'avérait nécessaire.

Il comporte 6 onglets présentant l'intégralité de la rénovation. Un des onglets fournit des détails plus techniques et est plus particulièrement destiné aux spécialistes. Parallèlement, la page d'accueil propose une présentation résumée et vulgarisée. De plus, il est possible d'y visionner un film explicatif et didactique.

Notre site internet offre la possibilité à toute personne intéressée par le projet de La Cigale de nous contacter afin de pouvoir prendre des renseignements à son sujet. Nous avons d'ores et déjà reçu quelques demandes via ce biais.

Par ailleurs, nous actualisons constamment nos pages internet en les enrichissant avec tous les nouveaux articles parus au sujet du projet. Puis, nous créons des « splash pages » ou écrans d'accueil spécifiques lorsque nous souhaitons mettre en lumière un événement important ou une nouvelle particulière au sujet de « La Cigale ».

4.3.2.8 Brochures

En plus d'un site internet et d'un film, une brochure de 4 pages expliquant la genèse et la teneur du projet a été créée et nous disposons d'une version française et allemande.

Cette brochure est distribuée lors des conférences données ou des visites qui sont réalisées sur le site de « La Cigale ». Elle s'adresse à toutes nos cibles et est particulièrement appréciée par les journalistes également.

Actuellement, nous sommes en train de réaliser une autre brochure qui va illustrer les résultats du projet P&D.

4.3.2.9 *Formations*

L'ER'14 Symposium sur l'efficacité énergétique était aussi une excellente plateforme d'échange pour les étudiants de la HEIG-VD, organisateur de cet évènement. Suite à la présentation du projet « La Cigale » une visite à Genève du Prof. Da Riva avec ses étudiants a été organisée et réalisée le 22 mai 2015.

Le 9 octobre 2015 le projet « La Cigale » a été présenté au cours de Master HEG - Management durable.

5 Evaluation du système et perspectives

5.1 Choix et optimisation des composants du système « IceSol »

Le choix des composants principaux d'un système de production de chaleur de ce type est primordial si on veut atteindre la performance prévue. Les retours d'expérience des premiers systèmes en exploitation ont mis en évidence certains points sensibles qui sont résumés ci-dessous.

5.1.1 Pompes à chaleur

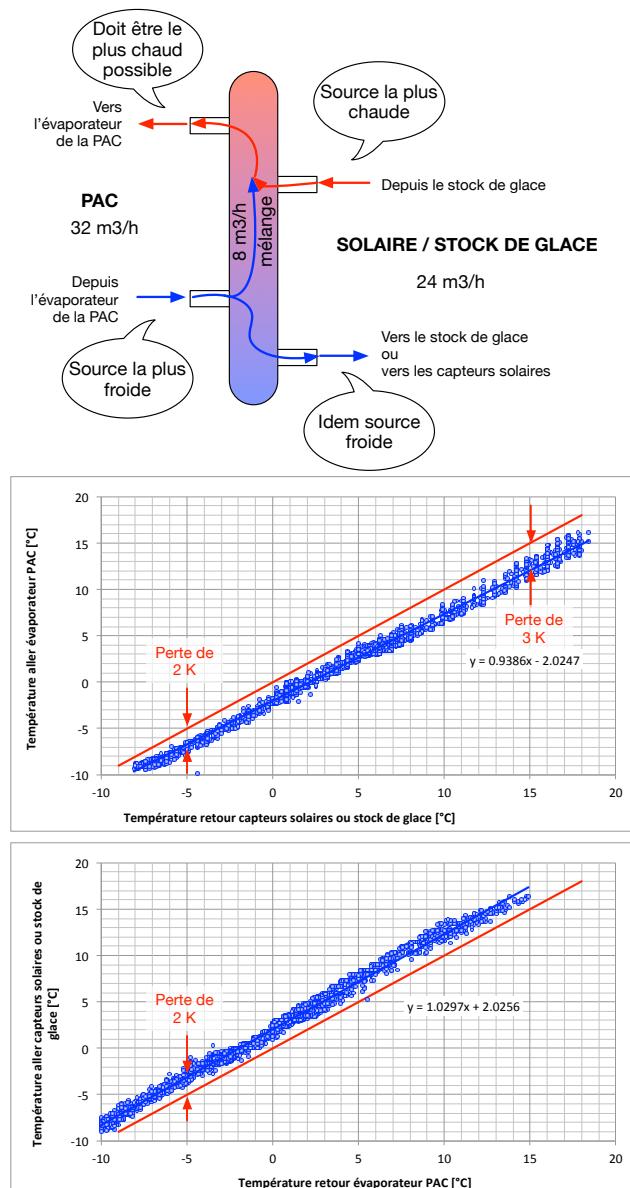
Le système de production de chaleur « IceSol » devant produire l'eau chaude sanitaire (ECS) qui représente une part de plus en plus grande du besoin total de chaleur et cela à une température élevée pour une pompe à chaleur (PAC), sa sélection est primordiale. De plus pour profiter pleinement de l'accumulateur à changement de phase (stock de glace) la PAC devrait être capable de produire totalement l'ECS avec une température d'entrée évaporateur négative (typiquement -2 à -4°C). Les machines installées à la Cigale ne peuvent fournir les +55°C nécessaires au condenseur que si la température d'entrée évaporateur est supérieure à +3°C. Ceci explique en partie le complément nécessaire par la chaudière à gaz pour atteindre 55°C.

