



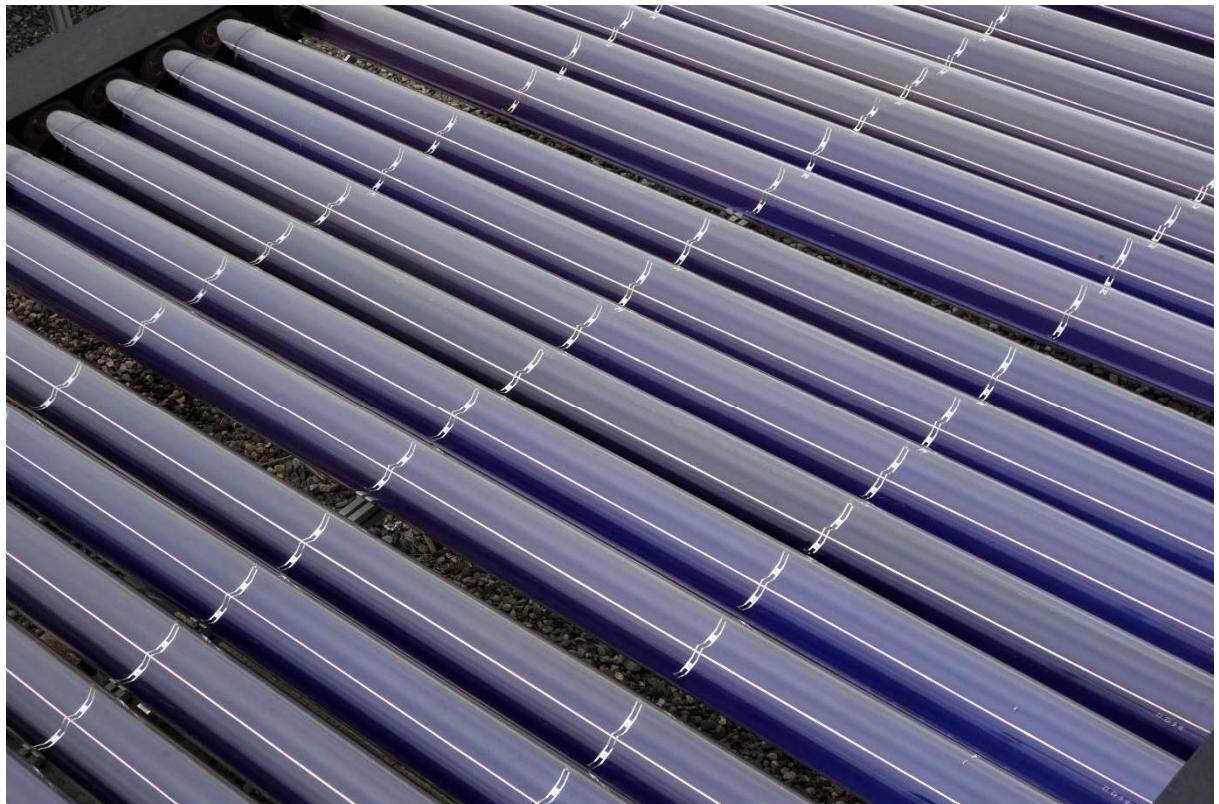
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et Cleantech

Rapport final du 23 décembre 2021

Installation solaire thermique pour la production de vapeur utile à la stérilisation d'équipements médicaux des Hôpitaux universitaires de Genève (HUG)





Date: 23 décembre 2021

Lieu: Genève

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Hôpitaux universitaires de Genève (HUG)
Rue Gabrielle-Perret-Gentil 4, CH-1211 Genève 14
www.hug.ch

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

Tecnoservice Engineering SA
Avenue du Vignoble 3
CH-2000 Neuchâtel
www.tecnoservice.ch

SPF Institut für Solartechnik
Oberseestrasse 10
CH-8640 Rapperswil
www.spf.ch

Auteur(s):

Hôpitaux universitaires de Genève
Energie Solaire SA

Suivi du projet à l'OFEN:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/501137-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Cinquième grande étape du redimensionnement des Hôpitaux universitaires de Genève (HUG), le bâtiment Julliard, récemment construit, doit être un bâtiment à haute efficacité énergétique. Pour atteindre cet objectif, les HUG avaient décidé d'installer une installation solaire à haute température pour la production de vapeur. Celle-ci est réalisée à partir de grands capteurs à tubes sous vide discrètement intégrés dans le toit du bâtiment afin de produire de la vapeur à 140 °C, utilisée pour la stérilisation des équipements médicaux.

Plusieurs années après le début du projet, les défis climatiques et énergétiques liés à l'activité des hôpitaux sont d'autant plus d'actualité. Le secteur de la santé est à l'origine d'environ 5% des émissions de gaz à effet de serre en Suisse et les hôpitaux sont l'une des principales sources de ces émissions. Toutefois, la transition énergétique dans de tels établissements se heurte à des difficultés techniques, notamment pour les activités de processus telles que la production de vapeur. Malgré ce fait, qui nous conforte dans l'orientation initiale du projet, nous avons rencontré de nombreuses difficultés, principalement techniques, lors de la réalisation du projet, qui nous ont empêchés de mettre l'installation définitivement en service.

Les tests de fonctionnement ont cependant permis de (1) valider les scénarios d'arrêt de sécurité, de (2) vérifier les capacités thermiques des panneaux, (3) d'identifier certains déséquilibres thermiques entre les rangées de capteurs et finalement (4) d'acquérir des données de production sur quelques jours de fonctionnement et de faire un premier bilan.

Outre ces avancements, d'autres validations ont été obtenues au bénéfice des HUG, comme l'utilisation d'un outil de monitoring énergétique, aujourd'hui largement utilisé et en constante évolution, ou la certification des panneaux solaires pour une utilisation avec de l'huile thermique par l'Institut de technologie solaire SPF à Rapperswil. Le projet a permis aux partenaires de gagner en compétences dans un domaine technique exigeant.

Zusammenfassung

Als fünfte grosse Etappe der Redimensionierung der Genfer Universitätskliniken (HUG) soll das neu errichtete Gebäude Julliard ein energieeffizientes Gebäude sein. Um dieses Ziel zu erreichen, hatten die HUG beschlossen, eine Hochtemperatur-Solaranlage für die Dampferzeugung zu installieren. Die Anlage besteht aus grossen Vakuumröhrenkollektoren, die diskret in das Dach des Gebäudes integriert wurden, um 140 °C heißen Dampf zu erzeugen, der für die Sterilisation von medizinischen Geräten verwendet wird.

Mehrere Jahre nach Beginn des Projekts sind die klimatischen und energetischen Herausforderungen, die mit dem Betrieb von Krankenhäusern verbunden sind, umso aktueller. Der Gesundheitssektor ist für etwa 5 % der Treibhausgasemissionen in der Schweiz verantwortlich und Krankenhäuser sind eine der Hauptquellen dieser Emissionen. Dennoch stösst die Energieumstellung in solchen Einrichtungen auf technische Schwierigkeiten, insbesondere bei prozessorientierten Tätigkeiten wie der Dampferzeugung. Trotz dieser Tatsache, die uns in der ursprünglichen Ausrichtung des Projekts bestärkt, sind wir bei der Umsetzung des Projekts auf zahlreiche, vor allem technische Schwierigkeiten gestossen, die uns daran gehindert haben, die Anlage endgültig in Betrieb zu nehmen.

Die Funktionstests ermöglichen es jedoch, (1) die Szenarien für die Sicherheitsabschaltung zu validieren, (2) die thermischen Kapazitäten der Paneele zu überprüfen, (3) bestimmte thermische Ungleichgewichte zwischen den Kollektorreihen zu identifizieren und schliesslich (4) Produktionsdaten über einige Betriebstage zu gewinnen und eine erste Bilanz zu ziehen.

Neben diesen Fortschritten wurden weitere Validierungen zum Nutzen des HUG erreicht, wie die Verwendung eines Energiemonitoring-Tools, das heute weit verbreitet ist und ständig weiterentwickelt wird,



oder die Zertifizierung der Solarpaneelle für die Verwendung mit Thermoöl durch das Institut für Solar-technologie SPF in Rapperswil. Das Projekt ermöglichte den Partnern einen Kompetenzzuwachs in einem anspruchsvollen technischen Bereich.

Summary

As the fifth major step in the resizing of the Geneva University Hospitals (HUG), the recently constructed Julliard building is to be a highly energy efficient building. To achieve this goal, the HUG decided to install a high-temperature solar installation for steam production. The system uses large evacuated tube collectors discreetly integrated into the roof of the building to produce steam at 140 °C, which is used for sterilising medical equipment.

Several years after the start of the project, the climate and energy challenges associated with hospital activity are even more topical. The health sector is responsible for about 5% of greenhouse gas emissions in Switzerland and hospitals are one of the main sources of these emissions. However, the energy transition in such institutions faces technical difficulties, especially for process activities such as steam generation. Despite this fact, which confirms the initial orientation of the project, we encountered many difficulties, mainly technical, during the realisation of the project, which prevented us from putting the installation into operation definitively.

However, the operational tests allowed us to (1) validate the safety shutdown scenarios, (2) verify the thermal capacities of the panels, (3) identify certain thermal imbalances between the rows of collectors and finally (4) acquire production data over a few days of operation and make an initial assessment.

In addition to these advances, other validations were obtained for the benefit of the HUG, such as the use of an energy monitoring tool, which is now widely used and constantly evolving, or the certification of the solar panels for use with thermal oil by the Institute of Solar Technology SPF in Rapperswil. The project has enabled the partners to gain competence in a demanding technical field.

«Take-home messages»

- Les besoins d'énergie de process nécessitant de la chaleur à des températures élevées (>100°C) ne disposent actuellement d'une offre limitée en énergie renouvelable et qui peut être limitée par le contexte (limitation de l'usage du bois énergie en raison de la qualité de l'air par exemple). Le projet d'énergie solaire à haute température pour la production de vapeur des HUG a permis d'apporter une réponse technique à ces besoins de process et de certifier une technologie de capteurs solaires à haute température pour un usage avec de l'huile thermique.



