



Abschlussbericht vom 31. Januar 2024

DER FREIKOLBEN-RESONANZSTIRLING

P + D PROJEKT: BAU UND EINSATZ VON 7 FELDTESTGERÄTEN



Quelle: © Schmid Stirling GmbH, 2022



Datum: 31. Januar 2024

Ort: Thörishaus

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

VSG – FOGA
Verband d. Schweizerischen Gasindustrie
Grütlistrasse 44
8000 – Zürich

KLIMASTIFTUNG SCHWEIZ
V. Eckert
vincent.eckert@klimastiftung.ch
www.klimastiftung.ch

Subventionsempfänger/innen:

Schmid Stirling GmbH
Freiburgstrasse 830
CH – 3174 Thörishaus
www.stirling.ch

HEIG - VD

Prof. Roger Röthlisberger (IGT)
Avenue des Sports 20 – CP521
1401 Yverdon-les-Bains
roger.roethlisberger@heig-vd.ch

Autor/in:

Rolf Schmid, Schmid Stirling GmbH
Jean-Pierre Budliger, Consultant
Michael Anderegg, Schmid Stirling GmbH

rolf.schmid@stirling.ch
jean-pierre.budliger@infomaniak.ch
michael.anderegg@stirling.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz Cleantech, Pilot- und Demonstrationsprogramm, BFE, Men.Wirz@bfe.admin.ch
Stephan Renz Verbrennungsbasierte Energiesysteme, BFE, info@renzconsulting.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501934-01
FOGA-Projekt Nummer: 0506
Klimastiftung Schweiz Projekt: 2018-030

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Mitte der 70-er Jahre entwickelte W. Beale bei Sunpower (USA) erstmalig einen Stirling-Freikolbenmotor mit elastisch eingespannten, frei beweglichen Kolben. Diese sind seitlich durch Gaslager geführt und brauchen nicht geschmiert zu werden. Kleine Wärme-Kraft-Kopplungen (WKK)-Geräte können serienmässig hergestellt und mit minimaler Wartung langfristig betrieben werden. Die Nutzung der kombinierten Strom- und Wärmeproduktion ist ideal angepasst, um einen Teil des europäischen Heizungsmarktes abzudecken.

Mit grossem, privatem Aufwand wurde ein neues **Freikolben-Resonanzstirling-Konzept** entwickelt, bei welchem der Verdränger mit dem Motorkolben fest verbunden ist. Zusätzliche Resonanzkolben erzeugen hohe Druckänderungen und schwingen einwandfrei stabil, phasenverschoben zum Hauptkolben. Anhand von Prototypen (SFM2) konnte Strom mit über 25% elektrischem Wirkungsgrad erzeugt werden, bei einem Gesamtwirkungsgrad (Strom + verfügbare Wärme) von 90%. Diese doppelte Nutzung ist energetisch optimal und wirtschaftlich interessant, was dieser Technik einen verbreiteten Einsatz ermöglicht und der Forderung der MuKE entspricht.

Im Rahmen des laufenden P+D-Projektes wurden 7 verbesserte Feldtestgeräte (SFM3) hergestellt, wovon 5 bei privaten Kunden installiert und unter verschiedenen Einsatzbedingungen langfristig erprobt wurden. Die Freikolben-Resonanzstirling, mit nominaler elektrischer Abgabeleistung von 2 kW_{EL}, mussten den Erfordernissen der zu beheizenden Gebäuden und ihren bestehenden Heizkreisläufen angepasst werden: mit/ohne Spitzenlastheizung, Solaranlagen und ergänzenden Regelkreisläufen.

Der Betrieb dieser Feldtestgeräte wurde laufend überwacht und die gemessenen Hauptparameter (Gasverbrauch, Temperaturen, Druck, Kolbenhöhe, Kühlwasser- und, Brennerluftstrom, Schadstoffe in den Abgasen, etc.) protokolliert. Die verschiedenen Feldtestgeräte können miteinander verglichen und optimal bedient werden.

Im Laufe der vergangenen 2 Jahre wurden die Feldtestgeräte gesamthaft während 40'000 Stunden betrieben, oder jedes durchschnittlich etwa 6000 Stunden lang. Die Mechanik der Freikolben funktionierte zuverlässig und eignet sich für ihren erwarteten, langzeitigen Betrieb. Die gekapselten Feldtestgeräte zeichnen sich durch geringe Vibrationen und Lärm aus, was ihren Einsatz in bewohnten Gebäuden begünstigt. Bei einigen Einheiten traten an den Erhitzerköpfen geringe Leckagen auf, was vorerst durch Nachspeisen von Arbeitsgas kompensiert wurde. Diese stark beanspruchten Erhitzerköpfe wurden anschliessend mit erhöhter Wandstärke ausgeführt und an allen Feldtestgeräten ersetzt.

Die Einheiten wurden mit einem kommerziell verfügbaren FLOX-Brenner bestückt, bei welchen die Abgase intern rezirkuliert werden. Die kontinuierliche Verbrennung findet bei Temperaturen über 800°C statt. Sie ist vollständig und zeichnet sich durch Abgase mit geringem Schadstoffgehalt aus, die den bei uns für Wohnquartiere geltenden Normen entsprechen. Die verwendeten Brenner umfassen einen Wärmetauscher für die Luftvorwärmung, eine Steuerung und ein Startmodul, die für andere Einsätze ausgelegt sind. In Zukunft sollten diese neugestaltet und den Anforderungen des Freikolben-Resonanzstirling besser angepasst werden.

Zur Industrialisierung müssen alle Komponenten serienmässig, möglichst kostengünstig hergestellt werden. Dank optimaler Nutzung der Brennstoffe stellt das neue WKK-Konzept ein vielversprechendes, marktgerechtes Produkt dar. Die bei hohen Temperaturen freigesetzte Verbrennungswärme wird genutzt, um Strom zu produzieren, welcher hauptsächlich während der kalten Jahreszeit anfällt, wenn grosser Mangel herrscht.

Der Freikolben-Resonanzstirling erfüllt bei kleinen Motoreinheiten zum ersten Mal alle notwendigen Charakteristiken, es besteht praktisch keine Konkurrenz. Für die Energieversorgung kleiner Wohneinheiten liegt eine gleichwertige Lösung zu den elektrisch betriebenen Wärmepumpen vor.

Durch die effiziente, gesetzlich vorgeschriebene Lösung können mit WKK 40 bis 50% Primärenergie gegenüber fossilen Heizungen eingespart werden. Werden dem Erdgas 30% erneuerbare Gase beigemischt (nach VSG bis 2030) wird der CO₂-Ausstoss sogar um 65 bis 70% gesenkt.



Résumé

Il y a 50 ans, W. Beale de Sunpower (USA) concevait un moteur Stirling à pistons libres, suspendus élastiquement. Ces pistons sont guidés latéralement par des coussins à gaz et ne sont pas lubrifiés. Des unités de couplage chaleur-force (CCF) sont ainsi produites en série, fonctionnent durablement avec un minimum de maintenance. La production combinée de courant électrique et de la chaleur est idéalement adaptée pour le marché des équipements de chauffage européen.

La variante du moteur **Stirling à résonance**, qui avait été développé à titre privé, comprend un piston-déplaceur fixé solidairement au piston moteur. Des pistons de résonance additionnels oscillent de manière stable et induisent une variation périodique au gaz de travail. Les prototypes réalisés durant la phase préalable (SFM2) fonctionnent avec un rendement électrique supérieur à 25% et un rendement global (chaleur utile + courant électrique) de 90%. L'économie d'énergie réalisée par ce couplage est substantielle et promet une vaste diffusion de cette nouvelle technologie.

Au cours du présent projet P + D, 7 machines d'essai ont été réalisées dans une version améliorée (SFM3), dont 5 unités ont été installées chez des clients particuliers, puis exploitées sous différentes conditions durant de longues périodes. Ces machines d'une puissance nominale de 2 kW_{EL} ont été adaptées aux conditions particulières des réseaux de chauffage, qui en partie comprennent un brûleur d'appoint ainsi qu'aux systèmes de réglage existants.

Le service de ces installations est surveillé en continu et les paramètres mesurés (consommation de gaz, puissance électrique dégagée, températures, pression du gaz de travail, amplitude des pistons, dégagement de chaleur, débit et qualité des effluents etc.) sont enregistrés. Les différentes installations peuvent ainsi être comparées entre elles, permettant d'optimiser leurs régimes de fonctionnement.

Durant les 2 années d'essai, ces machines ont fonctionné au total durant 40'000 heures, en moyenne durant 6000 heures par machine. Toute la partie mécanique de ces pistons s'avérait hautement fiable, laissant prévoir de longues périodes de service. Chaque unité est placée dans une enceinte hermétiquement fermée et fonctionne avec un niveau de vibration ou de bruit remarquablement faible, ce qui favorise leur application dans des bâtiments habités. Le récepteur chaud de ces unités est porté à des températures de l'ordre de 800°C. Sur plusieurs unités, de faibles fuites sont apparues, qui d'abord ont pu être compensées par une injection de gaz de travail. Par la suite, les récepteurs chauds de toutes les machines ont été remplacés par des modèles d'une conception plus robuste.

Les unités ont été équipées avec des brûleurs FLOX commerciaux, comprenant un circuit de recyclage interne des gaz de combustion. La combustion a lieu à des températures supérieures à 800°C dans un milieu uniforme ; elle est complète et les effluents sont chargés d'un minimum de polluants. Les brûleurs actuellement utilisés comprennent un échangeur de chaleur pour le préchauffage de l'air de combustion, un système de contrôle ainsi qu'un dispositif de démarrage qui avait été conçu pour d'autres applications. Cet ensemble devrait à l'avenir être remplacé par une configuration mieux adaptée aux conditions du moteur Stirling à pistons libres.

A l'avenir, les composants d'un produit commercial devront être réalisés à faible coût. Ces unités de CCF, qui se distinguent par leur rendement énergétique élevé, se prêtent idéalement pour le marché des équipements de chauffage : en complément à la chaleur dégagée, du courant électrique est produite, surtout durant la saison froide, contribuant ainsi à réduire le déficit hivernal.

Les petits moteurs thermiques réalisés sur le principe du Stirling à résonance se distinguent par leurs caractéristiques favorables, connaissant pratiquement aucune concurrence. Les unités CCF équipés de ces moteurs représentent une solution alternative aux pompes à chaleur électriques.

Ces unités CCF répondent aux exigences légales et permettent d'économiser 40 à 50% d'énergie primaire par rapport aux chauffages traditionnels. En utilisant un gaz combustible comprenant 30% de gaz renouvelables (prévu par ASIG en 2030), les rejets de CO₂ sont réduits de 65 à 70% par rapport à ces systèmes habituels.



Summary

50 years ago, W. Beale at Sunpower (USA) conceived a Stirling engine with free-pistons which are elastically suspended. These pistons are guided laterally by gas bearings and do not need to be lubricated. Combined heat and power units (CHP) which are equipped by these engines can be operated for long time periods with a reduced maintenance demand. Their electric power output is an ideal asset upon the future European heating equipment market.

In an important private development effort, a new **free-piston resonance Stirling** concept was conceived, in which the displacer is firmly connected to the power piston. It comprises additional resonance pistons which oscillate in a stable mode, inducing an important pressure swing to the working gas. Prototypes built during the SFM2-phase operated at electric efficiencies of 25%, with total efficiency (heat + electricity) exceeding 90%. The fuel is used economically, promising a widespread application of this technology.

During the present P + D – project, 7 units were built according to an improved design (SFM3). 5 units were installed in private premises and run under locally prevailing conditions for long service periods. The engines, delivering a nominal electric power of 2kW_{EL} had to be operated according to the heat demand, depending upon the heat distribution scheme, and complying with possible presence of peak power burner or solar heating facilities.

The engine operation and major system parameters (gas consumption, electric output, temperatures, working gas pressure, piston strokes, burner air flow rate, flue gas quality) were continuously monitored. The recorded data serve to compare the performance of the engines and to determine optimal operating conditions.

The engines were operated during 2 years, in total for 40'000 hours, at an average of 6000 hours per unit. Their mechanical part operated very reliably, and long service periods with minimum maintenance demand may be expected. The engines are placed within a confinement and operate with low vibration or noise, well suited for their application in residential homes. The heat receiver of these engines operates at temperatures of approximately 800°C . By this exposure, minute gas leakages appeared on some heater heads, which at first were compensated by refilling working gas. It was then decided to replace all engine heater heads by a more robust design.

The engines are equipped with commercially available FLOX – burners, in which the flue gas is recycled internally. The complete receiver head is exposed to high temperatures, ensuring a complete combustion to be achieved with flue gases charged with minimal amounts of pollutants. These burners also comprise a heat exchanger for preheating the combustion air, a control system as well as a starting unit. The existing sets were conceived for other applications. In future, this complete heating equipment will have to be redesigned, well suited for its service operation of a Stirling engine.

All components will then need to be adjusted for their production at an industrial scale, at low cost. In Micro-CHP units, fuel is used at high efficiency; electric power is produced essentially during the cold season, covering the lacking supply from other resources.

The free-piston resonance principle shows highly favourable characteristics as compared to other competitive small thermal engines. Their application in domestic heating may be considered as an alternative solution to the electric driven heat pumps.

Switzerland prescribe the efficient use of energy. CHP-units based on the free-piston resonance Stirling principle save 40 to 50% of primary energy as compared to traditional heating equipment. In using fuel gas mixtures with up to 30% from natural resources (objective of ASIG for 2030), the exhaust of CO_2 may be reduced by 65 to 70% against usual heating techniques.