5.1.2 Bouteille casse-pression (circuit solaire indirect) :

Les pompes à chaleur requièrent un débit quasi constant dans les évaporateurs et parfois supérieur à celui prévu dans les capteurs sans vitrage. Pour satisfaire cette contrainte la solution mise en œuvre est souvent une bouteille casse-pression permettant de découpler hydrauliquement les deux circuits.

Ce dispositif permet lorsqu'il est bien calculé de fournir la température la plus élevée possible aux PAC et la plus basse possible aux capteurs sans vitrage.

Une vérification de son fonctionnement indique hélas qu'il n'est pas optimal à la Cigale (les règles de base de dimensionnement n'ont pas été respectées). Il est le lieu d'un brassage important même lorsque les débits côté source et côté évaporateurs sont égaux. Ceci provoque une baisse de 2 à 3 K de la température fournie aux évaporateurs ce qui réduit leur performance et augmente la température aller vers les capteurs de 2 K diminuant sensiblement leur capacité d'échange en absence de soleil et par basse température météo. Le phénomène est illustré dans les graphiques ci-dessous dans lesquels la ligne rouge indique le cas idéal.

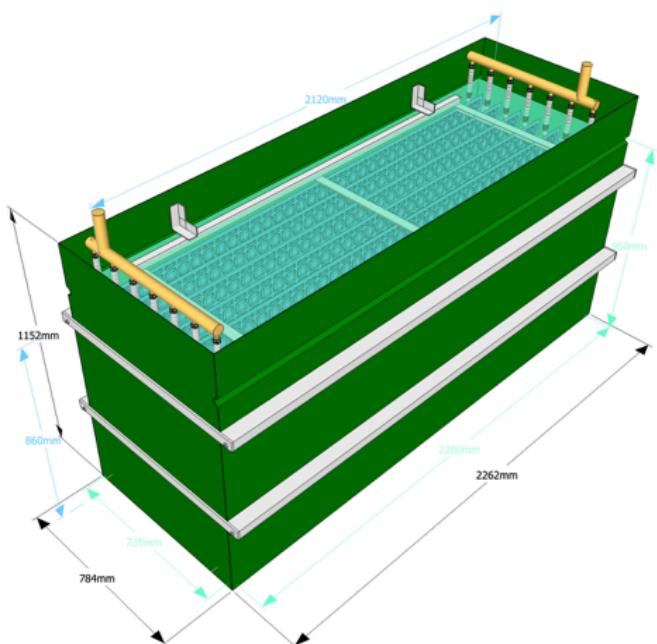


5.1.3 Accumulateur à changement de phase (eau-glace)

Les accumulateurs à changement de phase installés à la Cigale sont des appareils standards destinés habituellement à des installations de production d'eau glacée dans le but de pouvoir accumuler de l'énergie sous forme de glace la nuit et d'offrir une grande réserve de puissance frigorifique lors de leur décharge de jour. Ils ne sont donc pas forcément idéalement adaptés à un système de production de chaleur.

De plus leur échangeur interne en matière plastique, pas étanche à la diffusion d'oxygène, a rendu nécessaire la réalisation de tout le circuit solaire-évaporateur en acier inoxydable de façon à éviter un risque de formation de boues et de colmatage des échangeurs de chaleur augmentant le coût de ce poste. Enfin ces composants en matière plastique nécessitent un travail de maintenance et de remplacement périodique assez coûteux qui pourraient être évités avec des échangeurs métalliques.

Energie Solaire SA fabrique depuis des décennies des échangeurs plans à haute performance utilisés tant pour ses produits solaires que pour ses panneaux climatiques. Fabriqués en acier inoxydable, ces échangeurs sont d'une longévité exceptionnelle et 100% étanches à la diffusion d'oxygène.



Un prototype de 150 kWh latent pour un volume hors tout de 2 m³ a donc été développé et construit par Energie Solaire SA en 2015.

Constitué d'un bac en acier et équipé au maximum de 7 échangeurs de 1.82 m²/échangeur soit 25.5 m² de surface totale d'échange, ce prototype a été testé par « l'Institut für Solartechnik SPF » de Rapperswil, dans le cadre d'un mandat « CTI-Innocheck » financé par Energie Solaire SA. Les résultats sont très positifs et indiquent un comportement stable des échangeurs et des performances intéressantes rendant plausible le développement d'un stock à changement de phase sur cette base.