Table des matières

Résumé.....	3
Zusammenfassung.....	3
Summary	4
«Take-home messages»	4
Table des matières	5
1 Introduction.....	7
1.1 Contexte et arrière-plan du projet.....	7
1.2 Justification du projet.....	8
1.3 Objectifs du projet.....	8
2 Description des installations.....	10
3 Procédure et méthode.....	18
3.1 Déroulement du projet.....	18
3.2 Choix des panneaux solaires à la conception	18
3.3 Modifications lors de la mise en service	21
3.4 Concept et tests de sécurité	24
3.5 Tests de fonctionnement	24
3.6 Données de fonctionnement de l'installation	25
3.6.1 Températures et équilibrage.....	25
3.6.2 Extraits de fonctionnement	27
3.7 Suivi et monitoring	28
4 Résultats et commentaire.....	31
5 Conclusions et résumé	34
6 Aperçu et mise en œuvre prochaine	35
7 Coopération nationale et internationale.....	35
8 Communication	35



Table des figures

Figure 1 : Contexte énergétique des sites HUG.	7
Figure 2 : Vue d'ensemble du site hospitalier de Cluse Roseraie.	9
Figure 3 : champ solaire de l'aile Jura.....	10
Figure 4 : Vue des générateurs de vapeur de la centrale OPERA.....	11
Figure 5 : Générateur de vapeur alimenté par l'énergie solaire à travers le réseau d'huile thermique. 11	11
Figure 6 : Echangeur de chaleur entre l'installation solaire et le réseau de distribution de chauffage. 12	12
Figure 7 : Cuves de rétention du niveau T. Le volume est de 2 x 5'960 litres	13
Figure 8 : Cuve de rétention du niveau 9	14
Figure 9 : rack d'alimentation en azote	15
Figure 10 : Liaisons hydrauliques entre les bâtiments Opéra et Julliard	15
Figure 11 : schéma de principe hydraulique	17



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan du projet

Avec une surface d'exploitation supérieure à 500'000 m², les HUG affichent une consommation d'énergie thermique de plus de 100 GWh annuels et électrique de 50 GWh pour sept sites principaux et constituent l'un des plus grands consommateurs du canton de Genève.

Le site principal de Cluse-Roseraie concentre environ 70% des besoins d'énergie des HUG. Sur ce site, les besoins d'énergie thermique sont principalement liés à l'eau chaude sanitaire et au chauffage mais une part estimée à 16% est dévolue à divers procédés industriels (stérilisation centrale, cuisines, unités décentralisées de décontamination notamment).

La chaleur est produite de manière centralisée à travers des chaudières fonctionnant principalement au gaz naturel et alternativement au mazout pour les pointes de puissance et le secours.

Les politiques climatiques et énergétiques de la confédération et les cantons incitent les grands acteurs à s'engager dans une transition énergétique et rechercher des alternatives aux énergies fossiles.

Sur le site de Cluse-Roseraie, qui concentre 70% des besoins d'énergie des HUG, la principale énergie renouvelable disponible est le solaire. Des énergies telles que la géothermie ou le bois-énergie ne sont pas exploitables localement en raison, respectivement, de la présence d'une nappe pour l'eau potable ou de la pollution de l'air.

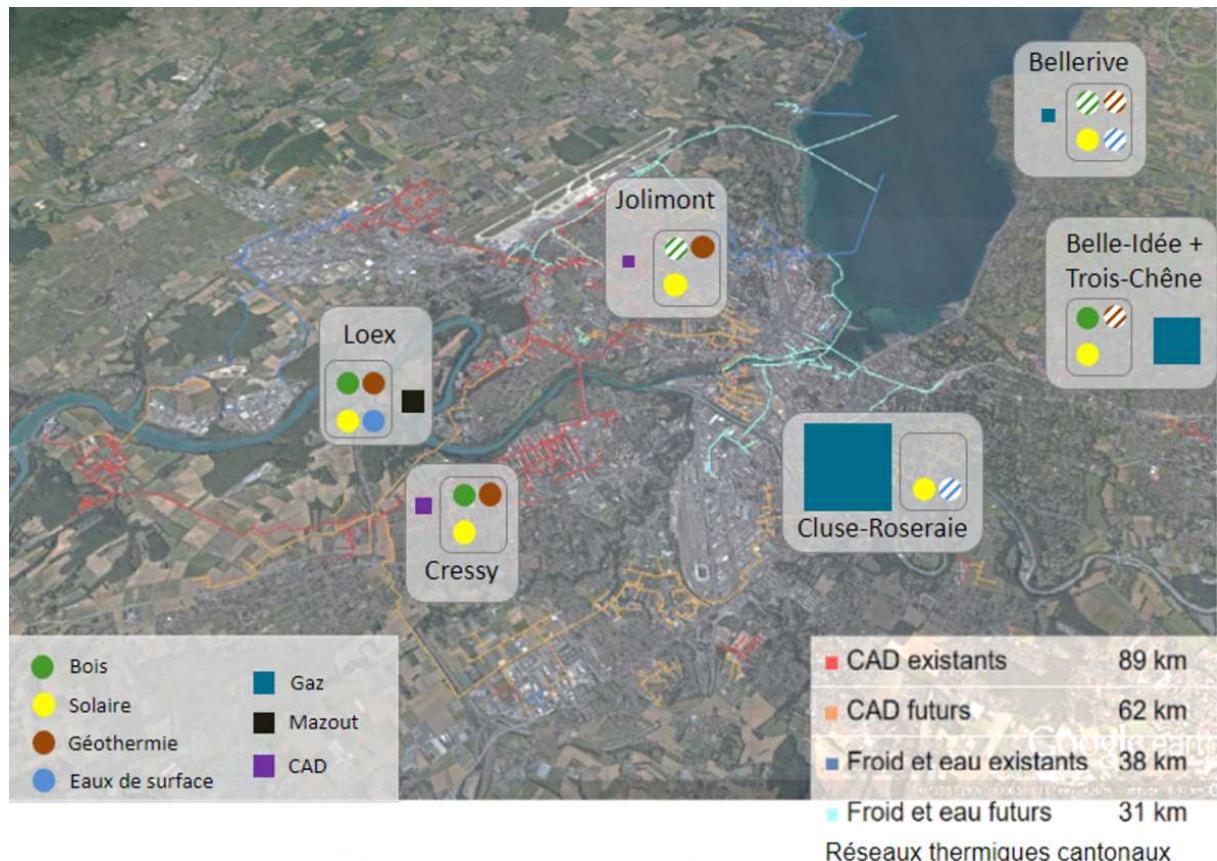


Figure 1 : Contexte énergétique des sites HUG.



Sur le site de Cluse-Roseraie, le nouveau bâtiment d'hospitalisation Julliard a été l'une des grandes étapes du développement planifié par les HUG pour améliorer la qualité de ses prestations et le confort offert aux patients.

La construction de ce bâtiment est le résultat d'un concours d'architecture gagné par un bureau d'architecture parisien en 2006. L'office des bâtiments de l'Etat de Genève fut le Maître d'œuvre pour la réalisation de ce bâtiment, confié ensuite aux HUG pour l'exploitation.

Lors de la finalisation du projet architectural en 2009, les installations énergétiques et de gestion de l'eau ont été étudiées. Par souci écologique, il a été décidé de développer une gestion des eaux pluviales en toiture avec récupération et une production de chaleur solaire pour l'eau chaude sanitaire.

Les HUG n'ont pas adhéré à la proposition d'installation solaire thermique pour la production d'eau chaude sanitaire, notamment en raison du caractère peu innovant de cette solution et de la difficulté à répliquer dans d'autres bâtiments dans lesquels l'intégration d'accumulateur est complexe.

Alternativement, la proposition des HUG a été de développer un projet d'énergie solaire à haute température pour la stérilisation centrale de l'hôpital, dont les besoins sont permanents.

1.2 Justification du projet

La transition vers les énergies renouvelables du site de Cluse-Roseraie se heurte à plusieurs difficultés techniques. Notamment, la chaleur est distribuée à travers un réseau de chaleur vers une trentaine de bâtiments à 170 °C. Cette température élevée trouve sa justification dans les besoins de vapeur de certains procédés nécessitant de la vapeur (stérilisation notamment) mais aussi en raison de l'historique du fonctionnement de la centrale de chauffe de l'hôpital qui produisait, jusqu'en 2007 de l'électricité à travers des turbines à vapeur ce qui a guidé le dimensionnement des installations en aval.

Néanmoins, abaisser la température de distribution de chaleur est essentiel pour intégrer des énergies renouvelables de manière centralisée à travers des pompes à chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire qui requièrent une température de 85 °C au maximum.

Ainsi, il est essentiel que les besoins de chaleur des procédés soient progressivement déconnectés des besoins de chauffage et d'eau chaude sanitaire et qu'ils disposent d'énergies renouvelables spécifiques à la haute température (>100 °C).

C'est dans ce contexte qu'est né le projet de chaleur solaire à haute température sur le bâtiment d'hospitalisation Gustave Julliard qui vise à démontrer l'intérêt et la pertinence de l'énergie solaire pour des applications de production de vapeur.

1.3 Objectifs du projet

Les objectifs du projet sont multiples :

- Réduction des consommations de gaz grâce à l'implémentation d'une installation solaire novatrice à haute température et génération de vapeur.
- Validation du potentiel d'utilisation de l'énergie solaire thermique dans un système industriel en eau surchauffée.
- Intégration de nouvelles techniques en milieu hospitalier.
- Validation technique d'équipements solaires standards pour une utilisation avec de l'huile thermique.
- Validation d'un concept de sécurité pour une installation classée ATEX en milieu hospitalier.
- Augmentation des compétences techniques et organisationnelles internes (gestion de projet, conception, exploitation).
- Implémentation test d'un outil de monitoring énergétique central qui pourrait être déployé plus largement au sein des HUG.



- Suivi et validation des performances de l'installation sur une période de deux ans après la mise en service avec un institut reconnu par l'OFEN.
- Sensibilisation, communication et publication au sein des HUG et au-delà.

L'installation devrait produire annuellement 250'000 kWh de chaleur et éviter l'émission de plus de 45 tonnes de CO₂.



Figure 2 : Vue d'ensemble du site hospitalier de Cluse Roseraie.

Ci-dessus, au centre le bâtiment Gustave Julliard avec l'installation solaire. En haut à droite, la centrale thermique (et sa cheminée) qui alimente l'ensemble du site en eau surchauffée.



2 Description des installations

L'installation est constituée de trois éléments principaux :

1. Une production de chaleur (capteurs solaires à haute température, max 171 °C selon consigne de sécurité)
2. Deux consommateurs de chaleur que sont la stérilisation centrale des HUG (consommatrice de vapeur) et un échangeur de chauffage.
3. Un système d'expansion à l'azote, servant également aux processus de remplissage et vidanges, y compris en cas d'urgence. Il comprend notamment une cuve au niveau 9 et deux cuves au niveau T.

L'installation est dépourvue de stockage de chaleur en raison d'un besoin continu de vapeur à la stérilisation centrale qui doit permettre de valoriser continuellement la chaleur produite et éviter des surchauffes de l'installation.

Le fluide caloporteur est de l'huile thermique Therminol XP. Cette huile a été sélectionnée sur la base de sa viscosité dans les températures basses (conditions hivernales extérieures) et de son point flash élevé, de 199 °C.

2.1 Production de chaleur (capteurs solaires)

La production de chaleur est constituée de 54 groupes de 4 capteurs solaires à tube sous vide (EuroSun DF 120) pour une surface brute de 528 m² et une surface d'absorption de 247.5 m².

Le choix des capteurs solaires a dû être revu en cours de projet. L'étude qui a orienté le choix est présentée au point 3.2 du rapport.

L'équilibrage des champs solaires est assuré par un raccordement hydraulique en Tichelmann pour combler l'absence sur le marché de vannes de réglages fonctionnant avec de l'huile thermique et dans cette gamme de température.