Take-home messages

- Mit WKK-Anlagen wird die eingesetzte Primärenergie effizient genutzt, was gesetzlich vorgeschrieben ist. Unter nominalen Betriebsbedingungen (BHKW-ein = 30°C, BHKW-aus = 40°C) beträgt der elektrische Wirkungsgrad 25%, bei einem Gesamtwirkungsgrad (Strom und Heizenergie) von 90%. Die Anforderungen der MuKE bezüglich WKK-Einheiten werden damit erfüllt. Im kombinierten Betrieb mit einer Wärmepumpe (WP), werden 40 bis 50% Energie gegenüber fossilen Heizungen eingespart. Mit zunehmendem erneuerbarem Anteil im Erdgas reduziert sich der CO₂-Ausstoss um 65-70%; im Grenzfall ist kein CO₂-Ausstoss mehr vorhanden.
- Die mechanische Einheit ist gekapselt und braucht nicht geschmiert zu werden; dies ermöglicht einen langzeitigen Betrieb mit einem minimalen Unterhalt. Dank vollem Ausgleich der schwingenden Massen läuft der Freikolben-Resonanzstirling ruhig und erzeugt nur minimale Vibrationen.
- Die äussere, kontinuierliche Verbrennung zeichnet sich durch saubere Abgase aus (geringe Schadstoffe, entsprechend den LRV-Vorschriften für Wohnquartiere). Wie bei den üblichen Heizgeräten muss der Brenner jedes Jahr kontrolliert und der Ausstoss an Schadstoffen gemessen werden. Der gesamte, benötigte Wartungsaufwand ist gering, ähnlich zu jenem bestehender Gasheizgeräte. Die Kombination des Freikolben-Resonanzstirling mit Holzverbrennung ist eine zukunftsweisende Möglichkeit zur CO₂-freien Strom- und Wärmeproduktion und muss unbedingt weiterentwickelt werden.
- Mit dem Freikolben-Resonanzstirling werden alle notwendigen Charakteristiken erstmals mit kleinen Motoreinheiten erfüllt, es besteht praktisch keine Konkurrenz. Für die Energieversorgung kleiner Wohneinheiten liegt eine gleichwertige Lösung zu den elektrisch betriebenen Wärmepumpen (WP) vor. Während der kalten Jahreszeit dient der WKK-Strom für den Antrieb der Wärmepumpen, zum Zeitpunkt des grössten Strommangels. Diese Kombination kann einen Beitrag zur Sicherstellung der Stromversorgung im Winterhalbjahr leisten.
- Die jährlichen Betriebskosten der Freikolben-Resonanzstirling-WKK können dank der Stromgewinnung bis zu Fr. 4'000.- günstiger sein als der Betrieb einer entsprechenden Wärmepumpe bei gleichen Investitionskosten. Bei einer Lebensdauer von 20 Jahren ergibt dies eine Ersparnis für den Betreiber/Hausbesitzer von Fr. 80'000.-.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	5
Take-home messages	6
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	10
1.2 Ursprung und Motivation des Projektes	12
1.3 Projektziele	13
1.4 Sinn und Zweck des entwickelten Freikolben-Resonanzstirling	13
1.5 Patent	14
1.6 Betrieb von Prototypen vor Projektbeginn (Phase SFM2)	14
1.7 Vorarbeit am Freikolben Resonanzstirling mit Holzverbrennung	15
2 Anlagenbeschreibung der Feldtestgeräte	16
2.1 Parameter der Feldtestgeräte	16
2.2 Bau und Betrieb der Feldtestgeräte (Phase SFM3)	17
3 Vorgehen und Methode	18
3.1 Auslegung der Feldtestmaschinen für den Betrieb bei Kunden	18
3.2 Monitoring der Feldtestgeräte	18
3.3 Kompakte Konstruktion und Verschalung der Feldtestgeräten	19
3.4 Langzeittests bei Schmid Stirling GmbH und Bau der Feldtestgeräte	20
3.5 Vorgenommene Änderungen der Auslegung von SFM3-Feldtestgeräten	21
3.6 Konstruktive Verbesserungen	21
3.7 Messprotokolle	23
3.8 Instrumentierung	27
4 Ergebnisse und Diskussion	29
4.1 Versuchsläufe an der HEIG-VD in Yverdon	29
4.2 Plan-les-Ouates, Genf	32
4.3 Nidau, Biel	35
4.4 Grenchen	39
4.5 St. Gallen	42
4.6 Thörishaus	44
4.7 Vergleich der Laufzeit und Ausfälle von Dezember 2022 bis April 2023	44
4.8 Leistungsvergleich zwischen Labor und Feldtest	46
4.9 Vergleich der Feldtestgeräte untereinander	47
4.10 Verdankungen	47
5 Schlussfolgerungen und Fazit	48
5.1 Wichtige technische Charakteristiken	48



5.2	Erläuterung der Charakteristiken.....	48
5.3	Laufzeiten der Feldtestgeräte.....	51
5.4	Fazit des Betriebs.....	51
5.5	Einbindung und Optimierung des BHKW's am Betriebsort.....	52
5.6	Marktbereich und Marktchancen in der Schweiz, Vermarktungsplan.....	53
5.7	Wirtschaftlichkeit der Stirling-WKK-Anlagen.....	54
5.8	Politische Fragen und Entscheide.....	56
5.9	Zusammenfassende Ergebnisse der Kundenumfrage.....	57
5.10	Grösste mögliche Hemmnisse:.....	58
5.11	Dringlichkeit.....	59
5.12	Stirling-WKK in Kombination mit Biomasse-Verbrennung.....	59
6	Ausblick und zukünftige Umsetzung.....	60
6.1	FLOX-Brenner und Wärmerekuperator.....	60
6.2	Erhitzerkopf.....	60
6.3	Tellerfedern.....	60
6.4	Regenerator.....	60
6.5	Regelsystem.....	61
6.6	Senkung der Herstellkosten.....	61
6.7	Betrieb der WKK mit Erdgas-Biogasgemischen.....	61
6.8	Weiterentwicklung der Holzverbrennung in Kombination mit dem Freikolben-Resonanzstirling.....	61
7	Nationale und internationale Zusammenarbeit.....	62
8	Kommunikation.....	62
8.1	Technische Eigenschaften neuer WKK-Geräte.....	62
8.2	Vergleich mit den heute angewandten Technologien.....	62
8.3	Einsatz von regenerativen oder synthetischen Brennstoffen.....	63
9	Publikationen.....	64
10	Literaturverzeichnis.....	65
11	Anhang.....	65



Abkürzungsverzeichnis

AKW	Atomkraftwerk
BFE	Bundesamt für Energie
BHKW	Blockheizkraftwerk
CCF	Couplage Chaleur-Force
CHP	Combined heat and power
ESB	Energie Service Biel/Bienne
FLOX	Flameless Oxidation (Combustion)
GE	Kanton Genf
GVM	Gasverbund Mittelland
HEIG	Haute Ecole de Gestion
HEIG-VD	Haute Ecole de Gestion du Canton de Vaud
HEPIA	Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISEC	International Stirling Engine Conference
ISECGE-22	International Conference Environmental Science and Green Energy
kW	Kilo Watt
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
MEC	Microgen Engine Cooperation
MuKEEn	Musterverordnung der Kantonalen Energiebehörden
ms	Millisekunde
P + D	Pilot- und Demonstrationsprojekt
SGSW	St. Galler Stadtwerk
SIG	Services Industriels de Genève
SFM	Stirling Freikolben-Motor
TISG	Technische Inspektorat des Schweizerischen Gasfaches
USA	United States of America
VD	Kanton Waadt
VSG	Verband der Schweizerischen Gasindustrie
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung
WP	Wärmepumpe



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

In fossil befeuerten Heizkesseln wird die bei mehr als 1000°C erzeugte Wärme meist dazu verwendet, um das Wasser eines Heizkreislaufes auf knapp 80°C aufzuheizen. Die Energie wird dabei irreversibel abgewertet. Die freigesetzte Energie kann deutlich besser genutzt werden, indem die bei hohen Temperaturen freigesetzte Wärme einen Motor antreibt, um Strom zu produzieren und bloss dessen Abwärme zur Gebäudeheizung verwendet wird (stromproduzierende Heizung). Die effiziente Nutzung der eingesetzten Brennstoffe ist gesetzlich vorgeschrieben und erklärt den stetig wachsenden Einsatz von Fernheizsystemen in Kombination mit einer vorgängigen Stromproduktion. Stromerzeugende Heizungen sind unter den Begriffen Wärme-Kraft-Kopplung (WKK), im deutschsprachigen Raum Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und unter dem Begriff Blockheizkraftwerk (BHKW) bekannt.

In dicht besiedelten Gebieten wird die Heizwärme den Kunden über ein Verteilnetz zugeführt. In wenig besiedelten Gegenden steigen die Anschluss- oder Verteilkosten jedoch stark an und beschränken diese kollektive Versorgung. In zahlreichen Projekten wurden individuelle Verbrennungsmotoren zur Strom- und Wärmeversorgung von einzelnen, kleineren Wohngebäuden eingesetzt. Die bekannteste Lösung ist der Dachs-Motor von SenerTec mit 5 oder 3 kW elektrischer Leistung. Gemessen an der hohen Anzahl von zu ersetzenden Heizkesseln bleibt ihr Erfolg jedoch recht begrenzt. Die konventionellen Motoren von RMB oder Honda haben sich bei höheren Leistungen bewährt, sind z.B. als Notstromgruppen bekannt, stossen bei niedrigen Leistungen und den strengen Einsatzbedingungen (bezüglich Abgaswerten) in Wohnquartieren an Grenzen.

Der bisherige Mangel an geeigneten Verbrennungsmotoren erklärt, dass für die Gebäudeheizung an Stelle von WKK-Geräten elektrische Wärmepumpen (WP) propagiert und eingesetzt werden.

Freikolben-Resonanzstirling werden von aussen beheizt, die kontinuierliche Verbrennung ist schadstoffarm und eignet sich für ihren Einsatz in Wohnquartieren, wo strenge Vorschriften und Abgasnormen einzuhalten sind. Vorerst wurden kinematische Einheiten entwickelt, wie z.B. von Frauscher Motors GmbH, welche als Referenzsystem bei niedrigen Leistungen betrachtet werden kann.

Die von W. Beale konzipierten Freikolbenstirling gaben die berechtigte Hoffnung auf den Einsatz in Wohngebieten und erfüllte die vielfältigen Anforderungen zu ihrer Energieversorgung. Kompakt gebaute Freikolbensysteme, welche nicht geschmiert werden müssen, ermöglichen einen langen Betrieb mit minimalem Wartungsaufwand. Einheiten mit 1 bis 1.2 kW elektrischer Abgabeleistung werden z.B. von Microgen, Ökofen oder Qnergy in kleinen Serien gebaut und sind verfügbar. Die Sticore von Langenbruck, SIG und AWTEC beruhte ebenfalls auf diesem Konzept. Alle diese Anlagen sind entsprechend dem sog. BETA-Konzept (mit einem übereinander angeordneten Arbeits- und einem Verdrängerkolben) aufgebaut.

Das Stirling-Freikolbenprinzip wurde auch erfolgreich für Kältemaschinen angewandt, welche elektrisch angetrieben werden.



1.1.1 Übersicht der BHKW mit bis zu 6kW (13 kW) elektrischer Leistung

Freikolben Stirlingmotor-BHKW (teilweise nur Stirlingmotor)

- Microgen Engine Corporation Group, NL El. Leistung: 1 kW
- Qnergy, USA El. Leistung: 0.6 / 1.2 / 1.8 / 5.6 kW
- Sunpower USA El. Leistung: 1 kW

Kinematische Stirlingmotor-BHKW (teilweise nur Stirlingmotor)

- Frauscher Motors GmbH, AT El. Leistung: 1.5 / 7.5 kW
- Azelion, SE El. Leistung: 13 kW
- Swedish Stirling, SE El. Leistung: 13 kW

Verbrennungs Motor-BHKW (nur die wichtigsten)

- SenerTec GmbH, DE El. Leistung: 2.9 / 5.5 kW
- RMB/Energie GmbH, DE El. Leistung: 2 / 3.3 / 4.0 / 5 kW
- Elco GmbH, DE El. Leistung: 2 / 3.3 / 4.0 / 5 kW
- Remeha GmbH, DE El. Leistung: 2.9 / 5.5 kW
- EC Power A/S, DK El. Leistung: 6 kW

Brennstoffzellen-BHKW

- Viessmann GmbH, DE El. Leistung: 0.7 kW
- SenerTec GmbH, DE El. Leistung: 0.8 kW

1.1.2 Abgaswerte

Kategorie der Maschine	VL CO [mg/Nm ³]	VL NO _x [mg/Nm ³]
Gasbefeuerte Feuerungsanlagen	100 bezogen auf 3% O ₂	80 bezogen auf 3% O ₂
Stationär betriebene Verbrennungsmotoren bis 100kW	650 bezogen auf 5% O ₂	250 bezogen auf 5% O ₂

Tabelle 1: Übersichtstabelle Abgaswerte, Quelle: BAFU 814.318.142.1, 2023

Für den Freikolben-Resonanzstirling gelten die Abgasnormen der stationären Verbrennungsmotoren. Beim Feldtest wurde nachgewiesen, dass die CO-Grenzwerte für gasbefeuerte Feuerungsanlagen eingehalten werden, jene für NO_x nahebei.

1.1.3 Vorteile des Freikolben-Resonanzstirling

Bis heute weisen alle stromerzeugenden Heizungen gewisse Nachteile auf die den Durchbruch verhindern:

- Kleine Verbrennungsmotor BHKW scheitern an den strengen Abgasvorschriften, den hohen Wartungskosten und an den Lärmemissionen.
- Freikolben Stirling BHKW scheitern bis heute am schlechten elektrischen Wirkungsgrad von nur rund 12%.
- Kinematische Stirling BHKW scheitern am Verschleiss und der Schmierung im Stirlingmotor-Innenbereich.
- Brennstoffzellen Heizungen scheitern bis heute an den Kosten und der niedrigen elektrischen Leistung.
- Hier setzt die Lösung der Schmid Stirling GmbH mit dem Freikolben-Resonanzstirling an; er erfüllt alle Merkmale und ist somit einzigartig und konkurrenzlos.