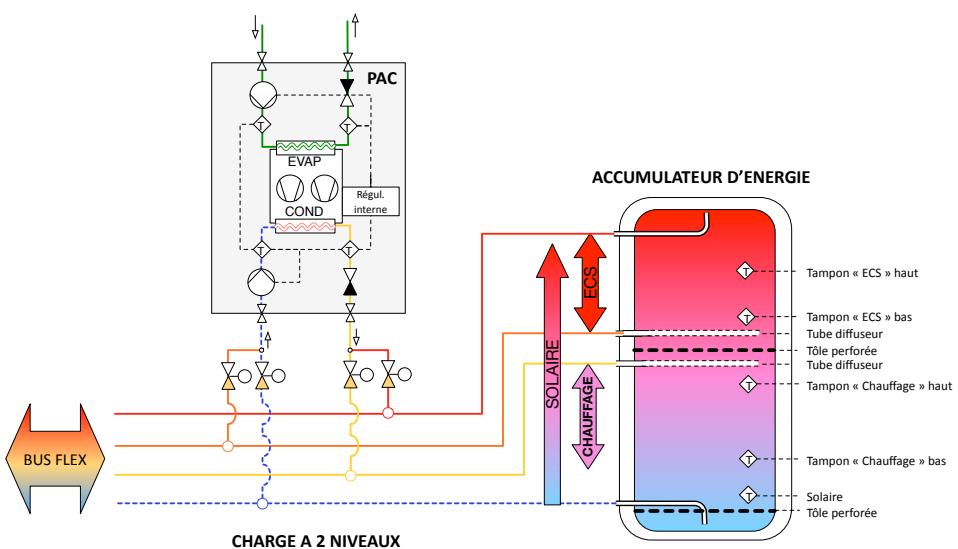


5.1.4 Vases d'expansion

Le système d'expansion du circuit solaire-évaporateur PAC doit impérativement comprendre un vase intermédiaire de manière à protéger la membrane du vase de l'amplitude de température extrêmes du circuit (-10°C à +95°C).

5.1.5 Accumulateur de chaleur sensible (chauffage)

Le schéma typique du système « Icesol » comprend un bus hydraulique « Flex » qui facilite le raccordement optimal des équipements de production de chaleur. A son extrémité on trouve l'accumulateur d'énergie. Ce dernier comporte une partie supérieure dédiée à la production d'eau chaude sanitaire, une partie médiane servant de tampon pour éviter les cycles courts d'enclenchement de la PAC et enfin en partie inférieure la zone « basse température » dans laquelle la sonde d'enclenchement du solaire conventionnel (direct) est localisée. De manière à préserver la stratification entre ces différentes zones et éviter un risque de brassage il est vivement recommandé de prendre des précautions lors du choix de l'accumulateur d'énergie. Le schéma simplifié ci-dessous illustre celles prises pour les accumulateurs de la Cigale et montre le raccordement de la pompe à chaleur pour permettre la charge à deux niveaux de l'accumulateur.



5.1.6 Régulation du système IceSol

Le coût de la partie régulation MCR pour une chaufferie de la Cigale représente un montant conséquent d'un peu plus de 30'000 CHF (1/3 fourniture automates, 1/3 programmation et mise en service, 1/3 tableau électrique MCR). Pour une première installation de puissance importante ce montant était plausible et donnait une garantie de souplesse pour le suivi et la phase d'optimisation. En revanche pour les installations de taille inférieure un tel budget s'avère juste impossible.

Après une première phase de travail, dont l'objectif était d'aboutir à un système de régulation et de tableau de commande « générique », il est apparu que le potentiel maximal de réduction de ce poste était d'environ 50% en utilisant du matériel similaire à celui de la Cigale.

Devant faire face à des projets dont la puissance typique était de l'ordre de 30 à 60 kW Energie Solaire SA a poursuivi la démarche mais avec une gamme de régulateurs programmables, performants mais plus limités en nombre de points gérables (typiquement utilisés dans les pompes à chaleur et les monoblocs de ventilation par exemple) et un partenaire à même de jouer le rôle d'intégrateur complet du système (programmation, fabrication et test). Le résultat de ce développement permet de réduire le coût de la partie régulation à environ 25% du montant de la Cigale pour la base générique avec un suivi minimum de l'installation. Un produit existant chez ce fournisseur permet facilement sans nécessiter de développements particuliers de couvrir des besoins plus complets de suivi et d'archivage de données.

6 Conclusions

6.1 Technique

6.1.1 Composants principaux

Après deux ans de suivi le système de production de chaleur IceSol a montré sa stabilité et sa fiabilité pour le bâtiment de Vermont. Les problèmes techniques rencontrés lors du deuxième hiver dans l'installation de Vidollet ont perturbé les résultats mais ont permis de mettre en évidence certains choix techniques importants pour les circuits hydrauliques dont l'amplitude de température dépasse le cadre usuel et sollicite certains composants. Le système d'expansion du circuit comprenant les capteurs solaires, le stock à changement de phase et les évaporateurs des PAC doit impérativement comprendre un vase intermédiaire pour protéger la membrane du vase d'expansion contre les températures élevées mais surtout contre les températures inférieures à +10°C.

Le choix des composants principaux de production de chaleur est essentiel, notamment celui de la pompe à chaleur qui doit pouvoir produire l'eau chaude sanitaire avec une source de chaleur à une température négative pour exploiter le stock à changement de phase de façon optimale. Les machines installées à la Cigale (choix économique) ne sont pas idéales par rapport à ce point ce qui a conduit à devoir les exploiter de manière quelque peu exagérée. Elles doivent fournir une température de sortie condenseur maximale pendant l'hiver, pour réduire au strict minimum le complément de température par la chaudière à gaz pour la production d'eau chaude sanitaire, réduisant forcément leur coefficient de performance.