Figure 3 : champ solaire de l'aile Jura



2.2 Consommateurs de chaleur

La production de vapeur pour la stérilisation est assurée par un générateur de 158 kW produisant de la vapeur saturée à 2.8 bar et 141.8°C. Celui-ci produit de la vapeur en parallèle de trois autres générateurs alimentés, eux, par le réseau d'eau surchauffée des HUG. Le débit vapeur du générateur solaire est inférieur aux autres générateurs mais son injection dans le collecteur sera priorisée (favorisée) par une ouverture de la vanne d'injection un peu plus précoce que pour les autres générateurs.

Les conditions de production de vapeur sont $T = 141.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ pour 2.8 bar.



Figure 4 : Vue des générateurs de vapeur de la centrale OPERA



Figure 5 : Générateur de vapeur alimenté par l'énergie solaire à travers le réseau d'huile thermique.



L'autre consommateur de chaleur est plus conventionnel. Il s'agit d'un échangeur de chaleur de 250 kW sur un monobloc de ventilation, permettant de valoriser de la chaleur solaire dans des plages de température plus basses.



Figure 6 : Echangeur de chaleur entre l'installation solaire et le réseau de distribution de chauffage



2.3 Système d'expansion et vidange

Deux cuves en sous-sol (niveau T) permettent de récolter l'ensemble de l'huile de l'installation (par exemple en cas de maintenance). Ces cuves sont mises sous pression par un réseau d'azote alimenté par deux racks redondants. Ce système de cuves sous pression d'azote assure la fonction d'expansion.

Une cuve, au niveau 9 (sous la toiture), d'un volume de 2'350 litres, permet de récolter l'huile contenue dans les capteurs solaires. Elle entre en fonction en cas de vidange urgente pour mettre en sécurité l'installation et stopper l'apport de puissance solaire. Dans ce cas, dès qu'une consigne limite de sécurité est atteinte, l'installation est stoppée et l'huile contenue dans les champs solaires est évacuée dans cette cuve par la pression de l'azote.

En fonctionnement normal, l'azote est « consommé » par l'installation au gré des fluctuations de volume. La disponibilité de l'azote est surveillée à distance et un second rack d'alimentation assure la redondance.



Figure 7 : Cuves de rétention du niveau T. Le volume est de 2 x 5'960 litres



Figure 8 : Cuve de rétention du niveau 9



Figure 9 : rack d'alimentation en azote



Figure 10 : Liaisons hydrauliques entre les bâtiments Opéra et Julliard



Concernant le principe de fonctionnement, la puissance de l'installation dépend des conditions météorologiques et en particulier de l'ensoleillement direct. L'installation solaire peut délivrer cette puissance vers les deux consommateurs fonctionnant à des régimes de température différents.

Lorsque la puissance est suffisante pour atteindre une consigne de 145 °C en sortie des panneaux solaires, l'énergie disponible est utilisée pour générer de la vapeur. Lorsque le niveau de température ne permet pas la génération de vapeur (hiver et mi-saison), l'énergie est utilisée pour alimenter un échangeur de chauffage.

En raison des besoins importants de vapeur à la stérilisation centrale et son fonctionnement continu, toute la vapeur produite par l'installation peut être consommée en direct, sans stockage. Le générateur de vapeur joue un rôle de tampon.

Pour des températures extérieures basses et sans puissance à délivrer, le circuit d'huile reste en circulation pour des raisons de fluidité de l'huile. En effet, la viscosité à basse température est élevée et il est nécessaire de maintenir le circuit en mouvement pour permettre un redémarrage en cas d'ensoleillement élevé en période hivernale.

Dès que la température dans le circuit d'huile est suffisante pour être valorisé dans un consommateur, l'énergie est dirigée vers celui-ci.

Une procédure d'urgence automatique permet de vidanger les installations situées en toiture (capteurs solaires et collecteurs) dans une cuve au niveau 9 du bâtiment, soit un niveau sous la toiture. De la sorte, l'apport solaire est interrompu et la puissance devient nulle. Les risques de surchauffe (par exemple pour défaut de circulation ou absence de consommateur) sont limités. La vidange de l'huile est effectuée par l'injection d'azote depuis les racks.

Une procédure manuelle permet de vidanger l'ensemble de l'installation dans les cuves au niveau T en sous-sol (par exemple en cas de maintenance).

Une autre procédure manuelle permet la vidange de la toiture champs par champs.

La pression de l'installation est monitorée au niveau des champs de capteurs solaires (une sonde de pression par champs solaire) qui sont certifiés pour un usage à 3.5 bar maximum avec l'huile thermique. La régulation injecte de l'azote depuis les racks si la pression des champs solaires diminue ou à l'inverse évacue de l'azote par l'évent en cas d'augmentation de pression en toiture.

CHAMP SOLAIRE OUEST: zone de 14 groupes de 4+4 capteurs type DF 120-6 x 112 unités

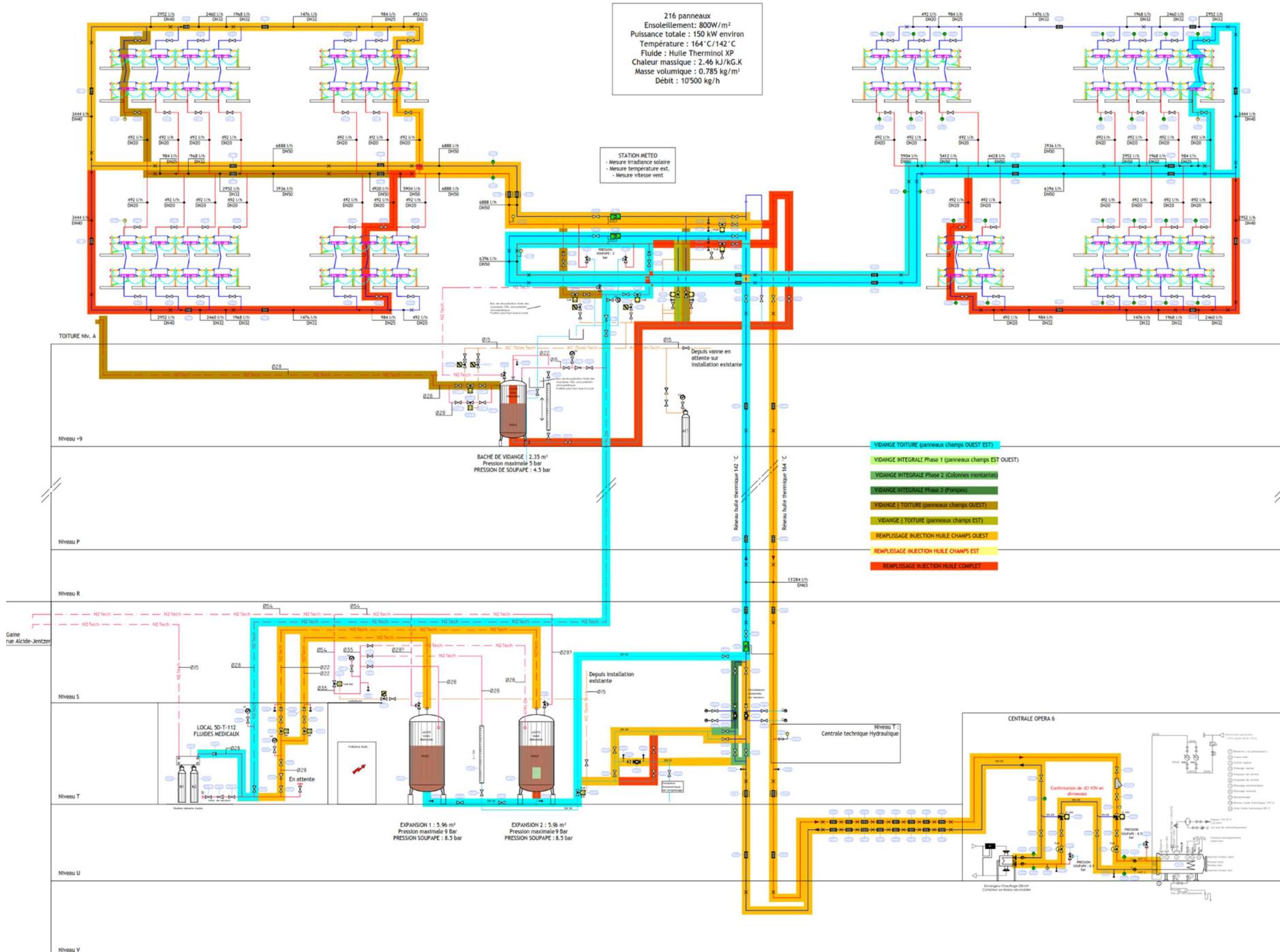


Figure 11 : schéma de principe hydraulique



3 Procédure et méthode

3.1 Déroulement du projet

Comme présenté au chapitre 1.1, cette installation solaire a été proposée en alternative aux panneaux solaires classique pour l'eau chaude sanitaire prévus initialement.

Afin de garantir une continuité dans le projet, les mandataires pour la construction du bâtiment ont été associés au projet solaire permettant d'aboutir à la finalisation du dossier : mise en soumission, schéma de principe, appel d'offre et adjudication.

Pour couvrir les surcoûts d'une telle solution et soutenir l'innovation énergétique, les HUG ont sollicité le service cantonal de l'énergie de Genève (actuellement Office cantonal de l'énergie) qui leur a octroyé, en 2013, un soutien financier à travers le fond cantonal pour le développement des énergies renouvelables et les économies d'énergie.

Durant cette phase d'étude, les HUG ont constaté que les solutions étaient limitées quant au choix des panneaux solaires à haute température. En effet, un seul fournisseur proposait un produit répondant aux critères exigés pour cette installation. Plusieurs solutions techniques ont été étudiées avec ce fabricant aboutissant à l'adjudication des installations hydrauliques.

Toutefois, les coûts se sont rapidement avérés supérieurs aux estimations nécessitant une renégociation de la répartition entre l'Etat de Genève et les HUG.

Le caractère pilote du projet, qui implique une part de risque et une nécessaire minutie technique, n'a pas favorisé pas un climat général serein déjà altéré par la redéfinition des rôles et responsabilités de chacun.

Une complication vint s'ajouter avec la faillite du fabricant des capteurs solaires. Après plusieurs investigations, le projet paraît stoppé en raison de l'absence d'alternative. Finalement, les HUG trouvent une expertise au sein d'une entreprise suisse qui propose d'étudier la possibilité d'homologuer un capteur à tube sous vide pour un usage avec de l'huile thermique. Le projet est relancé et la coordination technique est reprise, avec, comme enjeu supplémentaire l'homologation d'un nouveau panneau solaire à haute température pour une utilisation avec de l'huile thermique comme fluide caloporteur.

Une demande de subvention est alors adressée à l'OFEN. Cette demande acceptée implique quelques changements dans le projet pour assurer le monitoring de l'installation. Ceci ouvre par ailleurs de nouvelles perspectives aux HUG pour le monitoring énergétique global des sites HUG. Le projet pilote d'installation solaire à haute température devient alors également pilote en terme de comptage énergétique.