	25% el. Wirkungsgrad	Abgase einhalten der LRV-Norm	Lärm- und Vibrationsarm	geringer Unterhalt	Hohe Investition
WKK mit Freikolben-Resonanzstirling	Über 25%		gering		Nicht teurer als Wärmepumpen
Bisherige WKK mit Freikolbenstirling	12-13%				
Verbrennungsmotor-WKK		Mit Nachbehandlung	Benötigt viel und gute Schallisolation	Öl und Dichtungen ersetzen	
Brennstoffzellen-WKK				Stack muss viel gewechselt werden	Teuer in der Anschaffung
Gasheizung	keine Stromerzeugung				

Tabelle 2: Charakteristiken, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

1.2 Ursprung und Motivation des Projektes

Das Konzept des Freikolben-Resonanzstirling wurde kurz nach den ersten Veröffentlichungen des Beale-Konzeptes entwickelt, und zwar in Anlehnung an andere Studien über die Ausbreitung instationärer Wellen in rohrförmigen Leitungen, welche bei bestimmten Frequenzen in Resonanz sich verstärken können.

Im daraus entwickelten Freikolben-Resonanzstirling-Konzept ist der Verdrängerkolben fest mit dem Arbeitskolben verbunden, wobei die periodische Druckänderung durch separate, phasenverschoben mitschwingende Resonanzkolben erzeugt wird. Diese eigen entwickelten Einheiten der Phase SFM2 funktionieren stabiler als die ursprünglichen Ausführungen nach den oben angeführten BETA-Freikolbensystemen; das Arbeitsgas durchläuft höhere Druckamplituden als bei den bisher bekannten Freikolbenstirling, womit auch die Leistungsdichte und der elektrische Wirkungsgrad gesteigert werden kann.

Im vorliegenden Feldtestprogramm wurden mehrere Feldtestgeräte gebaut und bei Kunden unter verschiedenen Bedingungen, während 2 Jahren betrieben, um nachzuweisen, unter welchen Bedingungen sich der Freikolben-Resonanzstirling bewährt. Die Feldtestgeräte dieser Projektphase SFM3 wurden gegenüber SFM2 konstruktiv verbessert. Die Leistungsziffern entsprechen jenen der Vorphase und sind im Kapitel 2 zusammengefasst. Ihr langzeitiger Versuchsbetrieb soll weitere, wünschbare Verbesserungen aufzeigen, welche für den verbreiteten Einsatz dieser Technologie nötig sind. Die Qualitäten der verschiedenen WKK-Systeme müssen nach verschiedenen Kriterien beurteilt werden. Die wichtigsten Ergebnisse sind in diesem Bericht zusammengefasst.



1.3 Projektziele

Im laufenden Feldtestprogramm wurden 7 Freikolben-Resonanzstirling gebaut und unter verschiedenen Anwendungen langfristig betrieben. Der laufend gemessene elektrische Wirkungsgrad überstieg 25%, womit die Anforderungen der MuKE bezüglich WKK-Einheiten erfüllt wird. Im kombinierten Betrieb mit einer WP, welche den erzeugten Strom zusätzlich in Heizwärme umsetzt, können 40 bis 50% Energie gegenüber fossilen Heizöfen eingespart werden, je nach Qualität der WP und erforderlichen Heiztemperatur.

Allgemeine Beurteilung des praktischen Einsatzes der Freikolben-Resonanzstirling

- Energetische Einsparungen: Bestätigung, dass der von MuKE geforderte elektrische Wirkungsgrad von 25% erzielt, die Abwärme zum Heizen verwendet werden kann
- Bestätigung, dass die Abgaswerte die strengen Vorgaben von Wohnquartieren erfüllt
- Nachweis eines Lärm- und Vibrationsarmen Betriebes
- Zuverlässiger, langzeitiger Betrieb mit minimalem Unterhaltsbedarf
- Eingliederung, Betrieb in verschiedenartigen, bestehenden Heizanlagen
- Eignung zum Betrieb in Wohnquartieren
- Kostengerechte Lösung
- Beurteilung möglicher Hemmnisse
- Beurteilung der Marktverhältnisse, (obwohl keine Marktstudie vorgesehen ist)
- Hohe Laufstunden bei vollständigem Verbrauch der Wärme zum Heizen erzielt werden können
- Bestätigung, dass ein Gesamtwirkungsgrad von über 90% erreicht wird
- Aussagen über die sinnvolle Verwendung des erzeugten Stroms

1.4 Sinn und Zweck des entwickelten Freikolben-Resonanzstirling

Rund 40% des fossilen Energiebedarfs wird für die Gebäudeheizung und Erwärmung von sanitärem Heisswasser verbraucht. Bei der Verbrennung dieser Kohlenwasserstoffe wird Energie bei mehr als 1000°C freigesetzt. In Heizkesseln wird damit Wasser auf rund 50°C aufgewärmt, die Energie dabei stark abgewertet. Diese werden besser genutzt, wenn bei hohen Temperaturen Strom erzeugt wird und die Abwärme dieses Prozesses zum Heizen dient.

Für die Gebäudeheizung wurden kleine Wärme-Kraft-Kopplungsgeräte (WKK) entwickelt, welche im Abschnitt 1.6 kurz umschrieben sind. Im Kapitel 5 sind die hohen Anforderungen zusammengefasst, welche für den Einsatz in bewohnten Gebäuden wichtig sind. Dank ihrer effizienten Nutzung wird viel der Primärenergie eingespart und der Ausstoss an klimaschädlichen Gasen entsprechend stark gesenkt.

Eine grössere Zahl von Wohngebäuden sollen mit Wärmepumpen (WP) beheizt werden. Woher der zusätzliche Winterstrom kommt, ist offen. Der importierte Winterstrom wird wie heute auch weiterhin mit CO₂ belastet sein. Anstatt alle Gebäude mit WP auszurüsten, sollte ein Teil mit WKK-Geräten versehen werden, welche den Strom für den Antrieb der WP zeitgerecht, während der kalten Jahreszeit bereitstellen können. Der CO₂-Ausstoss der WKK wird vergleichbar sein zur oben beschriebenen Lösung mit WP. Die benötigte Infrastruktur für die Speicherung und Verteilung des benötigten Erdgases besteht bereits; die zusätzlich benötigten Ergänzungen sind nicht teuer, was eine rasche Umrüstung auf effizientere Heizsysteme als die bestehenden Gasheizungen erlaubt.



1.5 Patent

Beim neuen, international patentierten Freikolben-Resonanzstirling-Prinzip ist der Verdrängerkolben mit dem Arbeitskolben fest verbunden (siehe Abbildung 2); die Amplitude und Phasenlage dieses Hauptkolbens werden durch den elektrischen Lineargenerator genau kontrolliert. Im Arbeitsvolumen sind zusätzliche, frei schwingende Resonanzkolben angeordnet, welche den Druck des Arbeitsgases periodisch ändern, zeitlich versetzt gegenüber der Hauptkolbenbewegung.

Das gesamte Aggregat ist in einem geschlossenen Gehäuse angeordnet. Die Freikolben benötigen kein Getriebe und laufen berührungsfrei auf Gaslagern. Die ungeschmierten, wartungsarmen Freikolben-Resonanzstirling sind für eine Arbeitsfrequenz von 50Hz ausgelegt, der erzeugte Strom kann ohne Wechselrichter direkt ins lokale Netz eingespeist werden.

Das Konzept dieses Motors und seine Funktionsweise sind im Patent **EP 11'718'884.7 Piston résonant** (29 Mars 2011) umschrieben, seine Auslegung und die wesentlichen mechanischen wie thermischen Vorgänge graphisch dargestellt.

1.6 Betrieb von Prototypen vor Projektbeginn (Phase SFM2)

Mehrere Prototypen wurden gebaut, betrieben und stufenweise verbessert. Die gemessenen Abgabeleistungen der Einheiten werden mit analytisch ermittelten Auslegedaten verglichen, um die thermischen und dynamischen Prozesse im Detail zu ermitteln und daraus weitere Verbesserungen abzuleiten.

Die nachfolgende Tabelle fasst die wichtigsten gemessenen Betriebsdaten der letzten gebauten Feldtestgeräten zusammen. Elektrische Gesamtwirkungsgrade über 25% konnten bei Heizrohrtemperaturen von rund 800°C gemessen werden. Die Arbeitsgase durchlaufen einen Kreisprozess mit Druckverhältnissen im Bereich von $\pi_C = p_{MAX}/p_{MIN} \sim 1.35 - 1.40$, deutlich höhere Werte als bei den bisher bekannten Freikolbengeräten.

Versuchsergebnisse		Bei Volllast	Bei Teillast
Zugeführte thermische Leistung	W_{TH}	8'000	5'000
Elektrische Abgabeleistung	W_{EL}	2'000	1'200
Max. verfügbare Heizleistung	W_{TH}	5'300	3'300
Elektrischer Wirkungsgrad	%	> 25	> 23
Gesamtwirkungsgrad	%	> 90	> 90
Modulationsbereich der Leistung	60 – 100%	100%	60%
Druckverhältnis Arbeitsgas	p_{MAX}/p_{MIN}	1.35 – 1.40	1.30 – 1.35
Arbeitsfrequenz	Hz	50	
Abmessungen B / T / H	cm	60 / 70 / 120	
Gewicht	kg	ca. 180	
Energiequelle		Biogas / Erdgas / LPG	

Tabelle 3: Übersichtstabelle der Versuchsergebnisse, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022



Abbildung 1: Der Prototyp SFM2, mit nebenstehendem Brenner, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2019

1.7 Vorarbeit am Freikolben Resonanzstirling mit Holzverbrennung

Der Bericht von Herrn Carré aus dem Jahre 2018 «État de l'art et potentiel des technologies de brûleur à bois utilisées en association avec un moteur Stirling pour la micro-cogénération kommt zum Schluss, dass ein elektrischer Wirkungsgrad von 18-20% erreicht werden kann. Auch diese Aussage bekräftigt eine Weiterentwicklung mit einem Holzbrenner.

Dieser Bericht ist auf <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40670> veröffentlicht.



2 Anlagenbeschreibung der Feldtestgeräte

2.1 Parameter der Feldtestgeräte

Zugeführte thermische Leistung	W_{TH}	7'500
Elektrische Abgabeleistung	W_{EL}	1'800
Max. verfügbare Heizleistung	W_{TH}	5'000
Elektrischer Wirkungsgrad	%	23.5
Gesamtwirkungsgrad	%	90
Modulationsbereich der Leistung	60 – 100%	80%
Druckverhältnis Arbeitsgas	p_{MAX}/p_{MIN}	1.33 – 1.38
Arbeitsfrequenz	Hz	50
Abmessungen B / T / H	cm	60 / 70 / 170
Gewicht	kg	180
Energiequelle		Erdgas / LPG

Tabelle 4: Übersichtstabelle der Parameter, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

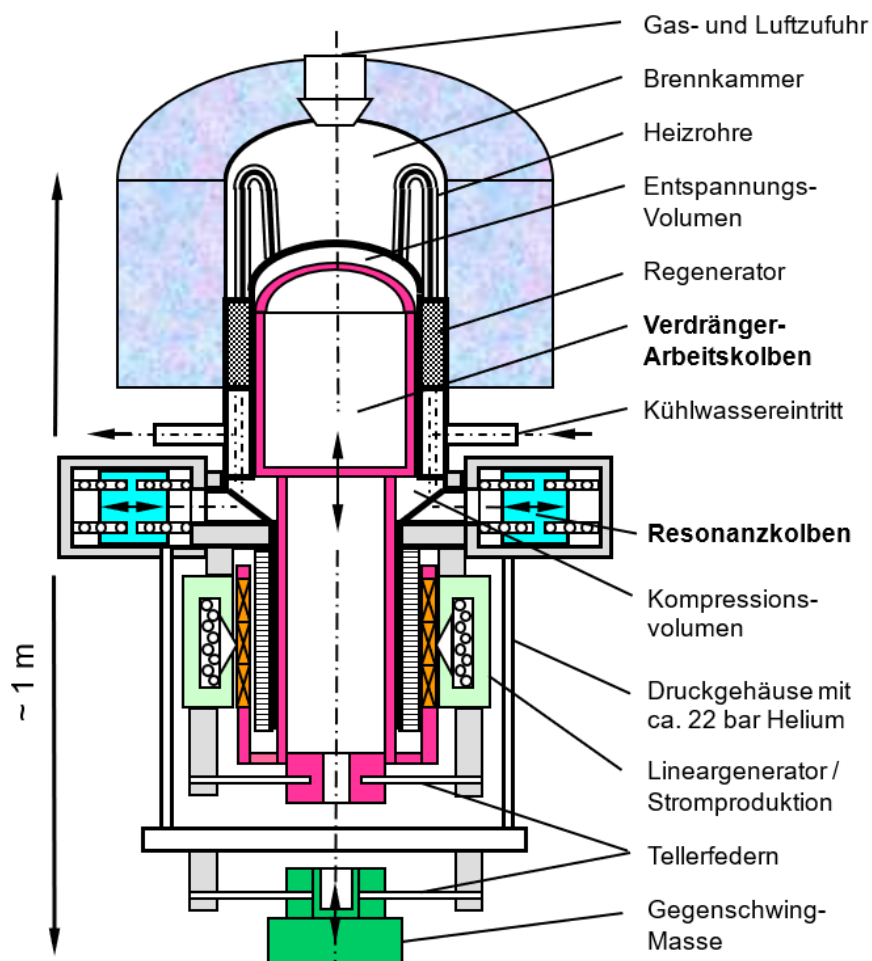


Abbildung 2: Der Freikolben-Resonanzstirling im Schnitt, mit Beschriftung, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023



2.2 Bau und Betrieb der Feldtestgeräte (Phase SFM3)

Im Rahmen des laufenden Projektes wurden insgesamt 7 Feldtestgeräte gebaut und betrieben. Diese sind nach dem gleichen Konzept wie die SFM2 aufgebaut. Unter gleichen Betriebsbedingungen werden auch gleiche Versuchsergebnisse erwartet, wie sie im Kapitel 1.6 zusammengefasst sind.