Le type de stock à changement de phase est également important. Les stocks installés à la Cigale offrent une surface d'échange très intéressante permettant des grandes puissances pour des écarts de température faibles. En revanche les échangeurs constitués de tubes en plastique requièrent des pièces de transition entre plastique et métal qui s'avèrent fragiles et doivent être remplacées périodiquement augmentant ainsi les frais de maintenance. L'autre incidence de ce type d'échangeur est qu'il n'est pas étanche à la diffusion d'oxygène. Le circuit complet a donc été réalisé en acier inoxydable pour éviter à tout prix le risque de formation de boues qui aurait conduit à boucher les échangeurs. Cela renchérit donc l'installation.

L'utilisation d'un modèle de simulation pour le dimensionnement d'un système de type « IceSol » est dans tous les cas nécessaire pour vérifier lors des phases de projet que les composants principaux sont adéquats. Le modèle permet en outre d'évaluer, de manière finalement assez précise, la part des besoins à couvrir par une autre source de chaleur pour autant que la réalisation soit faite dans les règles de l'art. Idéalement ce modèle devrait être implémenté dans Polysun pour être diffusé mais ce point n'a, malgré beaucoup d'efforts, pas encore pu être réglé.

Les règles de dimensionnement préliminaires d'un système « IceSol » pour des constructions respectant idéalement les valeurs cibles des normes SIA 380/1 sont les suivantes :

Puissance de la PAC en B0W35 (kW _{pac})	1.3 x Puissance maximale à fournir (chauffage+ECS)	Prise en compte de la baisse de puissance lorsque la source chute en température
Limites idéales de fonctionnement de la PAC	B-9W45, B-5W55, B18W55	
Surface de capteurs solaires sans vitrage	3.0 à 4.0 m ² /kW _{pac}	Inclinaison minimale 20° Orientation Sud +/- 45°
Volume latent du stock à changement de phase	0.1 à 0.15 m ³ /kW _{pac}	Env. 75% du volume brut
Surface d'échange stock à changement de phase	1.0 à 1.5 m ² /kW _{pac}	Epaisseur de glace 3 à 5 cm

Il est important de prêter attention au fait que le paramètre le plus sensible est la surface des capteurs. Si pour une raison ou une autre la surface disponible n'est pas suffisante, il sera alors néces-

saire de réduire la puissance de la PAC et d'accepter que le système de production de chaleur devienne bivalent ou alors de trouver une autre source complémentaire comme une récupération de chaleur sur une ventilation ou sur les eaux usées.

6.1.2 Bilan énergétique

Grâce à un traitement et une analyse détaillés des mesures à disposition, le bilan de la production et demande de chaleur des bâtiments Vermont et Vidollet a pu être établi sur une année de référence complète (juin 2015 – mai 2016, 3054 degré-jours en base 21/15).

En ce qui concerne le bâtiment Vermont on observe que:

- La demande annuelle de chaleur (66.3 kWh/m^2) provient pour 51% des besoins brut d'ECS (33.8 kWh/m^2) et pour 49% des besoins de chauffage (32.5 kWh/m^2).
- La production de chaleur (67.3 kWh/m^2) est couverte pour la plus grande partie par la PAC (53.6 kWh/m^2 , 78%), suivie du solaire (9.5 kWh/m^2 , 14%) et de la chaudière à gaz (5.2 kWh/m^2 , 8%).
- Le COP de la PAC s'élève à 3.2 (hors auxiliaires), respectivement à 3.0 (y compris pompes de circulation pour stock à glace, évaporateur et condenseur). Grâce à l'apport solaire direct, le COP du système IceSol s'élève quant à lui à 3.5 (y compris auxiliaires).
- En tenant compte que l'électricité utilisée par le système est labélisée d'origine renouvelable, la fraction annuelle d'énergie renouvelable (rapport entre ressources renouvelables et ressources totales mobilisées) s'élève à 93%, ce qui est un excellent résultat. A noter que cette fraction s'élèverait à 79% pour une électricité comptabilisée avec le mixe fournisseur suisse.

Au niveau des sous-systèmes, on relève les points suivants :