Une fois l'installation achevée, des tests ont pu être entrepris. Cette phase s'est révélée complexe en raison notamment de la difficulté à appréhender les écoulements d'huile et d'azote. Les scénarios de mise en sécurité ont été testés avant d'effectuer des tests de production. Le mode de génération de vapeur n'a été que brièvement testé à ce stade en raison des conditions météorologiques insuffisantes. Toutefois, quelques données de fonctionnement ont été acquises et les résultats sont présentés dans ce rapport.

3.2 Choix des panneaux solaires à la conception

Le projet initial prévoyait l'utilisation de capteurs SRB Energy UHV C1 pour une production de chaleur solaire à une température entre 105 et 170 °C avec un circuit d'huile thermique.

Début 2014, est apparu le fait que ces capteurs n'étaient plus livrables. L'entreprise suisse Energie Solaire SA a proposé le capteur Sunstar DF120-6 (SPF Test n° C1391) comme remplaçant potentiel du capteur SRB.



Il s'agit d'un capteur avec 6 tubes sous vide de diamètre plus important que les tubes sous vide usuels. Les raccords sont basés sur un système à bague de compression avec joint métal-métal.

Il est compatible technique pour une utilisation avec de l'huile thermique bien que n'étant pas certifié pour.



Figure 12 : Illustration du capteur solaire EUROSUN DF 120-6

La courbe de rendement (selon surface brute d'emprise) des capteurs est illustrée ci-dessous. Jusqu'à une différence de température (T_m =moyenne capteur ; T_a =ambiance) de 150 K le capteur EuroSun présente un rendement de conversion supérieur au capteur SRB. Au-delà, le capteur SRB est nettement plus performant (concentration par miroirs).

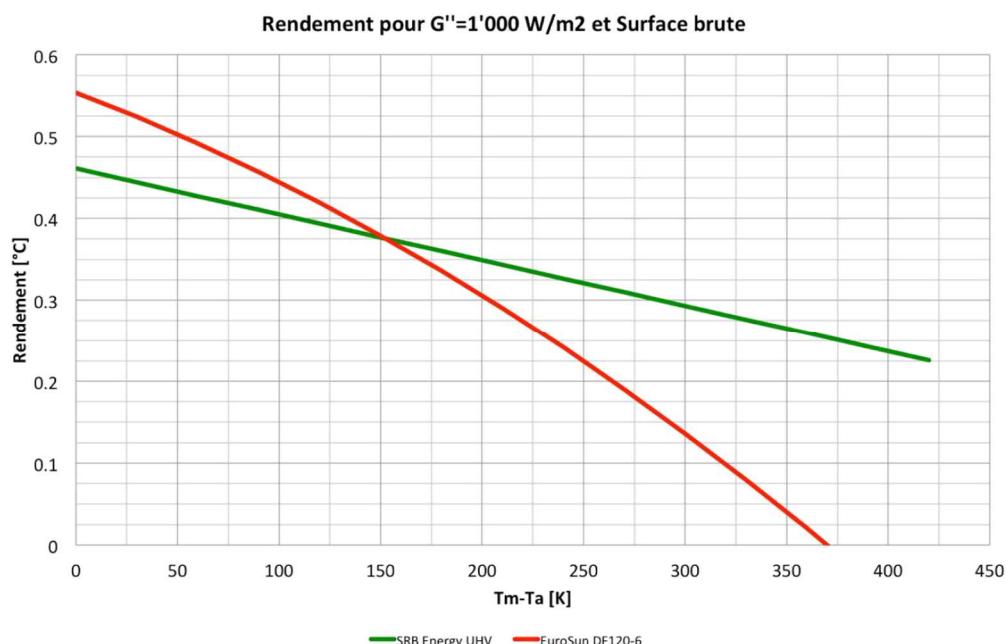


Figure 13 : Comparaison des rendements EUROSUN DF120-6 et SRB Energy UHV



Une différence de température moyenne de capteur de 150 K représente par exemple une entrée dans les capteurs à 140 °C et une sortie à 180 °C pour une température ambiante de 10 °C. Ces températures sont donc compatibles avec le projet.

Cependant, tant le capteur SunStar que le capteur SRB ont été testés à l'institut solaire suisse SPF avec de l'eau et non de l'huile thermique. Les capteurs solaires thermiques sont testés avec de l'eau (déminéralisée), suivant les indications de la norme EN12975-2) alors que, dans la pratique, un liquide caloporteur de panneaux solaires est composé d'un mélange d'eau déminéralisée avec environ 35% de mono propylène glycol.

L'utilisation d'une huile thermique à faible viscosité devrait, selon les indications des spécialistes du SPF, marginalement influencer la courbe de rendement du capteur (2-3% de variation possible).

Le rendement thermique brut permet de comparer la productivité théorique de capteurs à température moyenne fixe sur la base des données météo et de l'implantation projetée (orientation et inclinaison). Le capteur SRB est orienté Sud-25° et incliné à 5°. Le capteur SunStar est orienté Est-22° et les tubes sont orientés (rotation des tubes) de 25° vers le Sud.

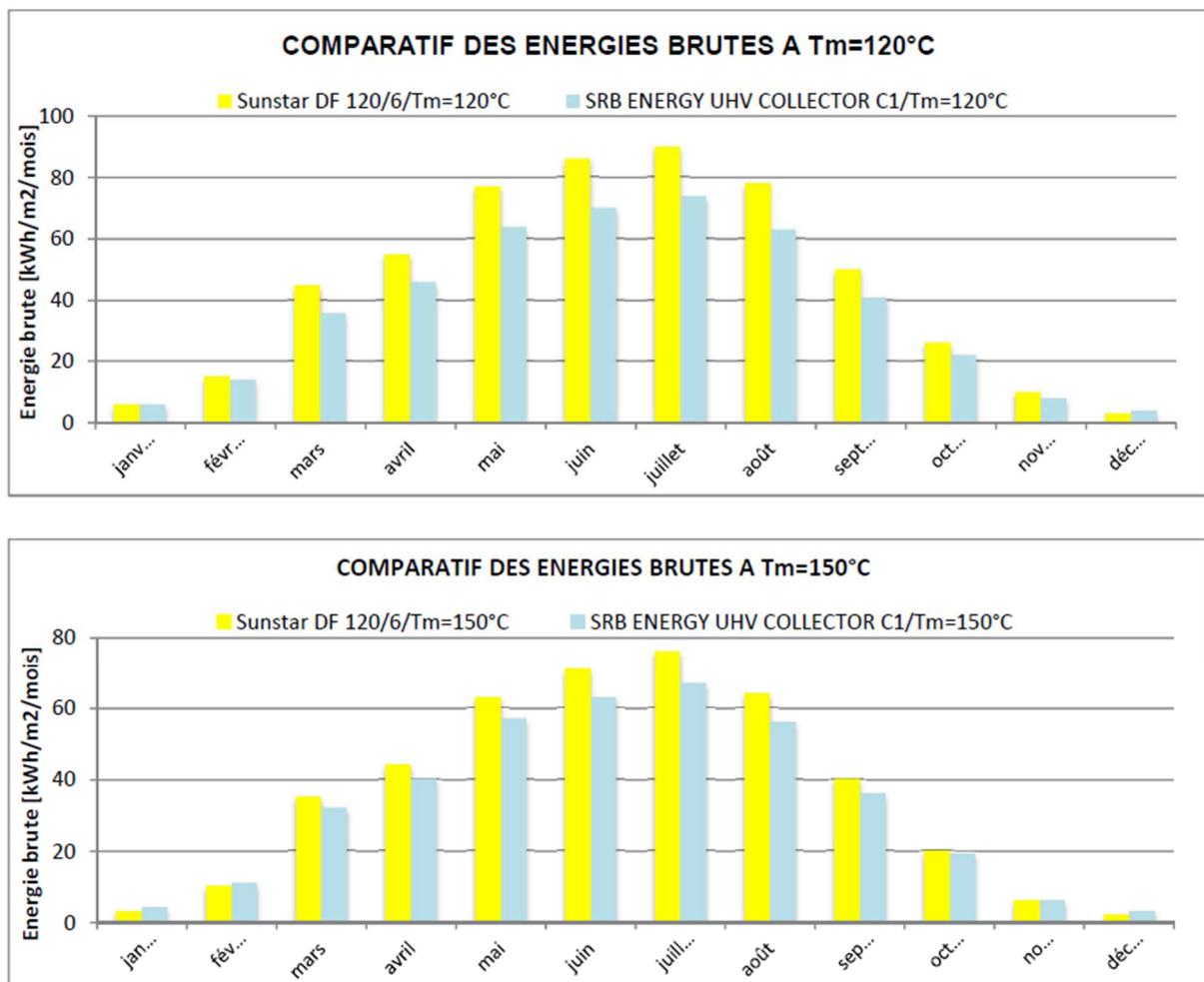


Figure 14 : Comparaison simulée des productions mensuelles

Le rendement thermique brut du capteur SunStar est supérieur à celui du capteur SRB dans la gamme de températures retenue pour le projet.



Le tableau ci-dessous indique le nombre de capteurs installables, les surfaces en jeu ainsi que l'énergie thermique brute capturable.

		EuroSun Sunstar DF 120/6	Δ	SRB Energy UHV Collector C1
Nombre de capteurs	<i>pces</i>	216		$136 - 4 = 132$ (obstacles)
Surface brute unitaire	<i>m²/capt</i>	2.446		4.775
Surface brute totale	<i>m²</i>	528.3	-16%	630.3
Surface d'ouverture unitaire	<i>m²/capt</i>	1.684		4
Surface d'ouverture totale	<i>m²</i>	363.7	-31%	528
Energie brute à Tm=150°C	<i>kWh/m²/an</i>	507	+28%	395
Energie brute à Tm=120°C	<i>kWh/m²/an</i>	623	+39%	448
Energie brute à Tm=150°C	<i>MWh/an</i>	267.8	+7%	249.0
Energie brute à Tm=120°C	<i>MWh/an</i>	329.1	+16%	282.4

Figure 15 : Différentiel de production en fonction de la puissance installable.

Du fait d'un ratio moins favorable entre surface d'ouverture et surface brute (69% contre 84%) la surface d'ouverture totale des capteurs SunStar est de 363.7 m² contre 528 m² pour les SRB (4 capteurs enlevés à cause des collisions avec les sorties en toiture) soit -31%.

En revanche son rendement thermique brut supérieur permet un apport supérieur de +7% pour une température de captage moyenne de 150 °C et de +16% pour une température moyenne de 120 °C.

Une simulation Polysun, effectuée avec le même profil de consommation, indique la production des panneaux solaires SunStar est inférieure de seulement 3% (-5 MWh/an) pour une surface d'ouverture des capteurs de -31%.