Kapitel 3 umschreibt die nötigen Anpassungen, damit die Feldtestgeräte für die Bedürfnisse und den Betrieb bei den Kunden zu dienen. (Vorbereitende Arbeiten). Dies betrifft die kompakte Gestaltung des Gerätes mit einem Gehäuse, die Ankopplung an bestehende Heizkreisläufe. Die benötigte Instrumentierung und Fernüberwachung des Betriebes wurden analysiert und umgesetzt.

Die Feldtestgeräte dieser Phase SFM3 mussten in die bereits bestehenden Heizanlagen der Gebäude eingebunden werden. Abbildung 3 zeigt als Beispiel den schematischen Einbau in die Heizanlage des Gebäudes in Grenchen. Der geplante Einsatz wurde allseitig mit den Kunden abgesprochen, was die Aufzeichnung der Resultate bestimmt. Das Monitoring und die benötigte Instrumentierung der Feldtestgeräte sind im Kapitel 3 zusammengefasst. Die Datenaufzeichnung der Geräte erfolgt über eine programmierte Steuerung von Sigmatek, was auch die Überwachung und Fernbedienung der Anlagen ermöglicht.

Die durchgeführten Arbeiten sind in Kapitel 4 zusammengefasst. Die Änderungen der Auslegung, die konstruktiven Verbesserungen und Messprotokolle unter Kapitel 3.5 bis 3.8 umschrieben. Die Sammlung und Speicherung aller wichtigen Messdaten und ihre Übertragung erlauben eine Fernüberwachung des Betriebes aller Maschinen. Die experimentellen Resultate können miteinander verglichen werden, womit ein optimaler Betrieb angestrebt werden kann.

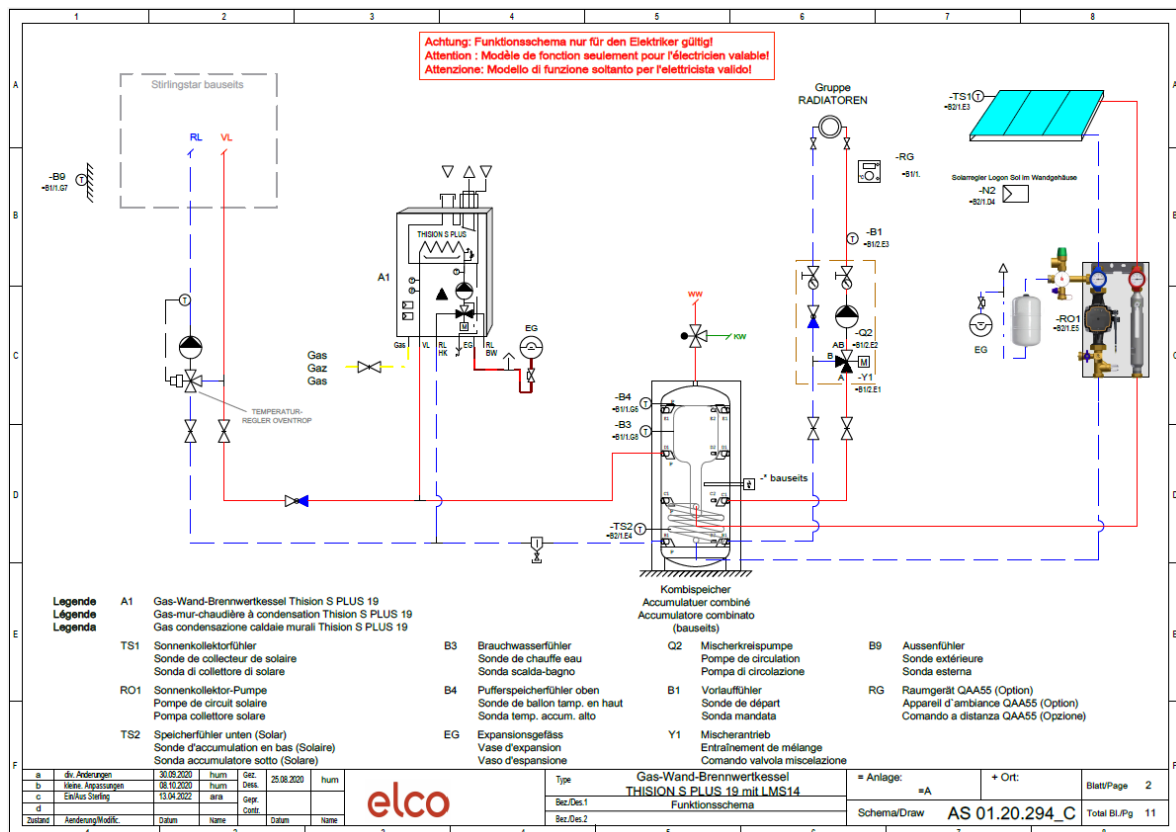


Abbildung 3: Hydraulikschema, SFM3-1 in Grenchen, Quelle: Elco, 2020

In der Abbildung 3 ist das Hydraulikschema der gesamten Heizanlage in Grenchen zu sehen. Weitere Schemen sind im Anhang des Berichts «Essais d'endurance» (Anhang 5).



3 Vorgehen und Methode

Das von W. Beale Mitte der 70er Jahre entwickelten Freikolben-Stirling-Konzept wurden von SUNPOWER (Athens, Ohio) und INFINIA (Richland, NW, früher STC) unter starker finanzieller Beihilfe der NASA zu industrieller Reife entwickelt. Britische Gesellschaften (Baxi, Microgen, British Gas) wollten als erste die Sunpower-Geräte in Europa kommerzialisieren. Zeitweilig wurden diese von BDR, Viessmann, Remeha, deDietrich, Senertec und Brötje angeboten. Die Geräte von Infinia wurde von Bosch, Buderus, Merloni (Ariston), Rinnai (Japan) sowie Qnergy (USA) übernommen.

Die wichtigsten, kommerziell angebotenen Produkte werden von Microgen Engine und Qnergy angeboten, beide mit elektrischen Leistungen im Bereich von 1 bis 1.2 kWEL und einer Heizleistung von etwa 5 kWTh. Neben dem ursprünglichen Einsatz als Heizanlage wurden auch spezifische Einsatzformen für den Betrieb bei sehr niedrigen Temperaturen, oder netzunabhängigem Betrieb entwickelt. Vermutlich war deren Einsatz für die übliche Gebäudeheizung nicht besonders erfolgreich.

Seit vielen Jahren entwickeln die Schmid Stirling GmbH ein Konzept, welches im Detail analysiert wurde und deutliche Vorteile (elektrische Wirkungsgrade im Bereich von 23 bis 25%) gegenüber den bekannten Aggregaten aufweist. Eine Reihe von Prototypen wurden auf eigene Initiative hergestellt und betrieben. Diese Entwicklung während der Phase SFM2 wurde von der Klimastiftung unterstützt, was hiermit verdankt sei. Die Charakteristiken des Freikolben-Resonanzstirling werden im Kapitel 1 beschrieben.

3.1 Auslegung der Feldtestmaschinen für den Betrieb bei Kunden

Das Konzept der Feldtestgeräte SFM3 entspricht der Pilotanlage SFM2, die sich bewährte. Zahlreiche konstruktive Verbesserungen wurden aufgrund der gesammelten Erfahrungen vorgenommen, insbesondere in Form einer verfeinerten Auslegung des Hauptkolbens und der Resonanzmassen.

Das Aluminiumgehäuse wurde verkleinert, mit dem Vorteil, dass das Blockheizkraftwerk kleinere Aussenabmessungen erhielt und somit besser bei den Kunden Platz findet. Die elektrischen Kontroll- und Regelsysteme wurden in einem Steuerkasten kompakt untergebracht. Abbildung 4 zeigt die Anordnung des Gehäuses und des Regelkastens, welche mit der im Hintergrund stehenden Pilotanlage SFM2 verglichen werden kann.

Der Brenner und der Rekuperator für die Vorheizung der Brennerluft wurden in Form eines bestehenden Produktes, welches anderen Zwecken diene, zugeliefert. Vorerst fehlten die nötigen Unterlagen, um die Auslegung des FLOX-Brenners besser an die Anforderungen des Freikolben-Resonanzstirling anpassen zu können.

3.2 Monitoring der Feldtestgeräte

Einsatzort	HEIG (Yverdon)	Yverdon Einfam. h.	SIG (Genf): Gebäude der Gemeinde Plan-les-Ouates	Nidau/Biel: 2-Familiengeb.	Grenchen EFH.	SGSW (St. Gallen): 4-Familiengeb.	Schmid Stirling GmbH Gewerbegeb.	Schmid Stirling GmbH Gewerbegeb.
Heizen oder/und Boilerw.	beides		nur heizen	beides	beides	beides	nur heizen	nur heizen
Temperatur je Anwendung	Verschiedenen Vorlauf-temp.: 35/45/55/65°	Vorlauf-temp. beim Einfamilienhaus mit 55°C	Vorlauf-temp. unter 55°	60° Vorlauf-temp. für das Heizen und für das Boilerwasser	60° Vorlauf-temp. für das Heizen	60-65° Vorlauf-temp. für das Heizen und für das Boilerwasser	55° Vorlauf-temp. für das Heizen	50° Vorlauf-temp. für das Heizen



Einsatzort	HEIG (Yverdon)	Yverdon Einfam. h.	SIG (Genf): Gebäude der Gemeinde Plan-les-Ouates	Nidau/Biel: 2-Familiengeb.	Grenchen EFH.	SGSW (St. Gallen): 4-Familiengeb.	Schmid Stirling GmbH Gewerbegeb.	Schmid Stirling GmbH Gewerbegeb.
Stromverbrauch	100 % Eigenverb.	Eigenverb. soweit möglich	100 % Eigenverb.	Eigenverb. soweit möglich	Eigenverb. soweit möglich	Eigenverb. soweit möglich	100 % Eigenverb.	100 % Eigenverb.
führende Steuerung	Stirling	Übergeordnete Steuerung	Stirling	Steuerung des Spitzenlastkessels + Stirling	Steuerung des Spitzenlastkessels + Stirling	Übergeordnete Steuerung	Stirling	Stirling
Lastbetrieb	80%		80%	80%	80%	80%	80%	80%
Betriebskonzept	Dauerläufer	BHKW mit Solarthermie, Wärmege führt	Dauerläufer	Kombination mit Spitzenlastkessel und Prio. für das BHKW	Kombination mit Spitzenlastkessel und Prio. für das BHKW	Kombination mit Spitzenlastkessel und Prio. für das BHKW	Dauerläufer	Dauerläufer
Wie ist die Geräte konfiguriert	mit Wärmep.	mit Wärmep.	mit Wärmesp. und Wärmepumpe	mit Wärmesp. und Erzeugung von Boilerwasser	Therme und Speicher + Holzofen	mit Wärmesp. und Erzeugung von Boilerwasser	mit Wärmespeicher	mit Wärmespeicher
Erhoffte Betriebsstd. pro Jahr	3000 Std.		3000 Std.	Bis zu 2500 Std.	1000 Std.	3000 - 5000 Std.	Bis zu 3000 Std.	Bis zu 2000 Std.
Zu untersuchen de Fragen	Wirkungsgrad bei untersch. Vorlauftemperaturen + Verhalten des Wirkungsgrads über längere Zeit	Wärmege führter betrieb	Dauerlauf	Wie kann die die Wärmeproduktion einfach auf den Strombedarf abgestimmt werden	Wie kann das BHKW sinnvoll in einem Einfamilienhaus betrieben werden.	Wärmegeführter betrieb	Aussagen über die Dauerfestigkeit des BHKW's	Aussagen über die Dauerfestigkeit des BHKW's
Erhoffte Erkenntnisse	Bestätigung der gemessenen Wirkungsgr. + geringe Abnahme des el. Wirkungsgrad nach 3'000 - 6'000 Std	Gesamtsystemanalyse.	Kombinationsmöglichkeiten des Freikolben-Resonanzstirling mit anderen Systemen sind möglich	Wie kann die Eigenstromnutzung signifikant erhöht werden	Zusammenspiel in einem Einfamilienhaus mit einer Therme und einem Holzofen	Grossteil der Wärmeenergie eines 4-Familienhaus abdecken	Dauerfestigkeit von über 6'000 Laufstunden kann erzielt werden	Dauerfestigkeit von über 4'000 Laufstunden kann erzielt werden

Tabelle 5: Monitoring der Feldtestgeräten, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

3.3 Kompakte Konstruktion und Verschalung der Feldtestgeräten

Gegenüber SFM2 wurde das Druckgehäuse des Freikolben-Resonanzstirling, in welchem der elektrische Lineargenerator und die Tellerfedern angeordnet sind, kompakter gestaltet. Dieses weist nun einen Durchmesser von 250 mm auf, gegenüber 300 mm der vorgängigen Ausführung.

Die gesamte Einheit wurde verschalt, sodass die Feldtestgeräte an der Swissbau 2020 in Basel ähnlich einem kommerziell verfügbaren Produkt, ausgestellt werden konnte. Diese Verschalung dient auch als Schallisolierung und thermischer Schutz, um die Wärmeverluste zu begrenzen. Die unter



dieser Verschalung freigesetzte Wärme wird an die Frischluft übertragen, welche für die Verbrennung benötigt wird. Die Abbildung 4 zeigt die Ausführung dieses Freikolben-Resonanzstirling. In der Mitte die neue SFM3 und rechts im Hintergrund das Vorgängergerät SFM2.