- La demande annuelle nette d'ECS, au niveau du soutirage (26.7 kWh/m^2), est 19% supérieure à la valeur observée sur le bâtiment Vidollet (22.4 kWh/m^2) et 28% supérieure à la norme SIA (20.8 kWh/m^2). Si ces écarts peuvent à priori sembler importants, il convient de remarquer que, de façon générale, la demande d'ECS varie énormément d'un bâtiment à l'autre, et se situe en moyenne au-dessus de la norme SIA, du moins dans le résidentiel collectif. A cet égard, la demande observée sur le bâtiment Vermont est très légèrement inférieure aux valeurs de benchmark observées sur le parc résidentiel collectif genevois.
- Avant réglages, la demande de chauffage (47.0 kWh/m^2 , corrigés climatiquement) se situe à peine au-dessus de la valeur de dimensionnement (45.3 kWh/m^2), mais bien au-dessus de la valeur cible (26.1 kWh/m^2) et de la valeur Minergie (17.4 kWh/m^2). Grâce aux réglages successifs, on observe une réduction de 20% sur la demande de chauffage de la deuxième année (37.4 kWh/m^2). Finalement, si la signature finale devait se confirmer, on devrait à l'avenir s'attendre à une demande optimisée (29.3 kWh/m^2) proche de l'objectif du projet. La valeur Minergie, qui repose sur une température de chauffage et un débit de ventilation normés, n'est quant à elle pas atteinte en situation réelle d'utilisation.
- Ce dernier point montre que les défauts de jeunesse de l'installation étaient essentiellement liés à des questions de réglages faisant partie de la gestion traditionnelle des systèmes techniques, et non au caractère innovant de la technique mise en place. On relève une fois de plus l'importance d'une réception correcte des installations techniques, ainsi que du suivi de ces dernières.
- Les PAC fonctionnent majoritairement avec un ΔT entre 45 et 50 K, supérieur à la plage de fonctionnement habituel prévu. Le COP mesuré pour un tel ΔT se situe cependant dans le prolongement des données fabriquant, attestant en ce sens d'un fonctionnement correct des PAC. Pour rappel, cet important ΔT provient essentiellement de l'importante fraction d'ECS, avec une température de production aux alentours de 50°C , alors que la production de chauffage se situe entre 30 et 40°C . A cet égard, une PAC à haut rendement (efficacité thermodynamique de 50%, sans dégradation à charge partielle ni à haut ΔT) permettrait de ramener le COP annuel à 3.64 (hors auxiliaires), correspondant à une baisse de consommation électrique de seulement 1.8 kWh/m^2 .
- Bien que l'efficacité de la chaudière soit assez faible (81% PCS), il s'agit de rappeler qu'il s'agit

uniquement d'une chaudière de backup : son usage reste relativement sporadique, et les pertes associées s'élèvent annuellement à 1.0 kWh/m² (1.6% de la demande de chaleur brute du bâtiment).

En ce qui concerne le bâtiment Vidollet, on observe finalement les points suivants :

- Alors que la demande d'ECS (28.0 kWh/m²) est environ 20% inférieure à celle de Vermont, la demande de chauffage (32.2 kWh/m²) est sensiblement égale.
- Au niveau de la production, l'apport solaire direct est également très proche (10.3 kWh/m²). Suite à une panne de la PAC durant l'hiver 2015/2016, on observe par contre sur Vidollet le transfert de la production de la PAC (19.1 kWh/m²) sur la chaudière (31.5 kWh/m²).
- La similitude de fonctionnement entre les deux installations est également visible au niveau de la dynamique en valeurs journalières.

On en déduit qu'en dépit de la panne impondérable sur l'installation Vidollet, les deux installations ont un fonctionnement tout à fait similaire et cohérent, ce qui atteste de leur reproductibilité.

6.2 Prix de revient comparatif de la chaleur

Dans un tel projet, il est également important de traiter des aspects financiers et de les comparer avec d'autres systèmes de chauffage. Sur la base des coûts d'investissement dans les deux chaufferies de la Cigale et la consommation actuelle pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire, nous avons comparé le système de chauffage Icesol avec un système de chauffage classique, qui se composerait d'une chaudière à gaz et de panneaux solaires vitrés, pour la production de 30% d'eau chaude sanitaire obligatoire. Pour que les deux systèmes de chauffage aient la même proportion d'énergie renouvelable, la chaudière serait alimentée par du biogaz. Les coûts de gaz et d'électricité contiennent toutes les taxes. Dans le tableau ci-dessous, les deux systèmes sont comparés.

Base derniers 12 mois (2015/2016)	IceSol	Chaudière à gaz
SRE La Cigale	19'000	19'000
Consommation chauffage [kWh/m ² /an]	32.5	32.5
Consommation ECS [kWh/m ² /an]	33.8	33.8
Consommation chauffage et ECS [kWh/an]	1'259'700	1'259'700
Consommation électricité [kWh/an]	364'800	50'342
Consommation gaz [kWh/an]	98'800	1'185'600
Émission de CO ₂ [t]	23	-
Investissement chaufferie [CHF]	fr. 1'487'800.00	fr. 915'000.00
Investissement distribution chaufferie [CHF]	fr. 342'800.00	fr. 150'000.00
Subventions solaires [CHF]	fr. 135'921.84	fr. 35'710.17
Amortissement annuel (sur 25 ans) [CHF]	fr. 67'787.13	fr. 41'171.59
Coûts de financement (1.1%/an) [CHF]	fr. 18'641.46	fr. 11'322.19
Maintenance annuel [CHF]	fr. 53'600.00	fr. 18'760.00
Prix d'électricité [CHF/an] (100% renouvelable, tout inclus)	fr. 79'997.72	fr. 11'039.69
Index prix d'électricité [CHF/an] (prix moyen par année)	fr. 1'946.94	fr. 268.68
Prix de gaz [CHF/an] (100% Biogaz, tout inclus)	fr. 15'941.38	fr. 155'318.88
Index prix de gaz [CHF/an] (prix moyen par année)	fr. 387.97	fr. 3780.07
Prix par [kWh]	fr. 0.189	fr. 0.192