Dans le cadre du projet, les certifications suivantes ont été établies avec le SPF :

- ISO 9806 :2013 (rapport SPF C1655LPEN)
- ISO 9806 :2013 (rapport SPF C1655QPEN)
- ISO 9806 :2017 (rapport SPF X599ISO)

3.3 Modifications lors de la mise en service

Une fois l'installation achevée, des tests de mise en service ont mis en lumière des problèmes de circulations parasites entre l'azote et l'huile thermique et du sous dimensionnement des systèmes de récupération d'huile en sortie de soupape.

Des modifications hydrauliques ont dû être entreprises :

- Le contrôleur de niveau entre les cuves a été raccordé directement sur des prises en haut des cuves de façon à équilibrer la pression. En effet, des circulations parasites ont été identifiées lors des tests de fonctionnement et notamment lors des phases de remplissages et vidanges depuis ou vers les cuves du niveau T.
- Un bac de rétention a été installé à l'étage 9 et raccordé en sortie de soupape. Cette modification est motivée par le fait que, lors des tests, un incident s'est produit lors du démarrage des pompes. La pression de service admissible dans les panneaux solaires n'est que de 3.5 bar avec l'huile thermique (contre 6 bar pour une utilisation standard avec de l'eau glycolée). Dès lors, la soupape de sécurité en toiture est dimensionnée en conséquence. Un démarrage non progressif des pompes de circulation avec une consigne à 100% induit une décharge de la soupape. Un dégât



d'huile a été induit par cette décharge sur les coupe-feu entre étages. Pour éviter une répétition de cet incident, la soupape de décharge a été raccordée directement vers une cuve de rétention.



Figure 16 : Nouveau raccordement des cuves au niveau T suite à la modification.

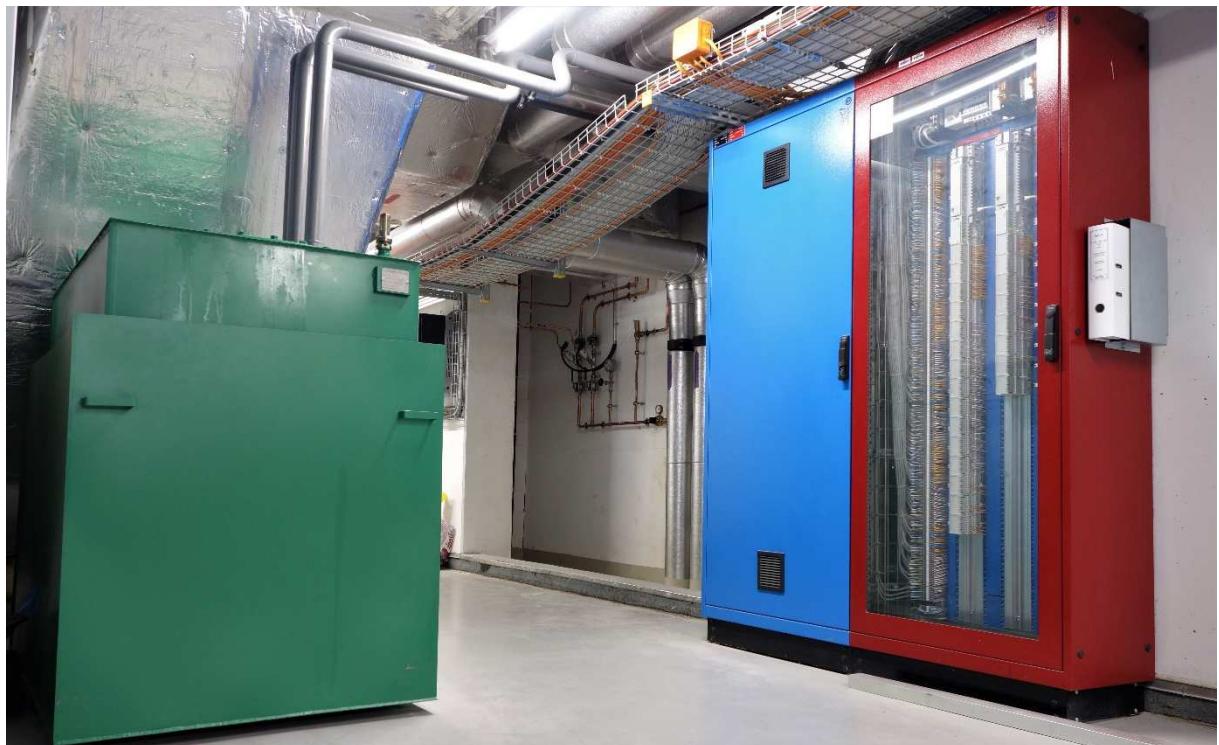


Figure 17 : Cuve de rétention en sortie de soupape.



3.4 Concept et tests de sécurité

Pour rappel, le fonctionnement de l'installation prévoit un mode de mise en sécurité par la vidange des capteurs solaires vers la cuve située au 9^e étage. Ainsi, la puissance solaire est maîtrisée ce qui limite le risque de surchauffe du fluide caloporteur. La vidange est effectuée par l'injection d'azote dans les capteurs solaires.

- En 2019, des tests de mise en sécurité ont été effectués avec les conditions et résultats suivants :
- La température de l'huile atteint 162 °C avant la vidange automatique en raison d'un bon ensoleillement (environ 500 Watts/m²).
- Après vidange automatique (durée poussée azote < 5 minutes), la température dans les panneaux est de 61 °C.
- Le niveau d'huile de la cuve au niveau 9 est monté de 26 cm, correspondant à une quantité d'huile d'environ 320 litres.
- A titre de comparaison, le volume contenu dans les panneaux solaires est de 368 litres. Au terme de ces tests, il est constaté que la température élevée en toiture a rapidement chuté à des niveaux acceptables, sans risque d'inflammation du fluide caloporteur.
- Une vérification en toiture révèle que la moitié des panneaux solaires (côté Jura) est exempte d'huile alors que l'autre moitié montre une présence d'huile résiduelle.

3.5 Tests de fonctionnement

En dépit des difficultés rencontrées à la conception, réalisation et mise en service, seuls quelques jours de tests de fonctionnement ont pu être réalisés. Néanmoins, plusieurs constats ont pu être établis.

L'installation fonctionne bien et permet d'atteindre rapidement des températures permettant de produire de la chaleur sur le consommateur à moyenne température (chauffage).

- La puissance disponible répond de manière très dynamique à l'ensoleillement direct.
- Les rangées de panneaux solaires ne semblent toutefois pas irriguées de manière homogène (les températures en sortie de certaines rangées peuvent différer de 10 à 20 degrés selon les modes). La conception de l'installation devrait théoriquement permettre un bon équilibrage naturel (boucle Tichelmann).
- Le brassage continu de l'installation, même hors période d'ensoleillement, pourra être limité aux températures extérieures basses pour économiser l'énergie électrique des pompes. En effet, il est constaté qu'avec des températures de l'ordre de 4 à 5 °C au matin dans les capteurs, il reste possible d'enclencher les pompes et mettre en circulation l'huile. Les modes de régulation seront affinés en ce sens.
- Avec des températures atteintes de l'ordre de 130 °C, un contrôle général de l'installation (tuyauterie, compensateurs, etc.) peut être réalisé et certains protocoles de mise en service établis.
- Avec des conditions météorologiques moyennes et seuls quelques passages avec un ensoleillement supérieur à 500 W/m², la température dans le réseau d'huile atteint 135 °C environ. Cette température étant inférieure à la consigne pour la production de vapeur, les vannes ont été forcées pour circuler dans le générateur de vapeur et tester ce dernier. La pression sera finalement insuffisante pour injecter de la vapeur dans le réseau alimentant la stérilisation centrale de l'hôpital (2.5 bar nécessaire).



3.6 Données de fonctionnement de l'installation

3.6.1 Températures et équilibrage

Sur le mois d'octobre 2020, quelques jours de test ont permis d'acquérir des données permettant de caractériser les performances et le bon fonctionnement de l'installation. Il sera nécessaire de poursuivre l'acquisition des données pour confirmer ces premiers résultats.

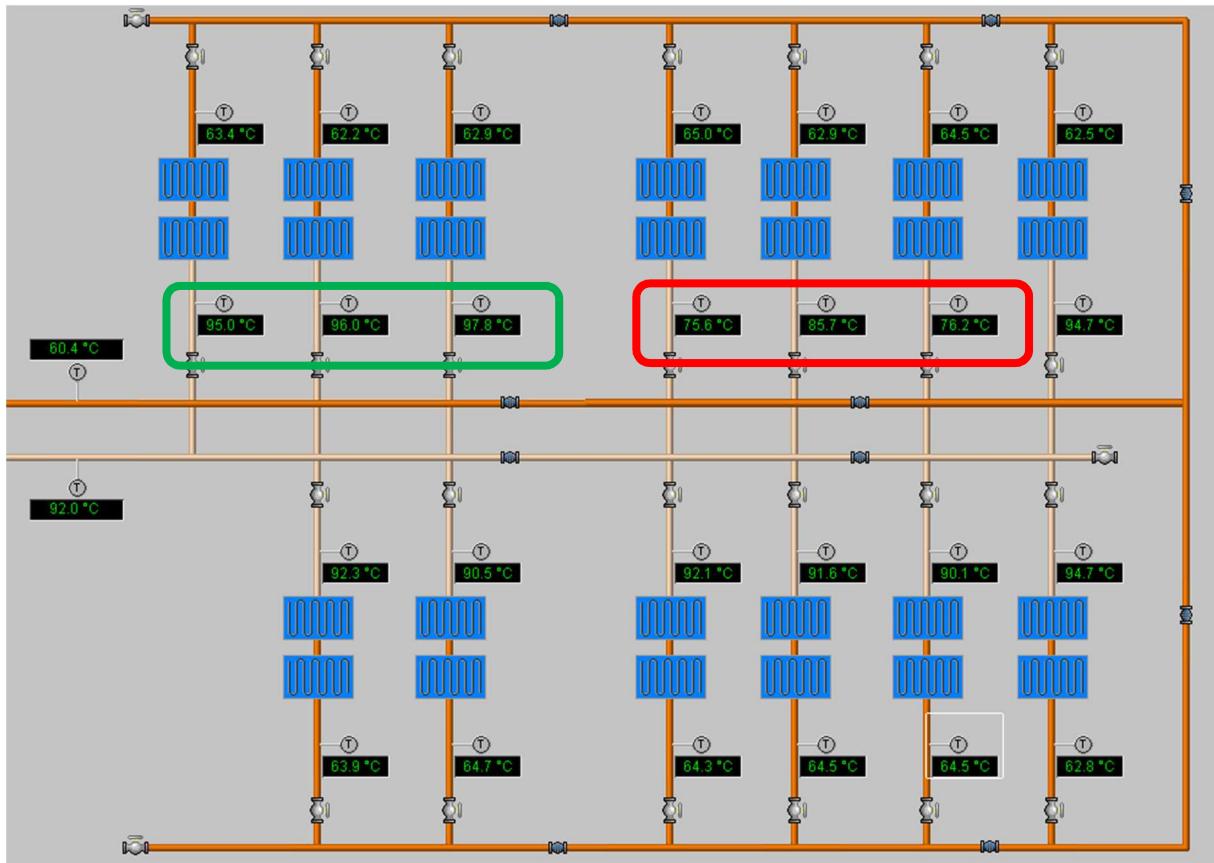


Figure 18 : 13.10.2020 13:38 : Détail des températures en entrée et sortie des capteurs solaires.