Abbildung 4: Der Freikolben-Resonanzstirling mit Gehäuse – Neben an die ältere Version SFM2, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2019

3.4 Langzeittests bei Schmid Stirling GmbH und Bau der Feldtestgeräte

Zuerst wurden zwei Versuchseinheiten SFM3 erstellt und in mehreren Phasen langfristig erprobt. Diese Feldtestgeräte müssen zuverlässig und sicher, mit den erforderlichen Leistungsziffern betrieben werden können. Diese Versuchsläufe wurden anfänglich durch unvorhergesehene Pannen unterbrochen, meist in Folge eines thermischen Verzugs der Führungszylinder der Freikolben.

Anschliessend wurden fünf weitere Feldtestgeräte nach dem Vorbild der SFM3 hergestellt, welche für den Betrieb bei den Kunden vorgesehen sind und von diesen betreut werden können.

Die Versuche in Thörishaus wurden bisher mit Propan durchgeführt. Bei einer Reihe von Versuchen wurde Erdgas eingesetzt, welches in Druckflaschen zugeliefert wird. Die Zufuhr zum Brenner erfolgt mit einem Speisedruck von 20 mbar, entsprechend den bei Kunden vorliegenden Verhältnissen. Die Entspannung muss auf ein festes Temperaturniveau reguliert werden, damit der Gasverbrauch exakt ermittelt werden kann. Die Abstimmung des Brenners für den Betrieb mit Erdgas bereitete am Anfang gewisse Schwierigkeiten.

Bei den Versuchen wurde der Freikolben-Resonanzstirling zuerst mit frischem Leitungswasser gekühlt, anschliessend mit dem Rücklauf der Gebäudeheizung. Bei den Kunden wird der Rücklauf eines Heizkreislaufts, voraussichtlich mit Temperaturen im Bereich von 30 bis 45°C betrieben. Entsprechende Versuche verliefen erfolgreich; sie erwiesen aber auch, dass die Leistung der Feldtestgeräten wie ihr Wirkungsgrad bei höheren Kühlwassertemperaturen den theoretischen Vorgaben entsprechend abnahm.



3.5 Vorgenommene Änderungen der Auslegung von SFM3-Feldtestgeräten

Im Laufe des P+D-Projektes mussten Verbesserungen an den Feldtestgeräten vorgenommen werden, welche Verzögerungen im Projektablauf verursachten. Die wichtigsten Weiterentwicklungen betrafen folgende Komponenten:

3.5.1 FLOX-Brenner

Diese wurden von WS Wärmetechnik GmbH hergestellt und sollten erlauben, den Freikolben-Resonanzstirling ohne wesentliche Anpassungen zu betreiben. Kleine Unterschiede der verschiedenen Brenner und ihr Einbau am Freikolben-Resonanzstirling veränderten jedoch den Betrieb sehr stark. Beim FLOX-Verfahren dient die vorgeheizte Brennerluft als Antrieb zur Rezirkulation eines Teiles der Abgase durch ein Venturirohr. Die Verbrennung findet damit in einer verdünnten Sauerstoff-Atmosphäre statt, so dass eine akzeptable Temperaturgrenze nicht überschritten wird.

Die Luftdüsen und das Venturirohr dieser Strahlpumpe weichen stark von der idealen Form eines Ejektors ab, was empfindliche Betriebsstörungen und Schwierigkeiten verursachte. Eine Reihe von Änderungen wurden vorgenommen, um das Verhalten zu verbessern und die gesamte Problematik eingehender verstehen zu können.

Ein INNOSUISSE-Projekt (In Form eines Innovationsscheckes) wurde beantragt, damit die HEIG mit einem bestehenden Rechenprogramm die Strömungsverhältnisse dieser Strahlpumpe, inklusive der Verbrennung erfassen kann. Erste Ergebnisse liegen vor, um das Verhalten dieses Brenners besser zu verstehen. Daraus lassen sich Verbesserungen und Weiterentwicklungen ableiten. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Analysen sind im separaten Bericht «InnoFloXStirling» (Anhang 1) der HEIG-VD zusammengestellt.

3.5.2 Tellerfedern

Der Hauptkolben der Feldtestgeräte wurde ursprünglich mit 2 Tellerfedern eingespannt, welche mit FE-Spannungsberechnungen ausgelegt und in langen Vorversuchen eingehend geprüft wurden. Trotz dieser Vorleistungen traten auf den Feldtestgeräten bei nominalen Kolbenhüben wiederholt Federbrüche auf. Vermutlich ergab sich an den Federn eine zusätzliche Montageverspannung in Folge von Toleranzen oder Unebenheiten, welche zu lokalen Überlastungen führte. Um dies zu beheben, werden jeweils drei Tellerfedern mit etwas geringerer Dicke eingesetzt. Die zulässigen Amplituden konnten erhöht werden, was die benötigte Mehrleistung kompensiert.

Diese Änderung verursachte einen grossen Aufwand, da die reine Herstellung der Tellerfedern mehr als zwölf Wochen beanspruchte. Immerhin konnten dabei die Werkstoffwahl und der Herstellprozess verbessert werden.

3.5.3 Erhitzerkopf

An verschiedenen Erhitzerköpfen rissen Schweissnähte, teilweise auch die Erhitzerrohre in ihrer Vertikalrichtung. Zur Lösung dieser Probleme wurde entschieden, die Röhrchen-Wandstärke von 1.5 mm auf 2 mm zu erhöhen. Die Umgestaltung der Erhitzerköpfe von allen sieben Feldtestgeräte bedeutete einen grossen Aufwand.

3.6 Konstruktive Verbesserungen

3.6.1 Übersichtstabelle der Verbesserungen

Die untenstehende Tabelle stellt in Rot die Störungen dar, welche an den jeweiligen Feldtestgeräten korrigiert werden mussten. Die grünen Felder zeigen, dass keine Störung aufgetreten ist. Trotzdem wurde an allen Feldtestgeräte alle Punkte für die zweite Heizperiode verbessert.



	Yverdon	Genf	Nidau	Grenchen	St. Gallen	Thörishaus SFM3-5	Thörishaus SFM3-6
Tellerfedern 3 Stück							
Verdrängerdom Verschmutzung							
Erhitzerkopf Risse in den Schweissnähten oder Rohren							
Temperatur- sensoren							
Haube mit Riss							
Fehlsignale							
Brennerstörung beim herunterfahren							

Tabelle 6: Übersichtstabelle der Verbesserungen, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

3.6.2 Verschmutzung am Verdränger

Der Verdränger wurde aus drei verschiedenen Materialien zusammengeschweisst, im heissesten Bereich ein hitzebeständiges Material, in der Mitte ein rostfreier, im kalten Bereich ein normaler Stahl. Der normale Stahl zeichnet sich durch seine geringere Wärmeausdehnung aus. Bei der Fertigung konnte jedoch eine lokale Korrosion nicht verhindert werden. Da die Korrosion von innen kam konnte diese nicht eliminiert werden, weshalb der ganze Verdränger ersetzt werden musste.

3.6.3 Temperatursensoren

Die ursprünglich verwendeten Temperatursensoren waren nicht genügend temperaturbeständig. Die Schweissstelle zuvorderst am Sensor konnte die Temperatur von 820°C auf die Dauer nicht aushalten. Die preiswerten Sensoren wurden durch ein Schweizerfabrikat ersetzt.

3.6.4 Riss in der Haube

Die Schweissnähte zwischen dem Druckgehäuse und den Flanschen zur Befestigung der Gegenschwingmasse waren ungenügend und verursachten Risse. Dadurch entstanden kleine Leckagen an Arbeitsgas, was den Betrieb der Feldtestgeräte störte. Diese Risse wurden ausgeschliffen und durch eine stärkere Schweissnaht ersetzt. Auch die noch nicht beschädigten Hauben wurden zur Verstärkung nachgeschweisst.

3.6.5 Steuerung, Regelung, Betriebssicherheit

Das gesamte Steuer- und Regelsystem wurde auf Basis von Sigmatek Kontrollgeräten, inkl. Remote Access und Sigmatek Connect neugestaltet und programmiert. Dieses erlaubt, die Feldtestgeräte auf Distanz unter Berücksichtigung der Betriebsvorgaben des Kunden zu betreiben und zu regeln.

Als wichtige Sicherheitsmassnahme müssen die Feldtestgeräte automatisch abstellen, wenn gewisse Messparameter vorgegebene Grenzwerte überschreiten. Dies betrifft Temperaturen, Drücke, Kolbenamplituden, elektrischen Parameter, Gasleckagen, Vibrationen etc. Die Betriebssicherheit wurde erprobt und gilt bei diesen Feldtestgeräten als oberster Priorität.

Die wichtigsten Betriebsparameter werden automatisch protokolliert und können über das Internet von verschiedenen Stellen abgerufen und nötigenfalls weiterverarbeitet werden. Das gesamte Sicherheitssystem und die Elektronik sind in einem Steuerschrank untergebracht. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel von systematisch kontrollierten und gesammelten Daten der wesentlichsten Betriebsparameter dieser Feldtestgeräte.



Brennertemp.	Sp. Stirling	Sp. Gen	Str. Stirling	P. Stirling	P. BHKW	PF Stirling	PF Generator	HK Hub	HK Mittelpos.	RM Hub
—	—	291 V	7.7 A	-1'703 W	—	1.00	0.75	23.85 mm	—	17.64 mm
825.00 °C	219 V	283 V	8.0 A	-1'726 W	-1'514 W	0.99	0.76	24.08 mm	0.11 mm	17.56 mm
—	—	292 V	7.7 A	-1'722 W	—	1.00	0.76	24.14 mm	—	17.62 mm
—	—	289 V	7.8 A	-1'717 W	—	0.99	0.76	24.07 mm	—	17.72 mm
—	—	285 V	7.8 A	-1'705 W	—	0.99	0.76	23.93 mm	—	17.67 mm
—	—	286 V	7.9 A	-1'735 W	—	0.99	0.76	24.37 mm	—	17.70 mm
828.30 °C	217 V	286 V	8.1 A	-1'736 W	-1'519 W	0.99	0.75	23.69 mm	0.10 mm	17.78 mm
—	—	283 V	8.0 A	-1'709 W	—	0.99	0.75	23.86 mm	—	17.66 mm
—	—	277 V	8.0 A	-1'705 W	—	0.98	0.76	23.91 mm	—	17.72 mm
—	—	289 V	7.9 A	-1'740 W	—	0.99	0.75	24.12 mm	—	17.71 mm
—	—	283 V	7.9 A	-1'688 W	—	0.99	0.75	23.49 mm	—	17.60 mm
824.70 °C	215 V	279 V	8.1 A	-1'720 W	-1'505 W	0.99	0.76	24.06 mm	0.13 mm	17.84 mm

Abbildung 5: Datentabelle, der aufgezeichnete Daten im Minutentakt, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

Störsignale

Auftretende Störsignale beeinflussten die Safety-Steuerung. Eine kurzzeitige Störung konnte die Kommunikation unter den Steuermodulen für wenige ms unterbrechen, was bei der sehr sensiblen Safety-Steuerung eine Gerätestörung auslöste. Eine zusätzliche Speiseeinheit (nur für die Safety-Steuerung) wurde benötigt um dieses Problem zu lösen.

Softwareverbesserung und Sicherheit

Die Software wird laufend verbessert und optimiert. Durch den Remotezugriff können die Softwareanpassungen jeweils zeitnah vorgenommen werden. So wurde zum Beispiel die Abstimmung zum Brenner verbessert, Kabelbrüche überwacht und ein zweiter Reset für heikle Störungen (Gasalarm oder Übertemperatur im Kamin) erstellt. Dadurch wurde die Sicherheit laufend erhöht.

3.7 Messprotokolle

3.7.1 Übersicht

In der Abbildung 6 können alle Feldtestgeräten auf einen Blick betrachtet werden und es sind mögliche Probleme erkennbar. Mit einem einfachen Farbschema, in der Tabelle 7 beschrieben, ist rasch der Zustand der Feldtestgeräte zu erkennen.

Farbe	Zustand
Dunkel Grün	Laufender Betrieb
Hell Grün	Startphase
Mittel Grün	Herunterfahren
Blau	Warten auf das Einschaltsignal
Orange	Störung
Rot	Not-Aus

Tabelle 7: Anzeige des Betriebszustands der Feldtestgeräte, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

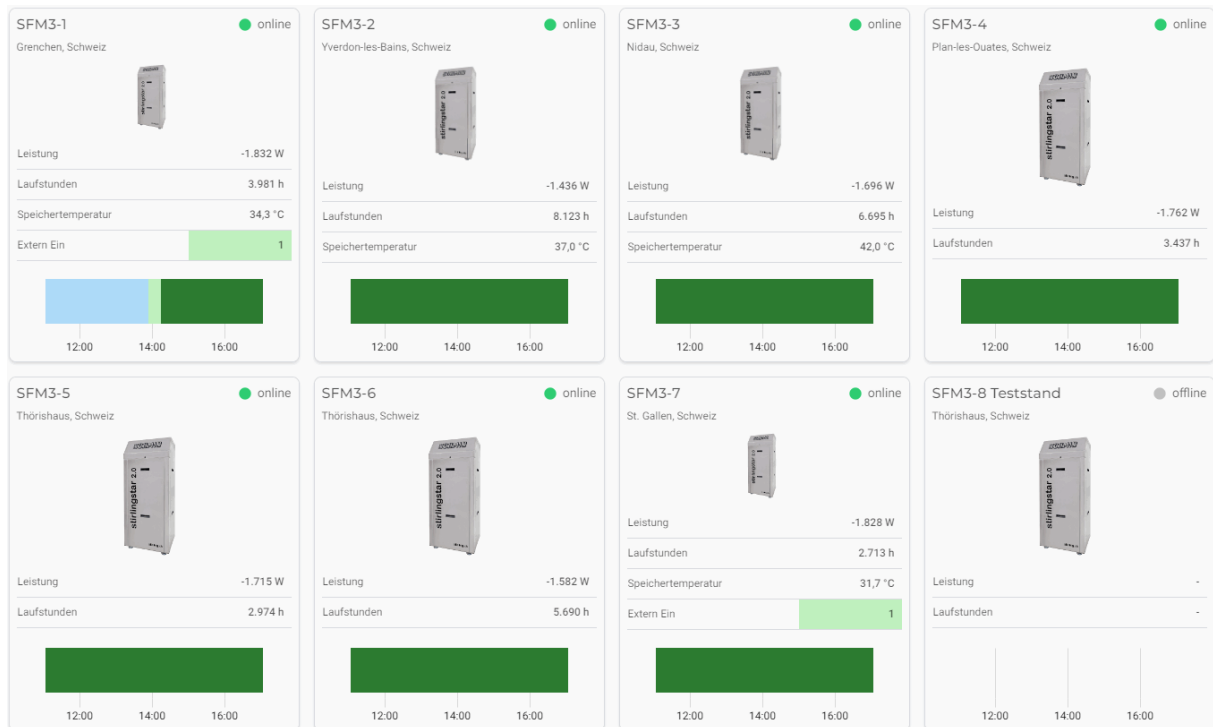


Abbildung 6: Remote Übersicht der Feldtestgeräte vom 28.02.23 17:05, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

3.7.2 Live Ansicht

Abbildung 7 zeigt eine Live Übersicht der Daten in Echtzeit. Abweichungen sind für geübte Augen gut zu erkennen. Versuchs- oder bei Kunden installierte Feldtestgeräte werden so überwacht.