Prix de gaz pour consommation IceSol	
Abonnement	fr. 101.52
Taxe de CO2	fr. 1'618.70
Taxe de puissance	fr. 7'573.50
Consommation	fr. 6'647.66
Gaz Vital vert: 10% Biogaz tout compris [CHF/kWh]	fr. 0.1613

Prix gaz pour consommation combinaison gaz+solaire	
Abonnement	fr. 5'678.64
Taxe de CO2	fr. -
Taxe de puissance	fr. 10'327.50
Consommation	fr. 139'312.74
Gaz Vital Biogaz: 100% Biogaz tout compris [CHF/kWh]	fr. 0.1310

Prix électricité pour IceSol	
Acheminement (moyenne heures pleines, heures douces)	fr. 0.0852
Consommation (moyenne heures pleines, heures douces)	fr. 0.1340
Electricité Vital Vert: 100% renouvelable tout inclus [CHF/kWh]	fr. 0.2193

On constate que les prix de revient de la chaleur sont pratiquement égaux pour une durée d'amortissement de 25 ans.

Pour que le système IceSol devienne plus intéressant au niveau financier, les coûts d'investissement devraient être réduits de l'ordre de 8.8% et les coûts de maintenance de 44%. De plus la pompe à chaleur devrait avoir un COP de 4.0 inclus tous les consommateurs électriques dans la chaufferie. Dans cette hypothèse, l'économie sur les coûts d'exploitation pour la chaufferie serait de 52'000 CHF par an par rapport au système classique. Les coûts supplémentaires seraient ainsi amortis en 10 ans. Ceci semble possible pour un nouveau projet d'une taille comme la Cigale.

6.3 Suivi de performance après mise en service

Le suivi de performance après rénovation et mise en service d'une installation de production de chaleur et d'eau chaude en général combinée à un système de ventilation semble une opération qui devrait être généralisée. Très souvent, après la phase de réception de l'ouvrage, l'installation est laissée en l'état avec des valeurs théoriques de projet. La prestation de suivi après mise en service par l'ingénieur CVSE n'est généralement pas commandée par le maître de l'ouvrage. Il y a donc un risque important que l'installation ne subisse que quelques corrections basiques (correction de la courbe de chauffage ou augmentation de la température de l'eau chaude sanitaire par exemple) sans contrôle de la performance globale. Des jeux de valeurs de consommation cibles et limites sont nécessaires à cette démarche. Dans le cas de la Cigale, sans ce suivi rendu possible grâce à l'OFEN, la performance serait bien en-dessous des résultats obtenus. Cette démarche a permis de ramener les performances techniques « primaires » dans la plage admissible. Seules les performances liées au comportement des utilisateurs ne peuvent être corrigées rapidement car elles nécessitent un processus continu de communication et d'information.

L'installation d'un système de production de chaleur d'appoint/secours semble une nécessité pour assurer une disponibilité à 100% d'eau chaude et de chauffage car si les conditions climatiques conduisent à des chutes de neige sur une durée conséquente, la source de chaleur deviendrait insuffisante avec le type de capteur solaire utilisé à la Cigale. Ce capteur sélectif sans vitrage (Toiture Solaire AS) dispose d'une protection thermique de sa face cachée pour permettre sa montée en température de façon à fournir de la chaleur à une température utilisable en direct à mi-saison et en été. Cependant si on considère que la part d'énergie annuelle fournie par les capteurs dans ce mode ne représente que le 5^{ème} de l'énergie captée on pourrait se demander si une protection thermique moins performante ne serait pas un avantage pendant la saison froide offrant ainsi une source de chaleur protégée de la neige...

6.4 Technologie IceSol - Champ d'application et contraintes

La technologie IceSol est relativement flexible et peut être utilisée dans le cadre de projets de rénovation ou de construction nouvelle, pour une taille d'objet allant de la villa individuelle jusqu'aux grandes barres d'immeubles comme La Cigale. La flexibilité de la technologie est également large en termes de typologie et d'affectation, elle peut couvrir notamment: -les bâtiments de logements ou administratifs, -les écoles, salles de spectacle et centres sportifs, -les hôpitaux et EMS, -l'industrie.

La technologie IceSol comporte toutefois aussi des limites et des contraintes, qui sont discutées ci-dessous. A l'inverse, les contraintes du site peuvent également favoriser ou défavoriser cette technologie par rapport à d'autres.

Au moment des études de la rénovation du complexe de la Cigale, une étude de faisabilité a été conduite qui comparait trois standards de rénovation (Minimum réglementaire, Minergie Rénovation et Minergie-P) ainsi que six systèmes de chauffage et production d'eau chaude sanitaire (Chaudière à gaz, PAC sur sondes géothermiques, PAC sur toiture AS (Système IceSol), PAC sur réseau GLN, Solaire thermique + stockage saisonnier, Chaudière à bois). Cette étude avait conclu au fait que le système IceSol, bien que plus cher en investissement que la variante au gaz, ne présentait des coûts d'exploitation que légèrement plus élevés avec l'avantage d'une couverture majoritairement renouvelable au contraire du gaz.