L'analyse des données extraites de la supervision permet de préciser l'inhomogénéité des températures et reflète en effet le DT plus faible de trois, particulièrement deux, rangées de capteurs. A contrario, trois rangées présentent systématiquement les DT les plus élevés.

Les raisons de ces différences ne sont pas précisément connues à ce stade. Néanmoins, on constate qu'au petit matin les températures sont homogènes (+-1K) ce qui permet d'exclure un problème de sonde de température. En revanche, il est plus difficile de définir si les variations de DT sont dues à des différences de débit ou des différences de captage du rayonnement solaire. Des investigations devront être menées pour préciser ces variations.

Une campagne de mesure sur l'autre champ de capteurs, non équipés de sondes de températures, devra aussi être mise en place.

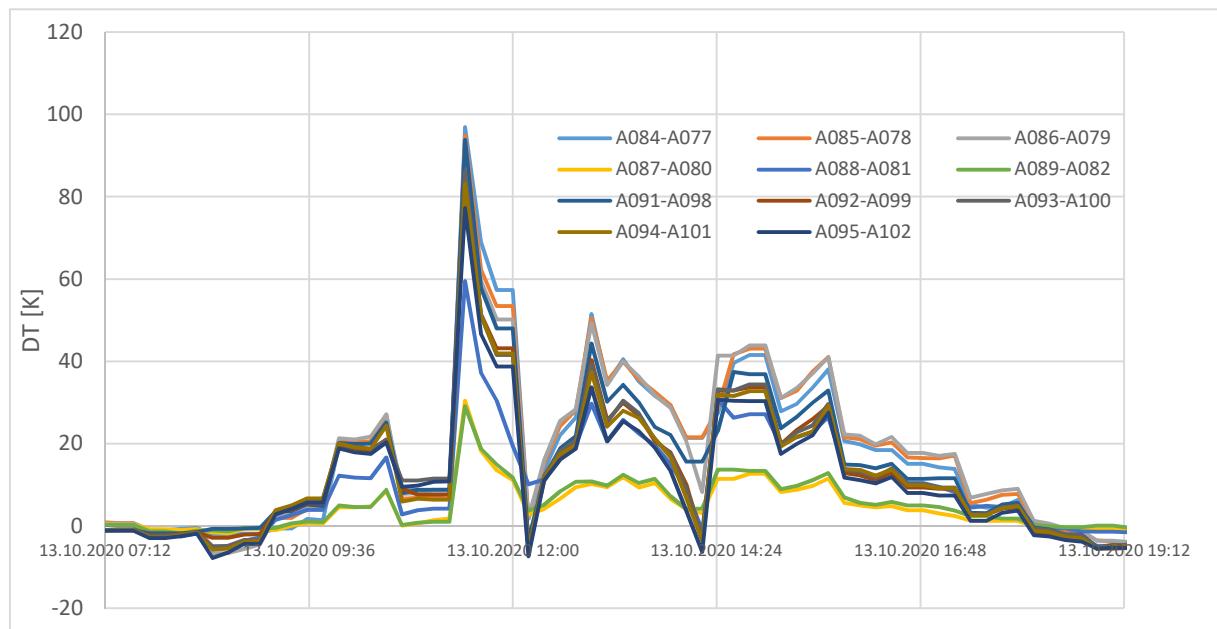


Figure 19 : Différence de température entrée-sortie par rangées de capteurs solaires.



3.6.2 Extraits de fonctionnement

Ci-dessous sont fournis quelques extraits de la régulation.

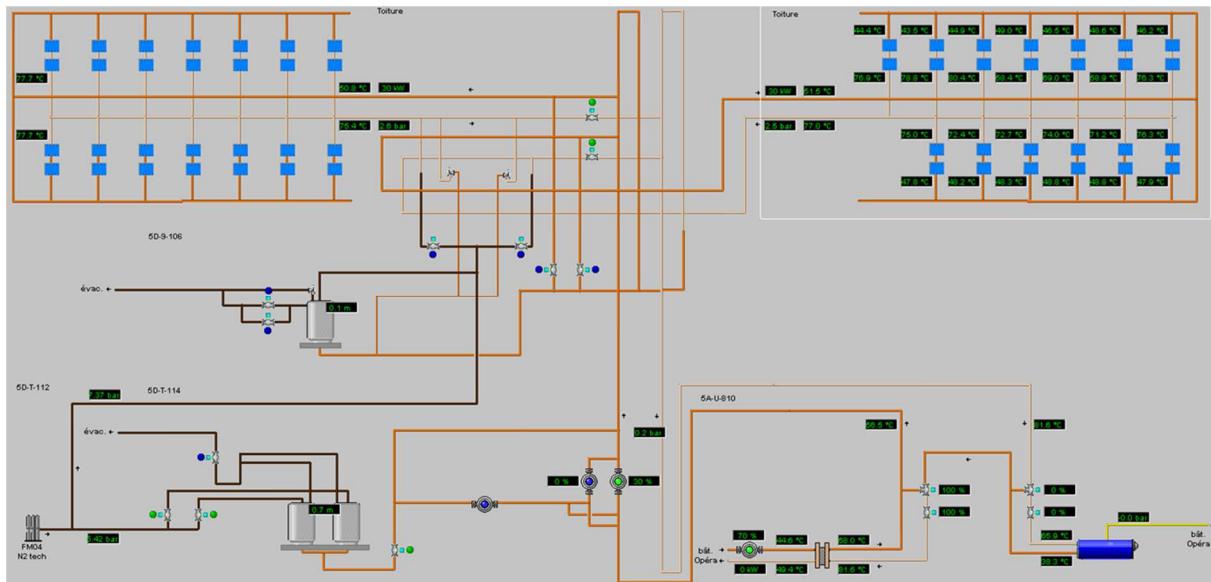


Figure 20 : 13.10.2020 16:04 : Production de chaleur sur l'échangeur de chauffage (60 kW).

La puissance entre les champs Jura et Salève est équilibrée (2x30 kW) de même que les températures sur le collecteur (75.4 et 77 °C).

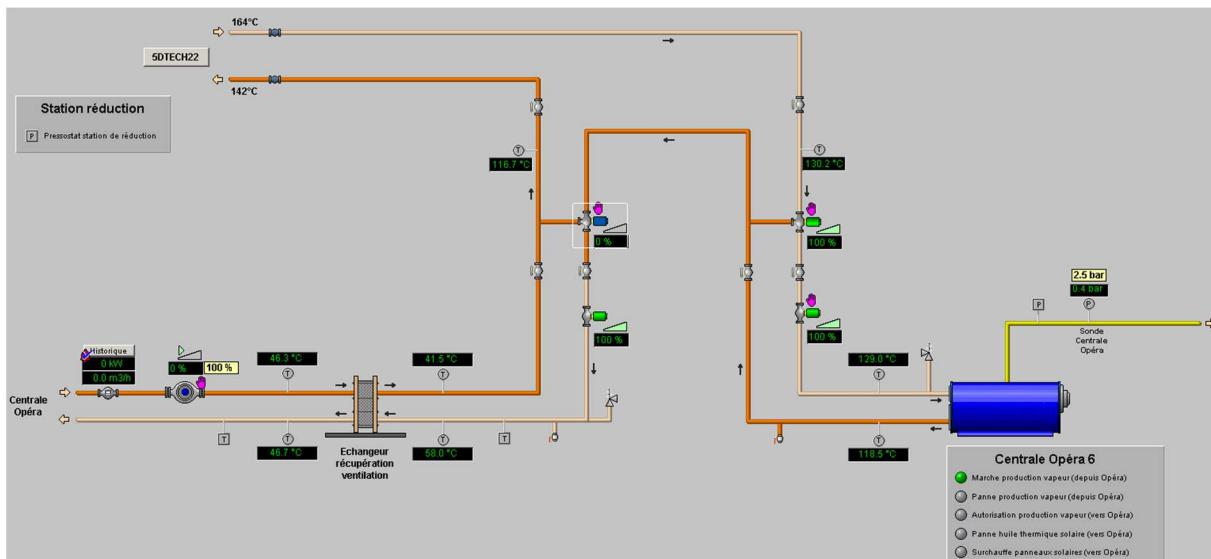


Figure 21 : 19.10.2020 15:03 : Génération de vapeur.

La consigne de 145 °C à l'entrée du générateur de vapeur n'est pas atteinte mais la position des vannes est forcée pour effectuer un test. L'ensoleillement se révèlera insuffisant pour injecter de la vapeur dans le réseau.



3.7 Suivi et monitoring

Dans le cadre de ce projet pilote, le suivi énergétique et le monitoring constituent un point central pour établir des bilans de performance et tirer des conclusions.

Plus généralement, au sein des HUG, ce sujet est un point faible qu'il est primordial d'améliorer en vue d'établir une démarche de management de l'énergie, au sens de l'ISO 50001 notamment.

Néanmoins, la question est complexe. En effet, et ceci est valable également pour ce projet, les HUG exploitent plusieurs systèmes de GTB comportant des données énergétiques statistiques qui s'ajoutent aux compteurs officiels des Services industriels de Genève (SIG).

- Au total, le volume de données se présente comme suit :
- 206 compteurs officiels SIG (électricité, gaz, eau, CAD)
- 10 compteurs d'installations solaires photovoltaïques
- Environ 100 sous-compteurs de chaleur
- Environ 80 sous-compteurs de froid

L'objectif de disposer d'un outil de monitoring pour l'installation solaire HT permettant de suivre et analyser les données de production de deux systèmes de GTB différents (Siemens et Johnson Controls) est crucial si l'on considère l'enjeu global du management de l'énergie des HUG.

Après analyse des solutions disponibles (souvent proposées par ces mêmes fournisseurs de GTB), il a été décidé d'utiliser l'outil SmartVisio des SIG en raison de :

- Sa capacité à intégrer des données sous forme de fichier CSV
- Les possibilités d'analyse offertes par cet outil et son libre paramétrage par l'utilisateur
- Le fait que les données des compteurs SIG et des installations photovoltaïques sont disponibles immédiatement sur cette plateforme.
- Sa capacité à exporter des données vers un tiers (ici le SPF)
- Les flux de données sont représentés sur le synoptique ci-dessous.