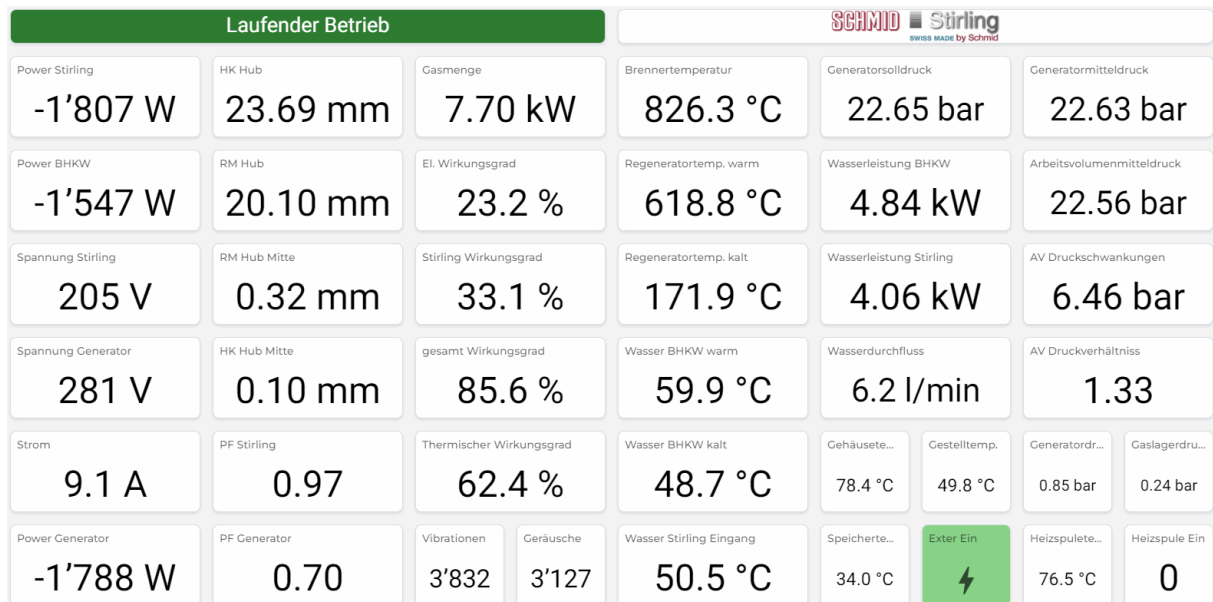


Abbildung 7: Remote Live Ansicht, bei laufendem Betrieb, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

3.7.3 Zeitlicher Verlauf

Mittels Kurven können die Verläufe wichtiger Messgrößen über die Zeit beobachtet und Tendenzen festgestellt werden. Ebenfalls können Einschaltbefehle der Kundensteuerung oder z.B. Speichertemperaturen angezeigt werden.



Die Messdaten werden Minuten- oder Stundenweise aufgezeichnet.

Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Verlauf wichtiger Betriebsparameter so wie diese von der SIGMATEK-Remote Access-Steuerung übertragen werden. Mögliche Störungen oder Abweichungen können vor Ort oder via Internet erkannt und rasch korrigiert werden.

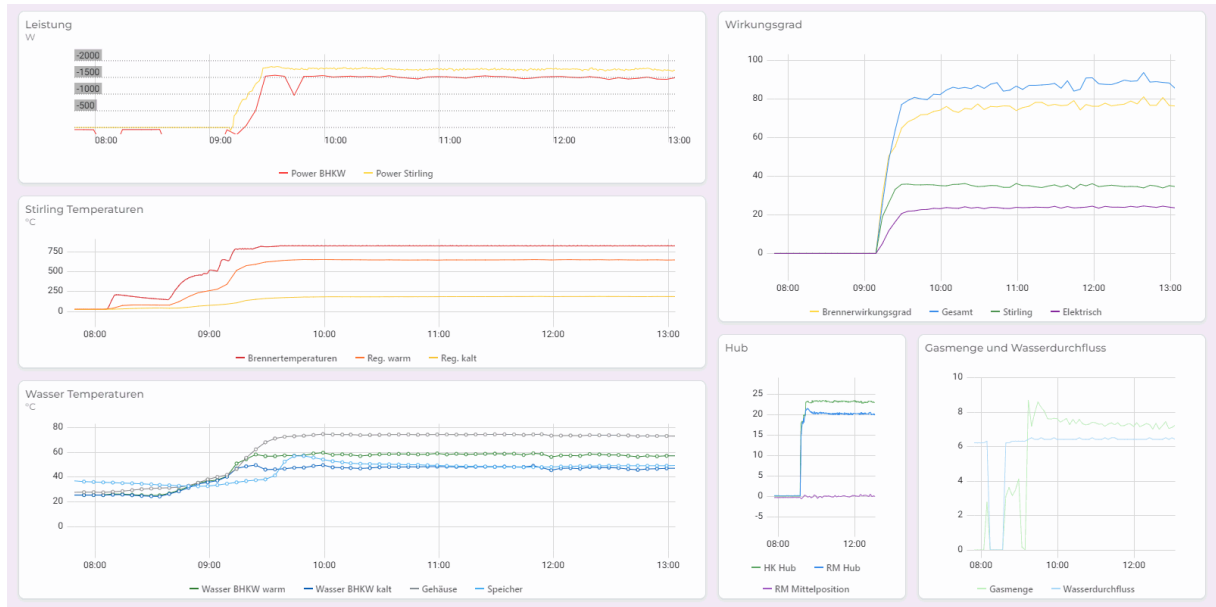


Abbildung 8: Datenaufzeichnung Verlauf, Schmid Stirling GmbH, 2022

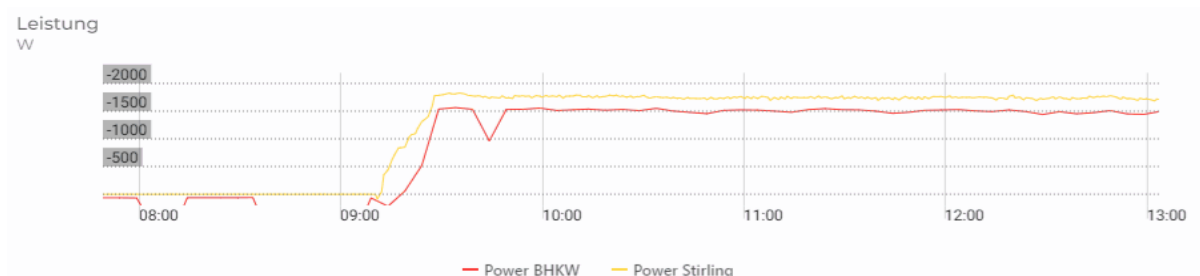


Abbildung 9: Erzeugte elektrische Leistung, Schmid Stirling GmbH, 2022

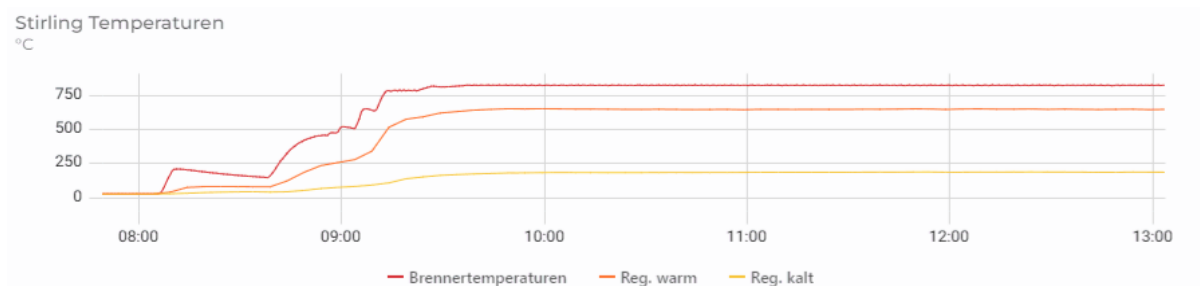


Abbildung 10: Freikolben-Resonanzstirling Temperaturen (Reg. = Regenerator), Schmid Stirling GmbH, 2022

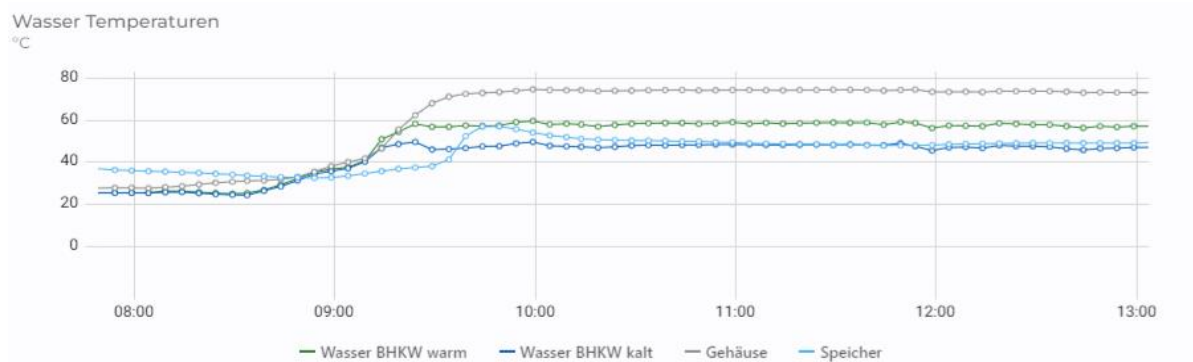


Abbildung 11: Diverse Wassertemperaturen, Schmid Stirling GmbH, 2022

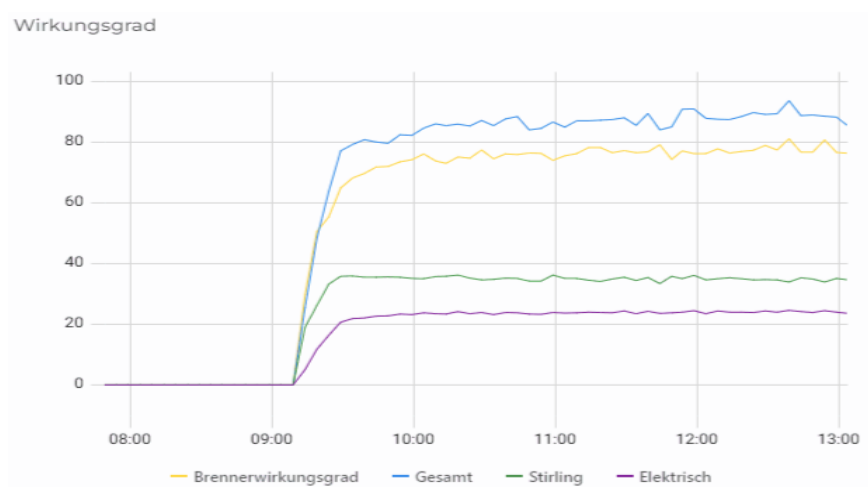


Abbildung 12: Diverse Wirkungsgrade, Schmid Stirling GmbH, 2022

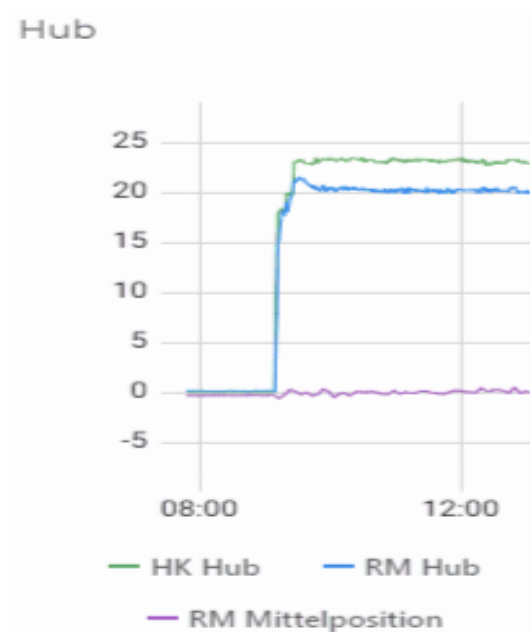


Abbildung 13: Kolbenhub (HK = Hauptkolben, RM = Resonanzmassen), Schmid Stirling GmbH, 2022



Abbildung 14: Gas und Wasserdurchfluss, Schmid Stirling GmbH, 2022

3.8 Instrumentierung

Ein Hauptpunkt der Entwicklung betraf die gesamte Instrumentierung der Freikolben-Resonanzstirling, um ihren Betrieb genauer ermitteln und überwachen zu können. Die gesamte Steuerung der Feldtestgeräte konnte verbessert werden, sowohl für die Überwachung des Startvorganges wie des stabilen Betriebes unter nominalen Bedingungen. Die gesammelten Daten erlauben auch, Vergleiche verschiedener Feldtestgeräten vorzunehmen und den Betrieb besser zu optimieren. Die Messungen erlauben, die Feldtestgeräte zu steuern, Bilanzen zu erstellen, zu überwachen und nötigenfalls den Betrieb zu unterbrechen.