Les contraintes possibles dans le cadre d'un projet de construction ou de rénovation sont discutées ci-après.

Qualité thermique de l'enveloppe

La qualité thermique de l'enveloppe d'une nouvelle construction ou d'une rénovation est fondamentale pour le dimensionnement et la planification des installations de chauffage, quel que soit le système (à noter ici que les besoins de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire sont pratiquement indépendants de la qualité thermique de l'enveloppe). Meilleure est la qualité thermique de l'enveloppe, moindre seront les besoins et le dimensionnement des installations de chauffage, ce qui est favorable pour tous les projets de construction. Dans le cas particulier du système IceSol, le système sera plus facilement réalisable si la performance thermique de l'enveloppe est élevée, car la surface nécessaire des capteurs solaires non vitrés sera réduite et la température nécessaire pour le départ du chauffage sera diminuée.

Distribution du chauffage

Le type de distribution du chauffage existant ou choisi pour une construction neuve apporte une contrainte sur le type de chauffage, principalement lié à la température de départ du chauffage. Une distribution du chauffage basée sur des radiateurs ou des aérothermes, nécessitant une température de départ du chauffage relativement élevée, n'est pas en faveur d'un système basé sur des pompes à chaleur (PAC), comme c'est le cas du système IceSol. En effet, le coefficient de performance de la PAC se verra réduit et celle-ci ne fonctionnera pas dans de bonnes conditions. La seule possibilité dans ce cas est de prévoir une enveloppe performante (type Minergie-P), comme cela a été fait pour La Cigale. Les systèmes de distribution de chaleur à basse température, en particulier chauffage au sol, chauffage de paroi et échangeur basse température dans un monobloc de ventilation sont plus favorables pour un système de chauffage basé sur pompe à chaleur.

Surface et orientation de la toiture

La surface disponible et l'orientation de la toiture sont un paramètre déterminant pour tout système basé sur un apport solaire. Dans le cas de la technologie IceSol, la surface nécessaire de capteurs solaires non vitrés est élevée, non seulement pour favoriser les apports solaires directs, mais également pour permettre l'échange de chaleur avec l'atmosphère lorsque le temps est couvert ou durant la nuit. L'orientation de la toiture vers le sud est également un paramètre favorable. À noter que pour déterminer la faisabilité, la surface de capteurs en toiture doit être mise en rapport avec la surface totale à chauffer. Plus l'immeuble est élevé, moins favorable sera la technologie IceSol. A noter toutefois que les capteurs solaires non vitrés peuvent être posés en façade et augmenter ainsi la surface d'échange avec l'atmosphère.

Surface disponible et caractéristiques du sol

La surface de la parcelle et les caractéristiques du sous-sol sont un paramètre déterminant pour réaliser un système de chauffage basé sur des sondes géothermiques. Sachant que les sondes géothermiques doivent idéalement être posées avec un écartement minimum de 6 à 8 mètres afin de ne pas se perturber entre elles, la surface de terrain disponible est déterminante pour la faisabilité de ce système. Les sondes géothermiques peuvent éventuellement être prévues sous les bâtiments (construction neuve), mais en rénovation, seuls les forages sur le terrain environnant la construction sont possibles. De plus, les sondes géothermiques ne sont pas autorisées partout selon la nature du sous-sol et la réglementation locale.

Immissions dans l'air

L'immission caractérise la concentration des polluants dans l'air ambiant. En milieu urbain, l'immission peut être atteinte ou dépassée pour certains polluants, en particulier les particules fines, le CO ou les NOx. Le niveau des immissions peut représenter une contrainte significative pour le choix du système de chauffage. L'étude de faisabilité pour La Cigale avait notamment identifié la problématique d'un niveau d'immission en particules fines proche de la limite réglementaire, ce qui rendrait difficile voire impossible l'autorisation d'installation d'une chaudière à bois ou à pellets. Les systèmes de chauffage basés sur une PAC sont favorables dans le cas de contraintes d'immissions, car elles ne génèrent aucun rejet gazeux polluant.

Place disponible dans ou à proximité du bâtiment

La technologie IceSol nécessite l'installation d'un réservoir à changement de phase, qui permet de fournir de l'énergie à la pompe à chaleur grâce au changement de phase d'un matériau (en principe de l'eau) lorsqu'il n'y a plus d'apport solaire et que l'échange avec l'atmosphère est insuffisant. La place nécessaire pour ce réservoir doit être prévue dans le cadre d'une construction nouvelle ou disponible dans un bâtiment existante (même si un local adjacent sous-terrain ou non peut éventuellement être créé à cet effet). Le même type de contrainte existe pour les systèmes basés sur un stockage saisonnier de l'énergie solaire, avec un volume de stockage nécessaire encore plus volumineux. L'existence ou la création d'un local adéquat doit être considérée dans l'étude de faisabilité.