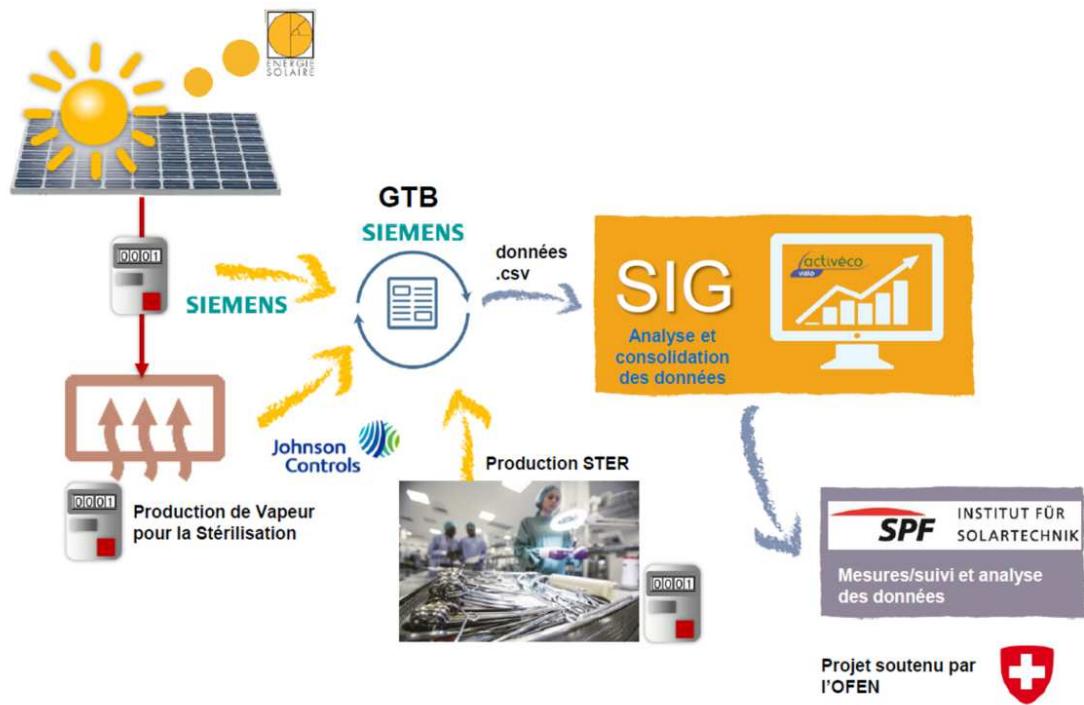


Figure 22 : Synoptique des flux de données.

Dès lors que des données suffisantes auront été collectées, il sera possible d'établir, de manière dynamique, un diagramme de Sankey représentant les flux de la manière suivante :

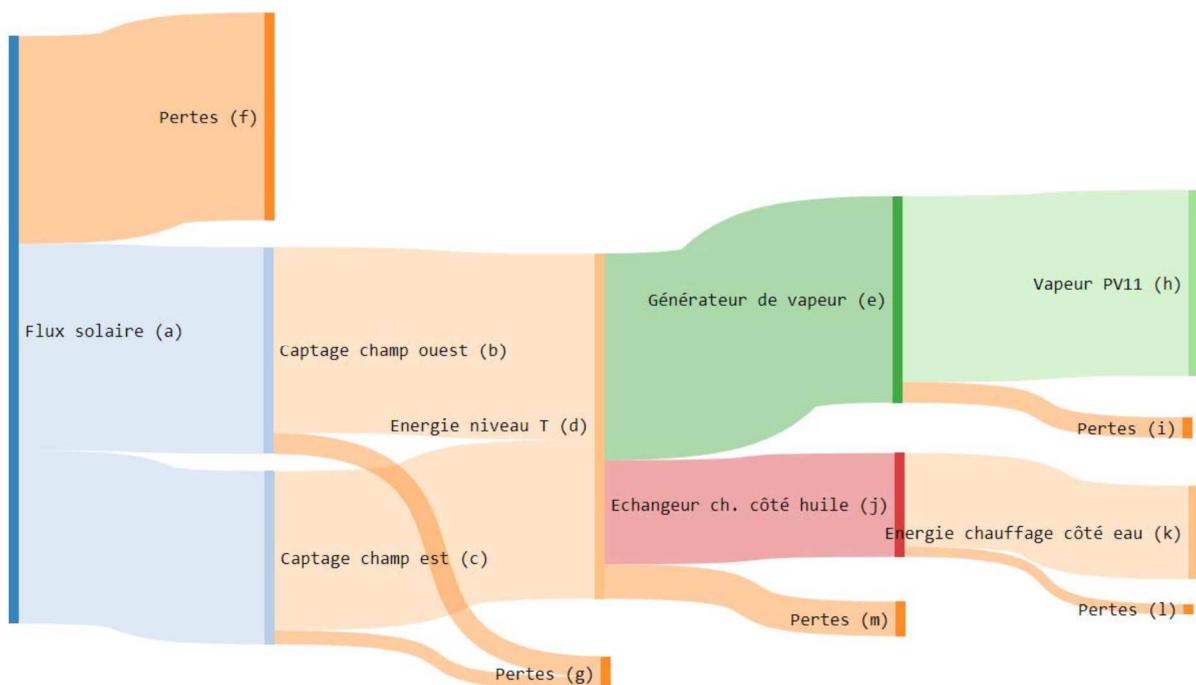


Figure 23 : Représentation en diagramme de Sankey des flux d'énergie



Les flux suivants sont mesurés directement par un organe de mesure :

- Flux solaire (a) est mesuré par un pyranomètre (station météo)
- Captage champ OUEST (b) est mesuré par un compteur de chaleur (A137)
- Captage champ EST (c) est mesuré par un compteur de chaleur (A138)
- Energie niveau T (d) est mesuré par un compteur de chaleur (T075)
- Vapeur PV11 (h) est mesuré par un débitmètre en sortie du générateur de vapeur
- Energie chauffage côté eau (k) est mesuré par un compteur de chaleur

Les flux suivants ne sont pas mesurés directement mais peuvent être estimés sur la base des organes en place (débitmètres, sondes de température et positions de vannes). En fonction de ces paramètres, le flux d'énergie est calculé par SmartVisio.

- Générateur de vapeur (e) n'est pas mesuré directement mais peut être estimé : position vanne U027, sondes de température U038 et U044, quantité d'énergie T075.
- Echangeur chauffage côté huile (j) n'est pas mesuré mais peut être estimé : position vanne U026, sondes de température U038 et U044, quantité d'énergie T075.



4 Résultats et commentaire

Pour rappel, sur le mois d'octobre 2020, quelques jours de test ont permis d'acquérir des données permettant de caractériser les performances et le bon fonctionnement de l'installation. Il sera toutefois nécessaire de poursuivre l'acquisition des données pour confirmer ces premiers résultats qui viendront enrichir les bilans de performance.

Les données disponibles de puissance de l'installation solaire ont été analysées en fonction du rayonnement solaire et de la température extérieure.

Il ressort de l'analyse que la puissance de l'installation ne semble pas en corrélation avec la température extérieure. Aucune tendance claire

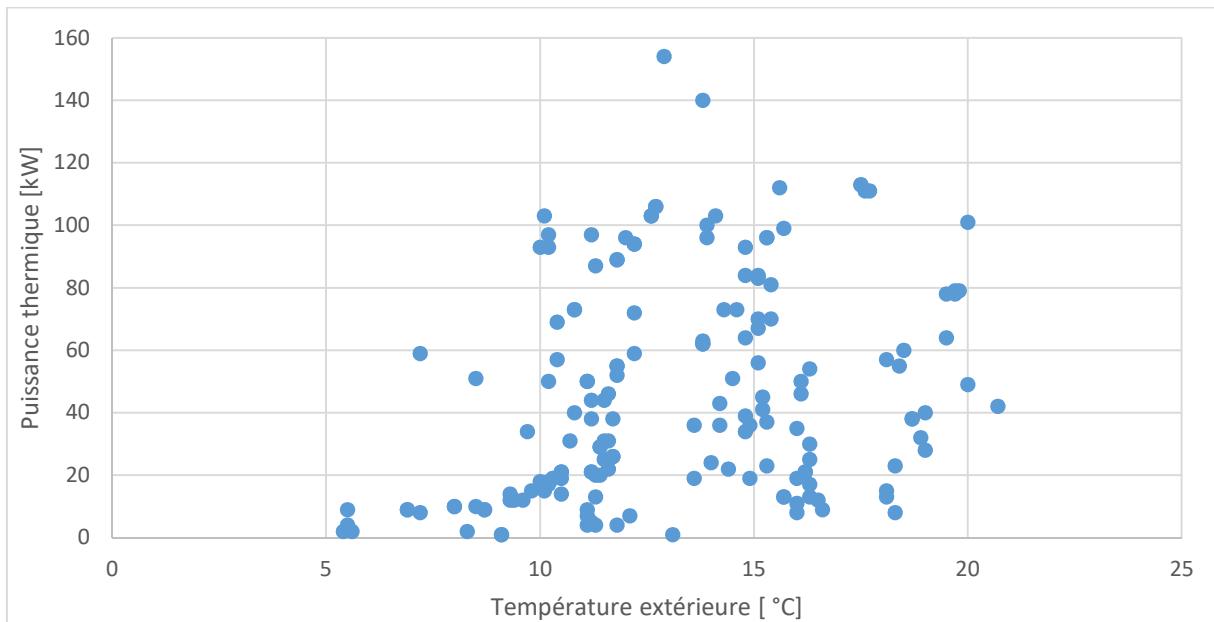


Figure 24 : Puissance thermique en fonction de la température extérieure

En revanche, même si les données sont assez dispersées, une tendance se dessine lorsque l'on analyse la puissance en fonction de l'ensoleillement. Le facteur R-carré est toutefois assez faible.

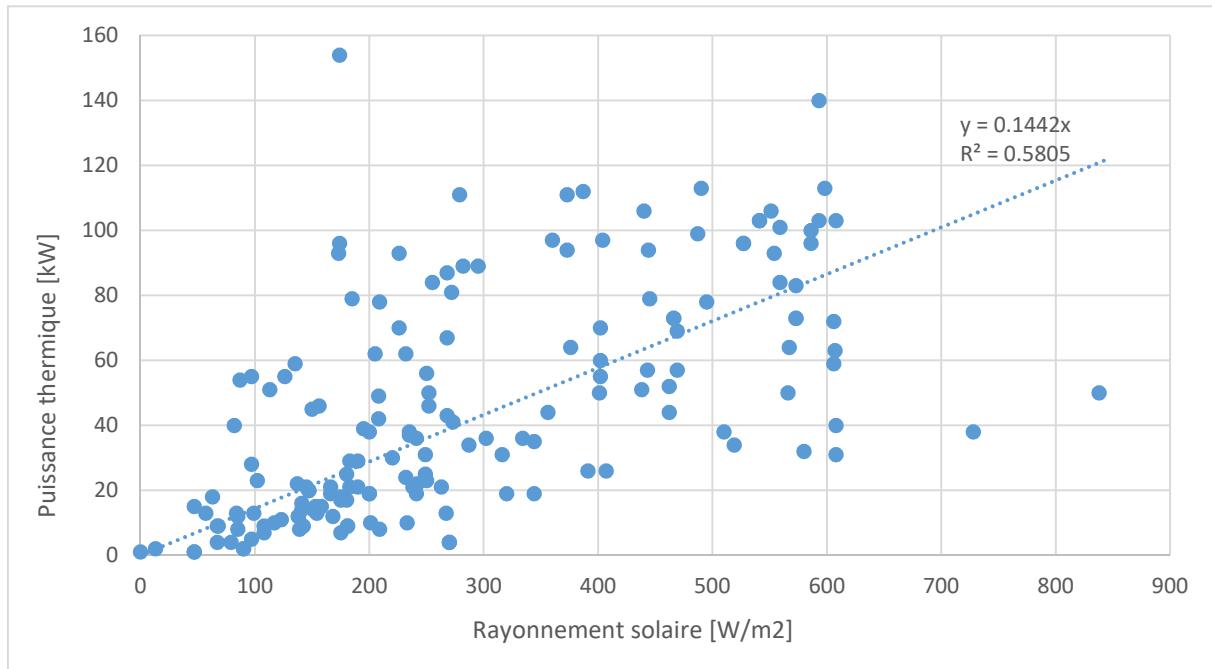


Figure 25 : Puissance thermique en fonction du rayonnement solaire

En procédant à une agrégation journalière des données, on obtient la corrélation ci-dessous.