Sensorart	Anzahl
Thermoelemente Typ K	8x
Thermoelemente PT 1000	5x
Durchflusssensor Wasser	1x
Durchflusssensor Gas	1x
Gasdetektionssensor	1x
Drucksensoren	3x
Hubsensoren Hauptkolben	1x
Hubsensor Resonanzmasse	1x
Strommessung	4x
Spannungsmessung	4x
Vibrationssensor	1x
Brennerluftüberwachung	1x
Heliumdruckanzeige	1x

Tabelle 8: verwendete Messinstrumente der Feldtestgeräte, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023



Zusätzlich zu den eingebauten Messgeräten muss jede Anlage mit äusseren Instrumenten versorgt und überwacht werden. Diese hängen an jedem Ort von den übrigen Komponenten ab.

Die Fachhochschule HEIG-VD in Yverdon ist Projektpartner und verfügt über eine Testanlage um das Verhalten des Freikolben-Resonanzstirling unter stationären wie zeitlich variablen Verhältnissen zu prüfen und detaillierte Bilanzen zu erstellen. Sie verfügt über Geräte zur Messung der Abgasqualität. Die verwendeten Instrumente sind im Bericht «Essais d'endurance» (Anhang 5) umschrieben.

3.8.1 Datenaufzeichnung und Steuerung mit SIGMATEK

Ein Kernpunkt der Entwicklung betraf den Einsatz einer modularen, leistungsstarken Steuerung, welche frei programmierbar ist und mit welcher alle wesentlichen Betriebsparameter gesammelt und gespeichert werden können. Die permanente Leistungsüberwachung umfasst auch Sicherheitsfunktionen, womit Not-Aus-Schaltungen ausgelöst werden, damit gewisse kritische Grenzwerte nicht überschritten werden. Mit der Leistungsüberwachung muss auch die Trennung vom Netz, insbesondere bei einem Stromausfall sichergestellt werden.

Im Anhang 1 sind alle aufgezeichneten Daten dargestellt und je nach Wichtigkeit alle Minuten, 5 Minuten, 15 Minuten oder stundenweise aufgezeichnet.

Für die Durchführung der Feldtests an insgesamt 7 Feldtestgeräten mussten diese durch gesicherten Fernzugriff, mit Aufzeichnung der relevanten Geräte- und Prozessdaten, über das Internet von Ferne überwacht und kontrolliert werden.

Der Einsatz von Erdgas erfordert Sicherheitsmassnahmen, welche über eine zusätzliche Safety-Steuerung gewährleistet wird. Diese garantiert, dass bei jedem Notfall, wie bei Stromausfall das gesamte Feldtestgerät heruntergefahren, sowie die Erdgas- oder Propanzufuhr abgestellt wird.

3.8.2 HEIG - «Essais d'endurance» (Anhang 5) und «Caractérisation d'un Stirling à résonance» (Anhang 4)

Die Hauptaufgaben der HEIG betrafen hauptsächlich folgende Punkte:

- Messung des Wirkungsgrades des energetischen Umsatzes des Freikolben-Resonanzstirling. Die genaue Ausmessung erfordert den Einsatz von reinem Erdgas aus Flaschen, genau bekanntem Brennwert.
- Messung des Verhaltens unter Volllast wie an bestimmten Teillastpunkten.
- Zeitlicher Ablauf der Startphase, mit Beurteilung des energetischen Umsatzes während dieser Phase.
- Abschätzung der optimalen hydraulischen Speichergrösse.

Die von der HEIG-VD gemessenen Leistungsdaten sind in ihrem Bericht «Caractérisation d'un Stirling à résonance» (Anhang 4) zusammengestellt. In ihrem zweiten Bericht «Essais d'endurance» (Anhang 5) sind die Resultate in der Feldtestphase analysiert und mit den Laborwerten verglichen.



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Versuchsläufe an der HEIG-VD in Yverdon

4.1.1 Aufstellungsort und Beziehung mit dem Kunden

Die HEIG-VD ist als Projektpartner beauftragt, die Leistungsdaten eines Feldtestgerätes auszumessen und mit den Ergebnissen der Schmid Stirling GmbH zu vergleichen. Als Referenz wird diese Einheit unter Volllast, bei Wassertemperaturen von 40/50°C (ein/aus) sowie mit 30/40°C und 50/65°C betrieben. Ein Versuchslauf bei ca. 70% Teillast wurde durchgeführt. Der Betrieb und die Auswertung dieser Versuche sind in einem separaten Bericht der HEIG-VD «Caractérisation d'un Stirling à résonance» (Anhang 4) zusammengefasst.

Die gemessenen Daten bestätigen weitgehend die vorerst bei der Schmid Stirling GmbH an derselben Feldtestgeräten ermittelten Werte. Das angestrebte Ziel eines elektrischen Wirkungsgrades von 25 % wurde erreicht. Bei einem Hub des Hauptkolbens von 24 mm liegen die abgegebenen Leistungen (bei einem Betrieb unter Nominalbedingungen) zwischen 1900 und 2000 W. Die gebauten Einheiten sind für höhere Kolbenhübe und entsprechend höhere Leistungen ausgelegt, welche aber wegen der hohen Belastung der Tellerfedern bisher nicht gefahren wurden.



Abbildung 15: Der Freikolben-Resonanzstirling aufgestellt an der HEIG-VD in Yverdon, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2021

Ende Oktober 2021 wurde das Feldtestgerät in einem Privathaus in Yverdon installiert, um das Gebäude mit Strom und Wärme zu versorgen. Dieses Feldtestgerät wurde während zwei Heizperioden von Schmid Stirling GmbH und der HEIG-VD gemeinsam betreut.

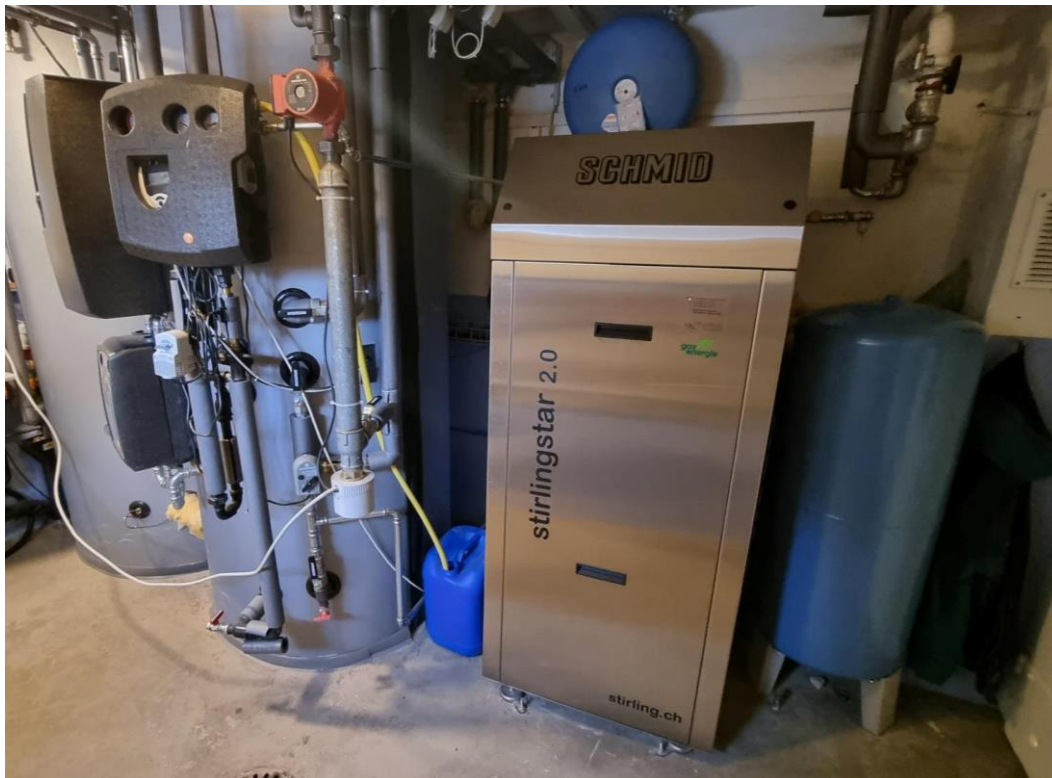


Abbildung 16: Das Feldtestgerät eingebaut in einem Einfamilienhaus in Yverdon, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

Nach dem Umzug in das Einfamilienhaus wurde die Wassertemperatur auf Kundenwunsch hin auf 55°C erhöht, was die Leistung und den Wirkungsgrad der Feldtestgeräte senkt. Zudem verstellte sich der Brenner oder die Brennerkonstellation, wodurch sich die Wärmeübertragung auf den Erhitzerkopf verschlechterte und die abgegebene elektrische Leistung abnahm.

Bei der Planung oder in der Ausführung wurde die Backup- Unterstützung mit einer separaten Heizung übersehen. Falls der Freikolben-Resonanzstirling ausfällt und sich der Wärmespeicher im tiefen Winter leert, kann dieser nur schwer nachgefüllt werden. Als Notlösung wurde aussen am Wärmespeicher eine elektrische Widerstandsheizung eingebaut. Diese kann anstelle des Freikolben-Resonanzstirling 5 kW Heizleistung ins System einspeisen. Die Widerstandsheizung kann aber nicht parallel zum Freikolben-Resonanzstirling betrieben werden, da sich dadurch der Wasserdurchfluss verändert.

Die zweite Heizsaison verlief ohne Zwischenfälle und zusätzliche Wärme und Strom konnten erzeugt werden.

4.1.2 Standfestigkeit und Ausfälle Dezember 2022 bis April 2023

Das Feldtestgerät in Yverdon lief genau nach Vorgaben, es traten kaum abweichende Betriebsparameter auf, die den Betrieb störten. Durch externes Quittieren der Fehler/Störungen lief der Freikolben-Resonanzstirling fast autonom.

Das Feldtestgerät war leicht undicht. Die geringe Leckage konnte durch Nachspeisen aus einer Heliumzusatzflasche ausgeglichen werden. Die undichte Stelle war auf eine Verschraubung zurückzuführen.

Der Freikolben-Resonanzstirling wurde langfristig betrieben, an kälteren Tagen ohne Unterbruch.

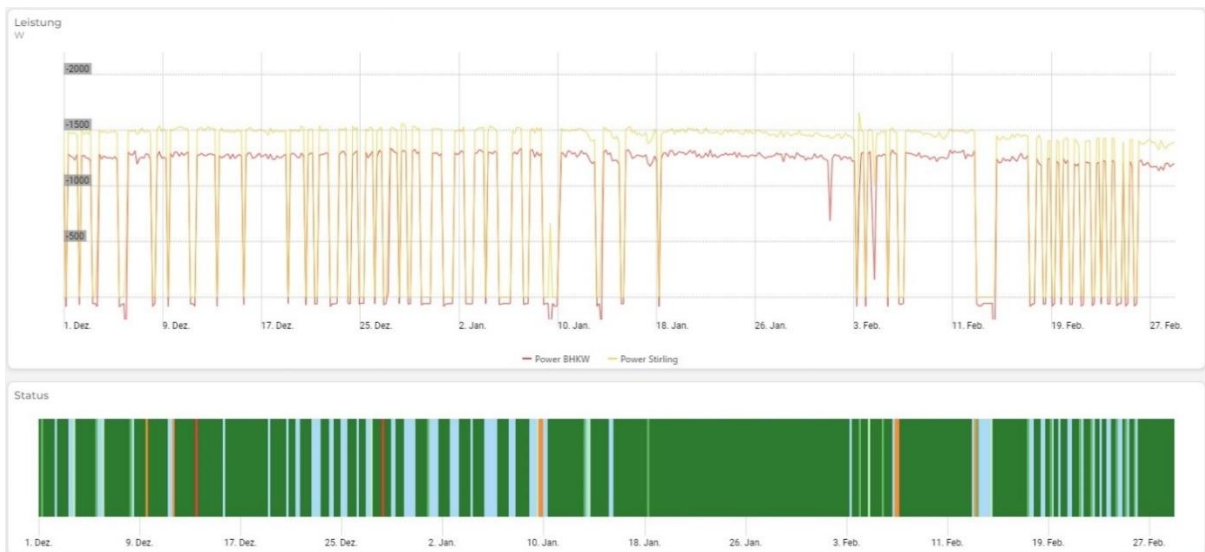


Abbildung 17: Leistungsverlauf des Freikolben-Resonanzstirling in Yverdon 1.12.23 - 28.02.23, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

4.1.3 Stromanalyse Yverdon

Die Stromproduktion des Freikolben-Resonanzstirling wird mit dem Verbrauch des Gebäudes verglichen, wofür die monatlichen Stromdaten des Hausbesitzers beigezogen wurden.

Im gleichen Gebäude sind noch eine kleine PV-Anlage und eine Solarthermie eingebaut.