Proximité d'un réseau de chaleur ou une boucle hydrothermique

Dans le cadre de l'étude de faisabilité de toute construction nouvelle ou projet de rénovation, la proximité d'un réseau de chaleur ou d'une boucle hydrothermique doit être vérifiée. En effet, un raccordement à un réseau de chaleur permet de diminuer l'investissement pour les installations de chauffage, et l'énergie fournie par le réseau provient souvent de sources renouvelables ou de chaleur fatale (incinération des ordures ménagères). Le prix d'achat de la chaleur sur le réseau est en principe concurrentiel par rapport aux autres systèmes de chauffage. Le règlement communal impose même parfois le raccordement au réseau de chauffage. La proximité d'une boucle hydrothermique peut également s'avérer intéressante car elle permet de fournir le rafraîchissement direct, mais elle nécessite une PAC pour la production de chaleur. Dans tous les cas, une étude économique doit être conduite, incluant le calcul des coûts de raccordement et d'exploitation, comparativement aux autres systèmes de chauffage.

Proximité du réseau de gaz

Comme pour le réseau de chaleur, la proximité du réseau de gaz doit être vérifiée. En effet, si le gaz est présent sur la parcelle ou peut y être amené sans difficulté technique, le gaz représente une source fiable et économiquement intéressante pour le chauffage d'un bâtiment. A noter toutefois qu'il s'agit d'une ressource non renouvelable, et générant des polluants atmosphériques (CO₂, NOx).

Niveau sonore admissible

Une installation basée sur le système IceSol, si elle est bien réalisée, est totalement insonore autant à l'intérieur du bâtiment que pour son environnement. Cette situation est similaire pour les pompes à chaleur sur sondes géothermiques. Par contre, l'aérotherme d'une pompe à chaleur air-eau génère

une nuisance sonore vers l'extérieur, qui peut déranger à la fois les propres habitants ou les constructions avoisinantes. Une bonne conception de l'installation ainsi qu'un caisson insonorisant permet de réduire l'impact sonore vers l'extérieur mais représente un investissement supplémentaire. Une chaudière à bois peut également générer des nuisances sonores au moment de la livraison des plaquettes ou des pellets de bois (transport par camions, transfert par soufflage). Une planification prudente de ces systèmes de chauffage doit être assurée si la construction se trouve dans une zone calme ou sensible au niveau du bruit.

6.5 Communication

En utilisant tous les supports de communication, le projet de « La Cigale » s'est fait connaître dans toute la Suisse et a touché un grand nombre de personnes, qui ont ainsi pu être sensibilisées aux possibilités d'une rénovation Minergie-P et du système IceSol. Le potentiel en Suisse pour des projets similaires à La Cigale est très important. En effet 45% des bâtiments de logements en Suisse sont énergivores tout comme La Cigale avant sa rénovation. Si les propriétaires de ces bâtiments suivent la même démarche que la coopérative de La Cigale, 21'000 GWh_{thermique} par an pourrait être économisé ou l'équivalent de 2.1 milliard CHF d'importation d'hydrocarbures par an!

7 Remerciements

Le suivi de ce projet a été rendu possible grâce au soutien financier de l'OFEN que nous tenons à remercier chaleureusement.

De même, sans la participation active de tous les acteurs impliqués dans la collecte de toutes les mesures, de leur traitement, de la recherche permanente de solutions d'optimisation, de leur synthèse puis de leur présentation au cours des séances techniques le travail présenté dans ce rapport n'aurait pas été possible. Nous tenons à remercier particulièrement tous les auteurs qui ont permis l'élaboration du présent rapport.

8 Références

COMPARE-RENOVE (2017). Du catalogue de solutions à la pratique réelle. Evaluation, amélioration et diffusion des pratiques innovantes dans la rénovation thermique des bâtiments basées sur des retours d'expérience.

(Disponible au printemps 2017)

Khoury J. (2014). Rénovation énergétique des bâtiments résidentiels collectifs: Etat des lieux, retours d'expérience et potentiels du parc genevois. Thèse. Université de Genève.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:48085>

Mermoud F., Fraga C., Hollmuller P., Pampaloni E., Lachal B. (2014). COP5 : Source froide solaire pour pompe à chaleur avec un COP annuel de 5 généralisable dans le neuf et la rénovation. Université de Genève / Office fédéral de l'énergie OFEN.

<http://archive-ouverte.unige.ch/unige:35401>

Quiquerez L. (2016). Analyse comparative des consommations de chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire estimées à partir de relevés mensuels. Etude sur un échantillon de bâtiments résidentiels collectifs alimentés par un réseau de chaleur à Genève. Université de Genève.

(Prochainement disponible sous <http://archive-ouverte.unige.ch>)

Stoltz P., Frischknecht R. (2011). Strombilanz Strommix Schweiz 2011. Treeze Ltd / Bundesamt für Umwelt (BAFU)

http://www.bafu.admin.ch/klima/09608/index.html?lang=fr#sprungmarke1_28

Thissen B., Graf O. Projet OFEN N° SI/500'481 – Chauffage par pompe à chaleur solaire avec des capteurs sélectifs non vitrés et accumulateur à changement de phase – rapport final 2012

<http://www.bfe.admin.ch/dokumentation/energieforschung/index.html?lang=fr&publication=11062>