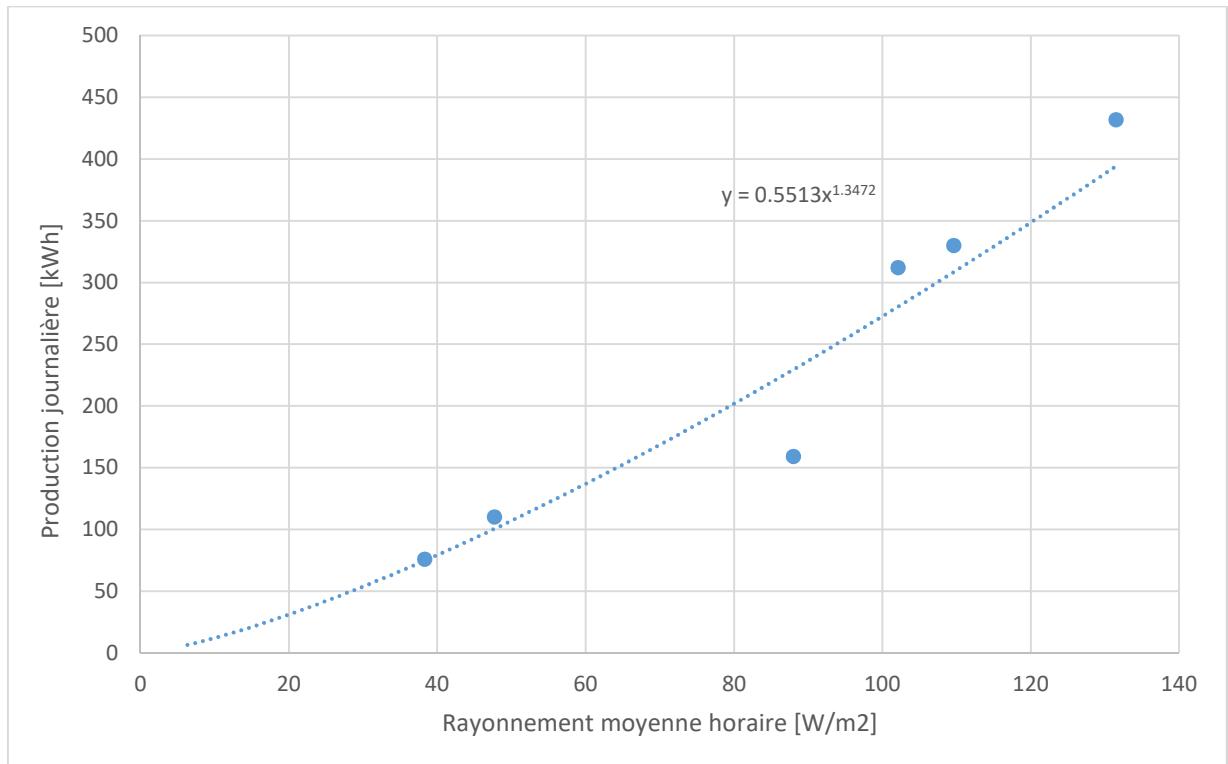


Figure 26 : Production d'énergie journalière en fonction du rayonnement solaire



Partant de cette corrélation, nous avons pu extrapoler la production annuelle.

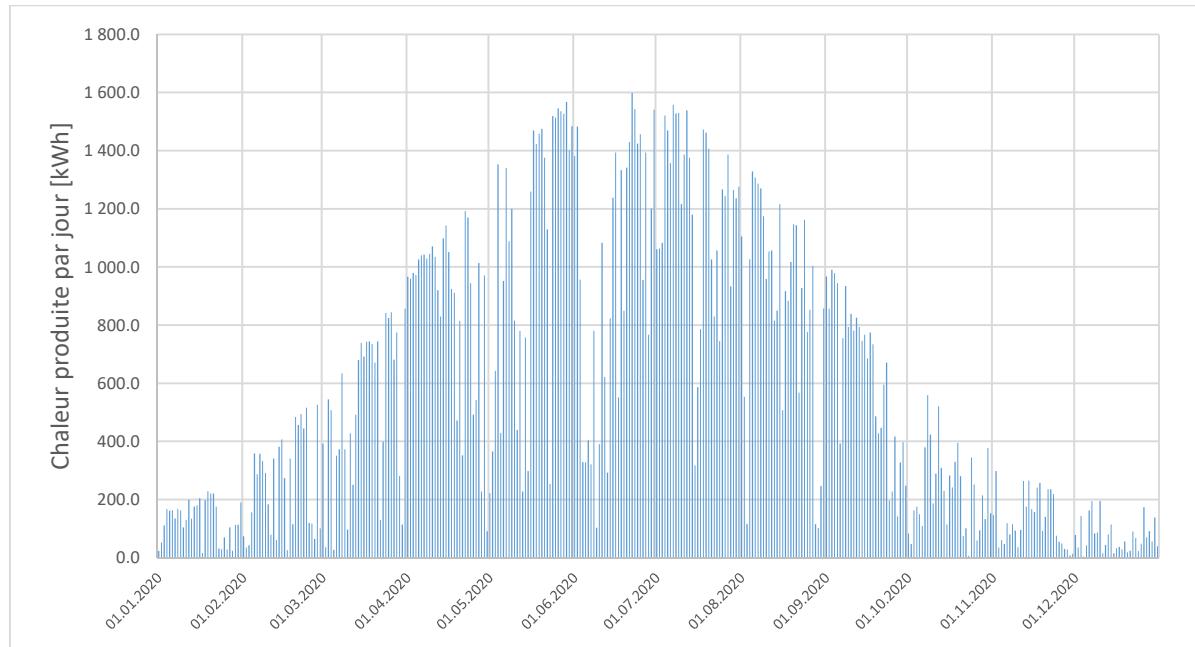


Figure 27 : Production journalière extrapolée sur l'année 2020

Le bilan d'énergie produite annuellement selon cette extrapolation est de 212'817.8 kWh.

Les limites de cette estimation sont toutefois évidentes :

- Les données utilisées pour construire le modèle ont été acquises à la mi-saison uniquement (octobre 2020) et nous ne connaissons pas la dynamique du système aux saisons extrêmes (été et hiver).
- La production de vapeur n'a pas été effective durant la période de tests.
- Le volume de données collectées est faible.

Néanmoins, le bilan annuel extrapolé s'établit dans les mêmes ordres de grandeur que l'estimation initiale de 254'000 kWh thermiques.



5 Conclusions et résumé

Outre le défi technique, l'organisation et la capacité à suivre un projet sur le long terme sont essentiels pour un tel projet pilote qui, après 7 ans de développement et travaux, n'est pas entré définitivement en production.

Lors de la conception, il a fallu notamment réorienter le choix des capteurs solaires et implémenter une technologie qui n'était pas prévue pour une utilisation à huile thermique.

Lors de la période de tests, des modifications de l'installation ont dû être effectuées pour corriger des défauts de circulations complexes entre l'huile et l'azote qu'il était difficile d'appréhender initialement.

Les conditions météorologiques ont représenté une variable importante dans la planification des tests lors de la mise en service impliquant cinq sociétés différentes.

Ces précédents exemples impliquent des semaines, voire des mois, de délais pour être solutionnés et illustrent la nécessité de pouvoir garantir cette continuité au projet.

Plusieurs contributions significatives du projet sont à relever pour les HUG ou plus largement pour tout client industriel :

- Les panneaux solaires EuroSun DF120-6 ont été testés au SPF et certifiés pour un usage avec de l'huile thermique
- Un système de monitoring a été implanté et permet de valoriser des données émanant de différents systèmes d'automatisme du bâtiment. Ce système est à présent plus largement utilisé aux HUG pour monitorer d'autres installations.
- Concernant l'installation, les tests de mise en sécurité ont été validés et les premiers tests de fonctionnement laissent imaginer que les performances calculées à la planification peuvent être atteintes.

Pour les années 2022 et 2023, il est prévu de résoudre les dernières difficultés techniques et reprendre les tests de production qui alimenteront les bilans énergétiques.



6 Aperçu et mise en œuvre prochaine

A la fin 2021, les derniers problèmes techniques d'étanchéité des champs solaires sont résolus au niveau des raccords entre panneaux solaires. Deux capteurs présentent des fuites au niveau des collecteurs internes et doivent être remplacés intégralement.

Dans l'attente de ce remplacement, les rangées de capteurs incriminées sont condamnées pour permettre la poursuite des tests et mises en service.

Durant les années 2022 et 2023, le suivi de l'installation sera périodiquement documenté et partagé avec l'OFEN.

7 Coopération nationale et internationale

Au niveau national, on peut relever les collaborations suivantes :

- Energie solaire SA pour le choix des capteurs solaires, l'analyse sur les différentes huiles calorifiques et la fourniture des panneaux solaires.
- SPF pour le concept de mesure et suivi, la certification des capteurs solaires à 3.5 bar.
- SIG pour la mise en œuvre d'un outil de monitoring énergétique
- Collaboration avec les organismes AEAI, ASIT et SwissTS pour la certification de l'installation.

Au niveau international, on peut relever la collaboration avec le fabricant EuroSun pour la fourniture des panneaux et la certification à 3.5 bar en usage avec de l'huile thermique.

8 Communication

Durant le projet, plusieurs actions de communication ont eu lieu autour du projet :

- En 2017, un article est paru dans la Tribune de Genève au sujet de la culture d'innovation des HUG. Le projet a été pris en exemple.
- Un évènement du Club SIG Energies s'est tenu aux HUG en octobre 2018. A cette occasion, le projet a été présenté au public de cet évènement qui s'adresse aux grands clients d'électricité des SIG.
- Le groupe GNi (Gebäude Netzwerk Initiative) a tenu un séminaire aux HUG durant lequel le projet a été présenté par HUG et l'entreprise Siemens.
- Dans la dernière brochure publique des HUG Vision 20+5, l'installation solaire a servi de cadre à une photo prônant les actions en matière de durabilité.