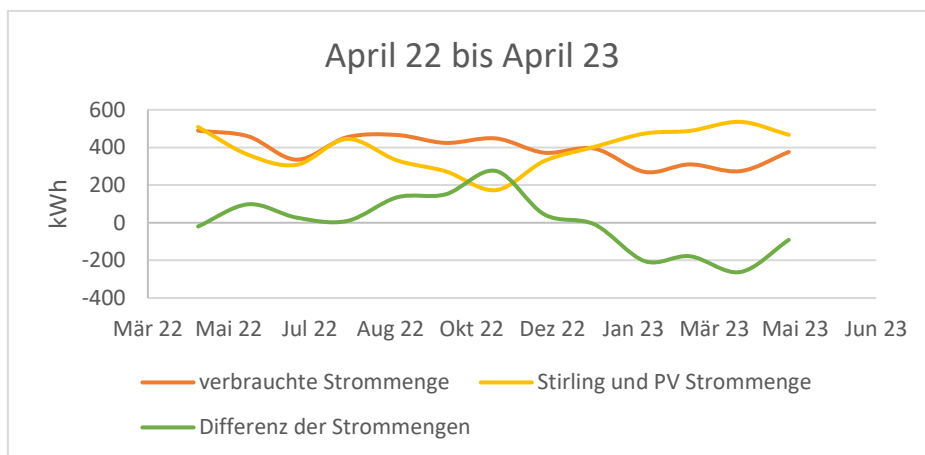


Abbildung 18: Stromübersicht Yverdon 1.04.22 – 30.04.23, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

Abbildung 18 zeigt die Stromsituation von April 2022 bis April 2023. Bis Oktober 2022 lief der Freikolben-Resonanzstirling sehr wenig und die PV / Solarthermie versorgten das Gebäude. Das Einschalten des Freikolben-Resonanzstirling ist an der steigenden Stromproduktion deutlich sichtbar. In der Beobachtungsperiode vom 1.12.22 bis 30.4.23 produzierte der Freikolben-Resonanzstirling mehr Strom als die vierköpfige Familie und ihr Elektroauto verbrauchten. Der Stromüberschuss entstand dadurch, dass der Freikolben-Resonanzstirling entsprechend dem Wärmebedarf des Gebäudes betrieben wurde. Optimierungsmöglichkeiten: Eine hohe Laufzeit des Freikolben-Resonanzstirling (wärmegeführt) muss beibehalten werden. Bei einem guten Rückliefer Tarif des Stromversorgers ist die Wirtschaftlichkeit gegeben. Sollte dies nicht der Fall sein so steht die Möglichkeit offen, mit einem Nachbarn eine ZEV (Zusammenschluss zum Eigenverbrauch) zu bilden. In diesem Fall verbraucht der Nachbar den überschüssigen Strom und bezahlt einen angemessenen Preis. Weitere Erläuterungen befinden sich in den Kapiteln 5.5 - 5.7.



4.2 Plan-les-Ouates, Genf

4.2.1 Aufstellungsort und Beziehung mit dem Kunden

Die von den SIG mitfinanzierte Feldtestgeräte wurde in dem Gebäude des lokalen Schwimmbades von Plan-les-Ouates aufgestellt. Der Aufbau wurde von der HEPIA, zusammen mit einem lokalen Installateur, vorgenommen. Im September 2021 wurde dieses Feldtestgerät vom TISG des VSG in einer Einzelabnahme von Gasgeräten homologiert und in Betrieb genommen.

Eine Wärmepumpe (WP) wird verwendet, um mit dem erzeugten Strom zusätzliche Wärme zu erzeugen. Die HEPIA ist beauftragt, den kombinierten Betrieb der WKK und WP unter optimalen Bedingungen zu ermitteln und auszuwerten, wobei die Ergebnisse in einem separaten Bericht der HEPIA «Projet Stirling» (Anhang 6) dargestellt sind.



Abbildung 19: Der Freikolben-Resonanzstirling eingebaut im Heizungskeller des lokalen Schwimmbades Plan-les-Ouates, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

Der Betrieb dieses Feldtestgerätes hängt vom Zusammenspiel der verschiedenen Heizorgane des Gebäudes ab. Beim Starten des 270kW Buderus-Brenners, in der Abbildung 19 blau, sinkt der Erdgasdruck um etwa 10%. Der Brenner des Feldtestgerätes musste spezifisch angepasst werden, damit er trotz grossen Schwankungen des Speisedruckes zuverlässig funktioniert. Zudem verändert sich der Wasserdurchfluss und dessen Temperatur je nach Einstellung des Speichers und der Verteilung, was den Betrieb des Freikolben-Resonanzstirling ebenfalls beeinflusst. Spezifische Anpassungen - Remote und vor Ort - waren erforderlich, um das Feldtestgerät zuverlässig betreiben zu können. Leider konnte das Feldtestgerät nicht immer unter optimalen Bedingungen des Brenners sowie des gesamten Systems betrieben werden und dadurch schwankten die Abgaswerte zeitlich stark.

Das Heizungswasser hatte eine feste Temperatur von 55°C. Der erzeugte Strom wie die Wärme wird ständig in den Gebäuden und im Schwimmbad verbraucht. Während dem gesamten Feldtest war der Freikolben-Resonanzstirling 4452 Stunden lang in Betrieb. Die einzigen längeren Unterbrüche waren durch die Ferienperiode, einem Federbruch, versehentlicher Not-Aus durch das Aufsichtspersonal sowie einem Riss im Erhitzerkopf bedingt.



Diverse Ausfälle der Internetverbindung verzögerten die Feineinstellung der Anlage. Die Raumtemperatur war konstant hoch, was eine Anpassung des Gestell-Lüfters mit sich zog. Alle in diesem Kapitel beschriebenen Umstände ergaben erschwerte Bedingungen für den Betrieb des Freikolben-Resonanzstirling.

4.2.2 Standfestigkeit und Ausfälle Dezember 2022 bis April 2023

Das Feldtestgerät in Genf war ab Mitte Dezember 2022 bis Mitte Januar 2023 im Stillstand, da das Schwimmbad in dieser Zeit geschlossen war.

Der Freikolben-Resonanzstirling funktionierte einwandfrei, mit sehr wenigen Störungen. Ein lokaler Einsatz war nötig, um den Wasserdurchfluss neu und stabiler einzustellen.



Abbildung 20: Leistungsverlauf des Feldtestgerätes in Genf 1.12.23 - 28.02.23, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

4.2.3 Stromanalyse Genf

HEPIA betrieb eine elektrische Wärmepumpe, die neben dem Freikolben-Resonanzstirling im gleichen Raum untergebracht ist. Die beiden Einheiten sind nur über das elektrische Netz miteinander verbunden und werden somit autonom betrieben. Resultate des kombinierten Einsatzes werden im Rahmen eines separaten (P+D) Projektes der HEPIA «Projet Stirling» (Anhang 6) analysiert und ausgewertet. Die untenstehende Abbildung 21 zeigt die energetische Bilanz.



Bilan énergétique du 2022-07-31 au 2023-07-31

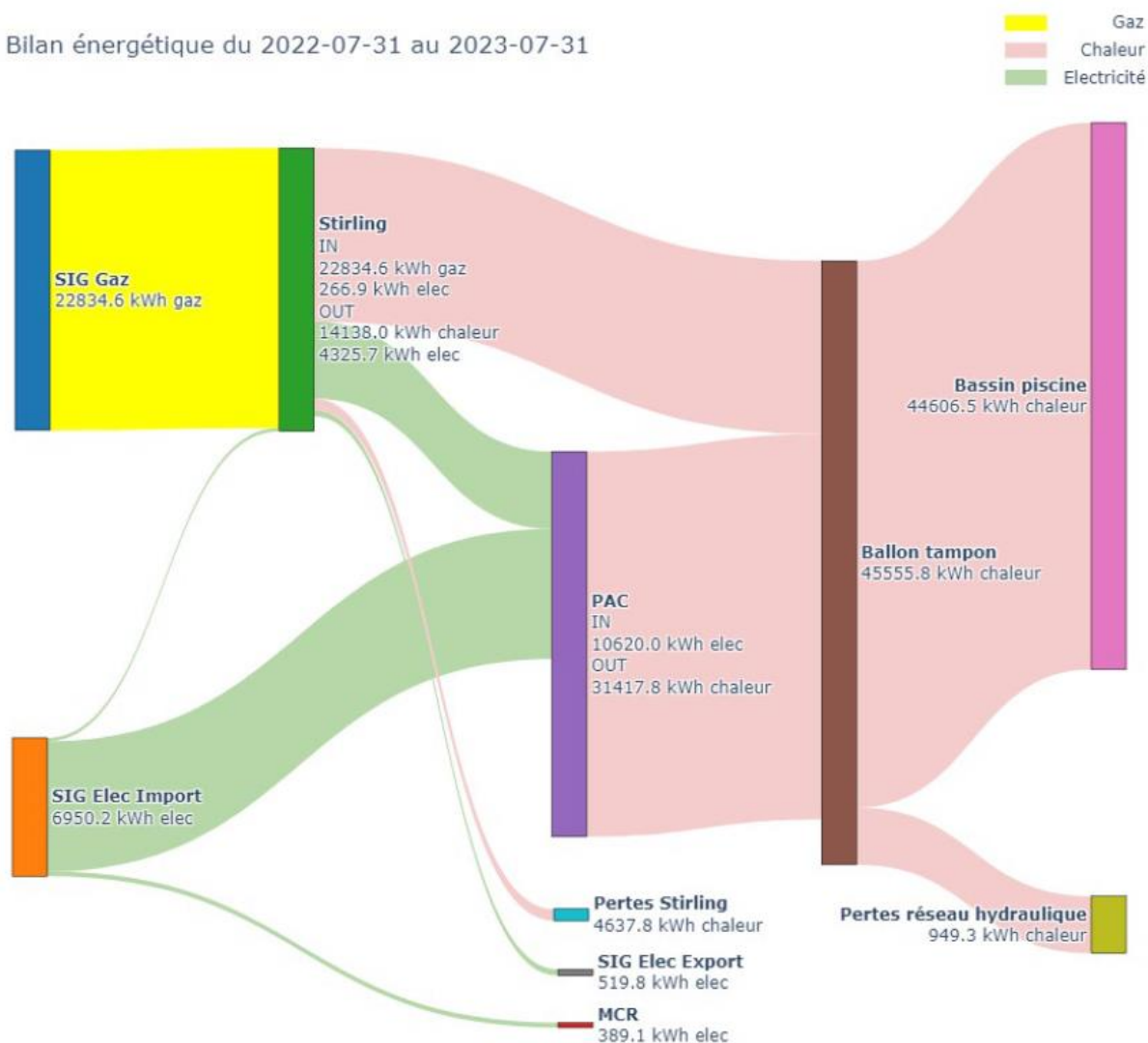


Abbildung 21: Energetische Bilanz in Genf 31.07.2022 – 31.07.2023, Quelle: «Stirling Project» (Anhang 6), 2023



4.3 Nidau, Biel

4.3.1 Aufstellungsort und Beziehung mit dem Kunden

Ein vom ESB und GVM mitfinanziertes Feldtestgerät wurde in einem privaten Zweifamilienhaus in Nidau aufgestellt. Die peripheren Geräte des Freikolben-Resonanzstirling umfassen einen Spitzenheizkessel und einen Heisswasserboiler.



Abbildung 22: Der Freikolben-Resonanzstirling in Biel in einem Zweifamilienhaus eingebaut, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2021

Die Inbetriebnahme wurde in Folge eines falschen Dreiwegventils verzögert. Bei der Planung war die Kommunikation mit dem Kunden und seinen Partnern ungenügend. Es wurde übersehen, dass der Freikolben-Resonanzstirling die Grundlast abdeckt, aber nicht als einzige Heizung funktioniert, es besteht eine Gastherme für die Spitzenlasten. Des Weiteren wurde eine PV-Anlage installiert, welche bei der Planung zu wenig berücksichtigt wurde. Zusammen mit dem Freikolben-Resonanzstirling ergab sich zeitweilig eine Stromüberproduktion, welche durch den gestiegenen Gaspreis und einer geringen Strompreisvergütung ungünstig war.

Auf Wunsch des Kunden wurden Heizstäbe im Speicher eingebaut, um die Stromüberproduktion möglichst selber im Gebäude zu nutzen. Die getroffene Lösung ist energetisch sicher nicht sehr vorteilhaft. Sie ergab sich durch die vorliegenden, ungünstigen Vergütungen und die sehr hohen Gaspreise. Sie erhöhte die Eigenstromnutzung jedoch signifikant. Die Stromsituation wird in Kapitel 4.3.3 behandelt.

Beim verbreiteten Einsatz von WKK-Geräten sollte beachtet werden, dass diese so betrieben werden, dass die Rückspeisung zu Spitzenbedarfszeiten anfällt. Der Betreiber sollte für die Rückspeisung während gewissen Zeitfenstern besser entschädigt werden. Dies läge auch im Interesse des Stromversorgers, welcher über zusätzliche Kapazitäten verfügen würde.



Das Gebäude dieses Kunden ist etwas älter, nur der untere Stock ist neu isoliert und mit Bodenheizung ausgestattet. Im Dachgeschoss wird mit Radiatoren geheizt und die Aussenisolation ist noch nicht erneuert. Bei sehr kalten Tagen waren Heiztemperaturen von über 60°C nötig, wodurch die Rücklauftemperatur anstieg und der Freikolben-Resonanzstirling abgestellt werden musste. Durch manuelle Gegenmassnahmen erhöhten sich die Temperaturen im Freikolben-Resonanzstirling wodurch sich die Resonanzmassen verklemmten.

4.3.2 Standfestigkeit und Ausfälle Dezember 2022 bis April 2023

Zuerst musste ein Temperatursensor ausgewechselt werden. Anschliessend musste eine Resonanzmasse, welche zu hohe Reibung aufwies, ersetzt werden. Durch Auswechseln der Büchse wurde das Kolbenspiel leicht erhöht. Die Laufzeiten waren beachtlich, ein hoher Anteil des Wärmebedarfs des Gebäudes konnte gedeckt werden.

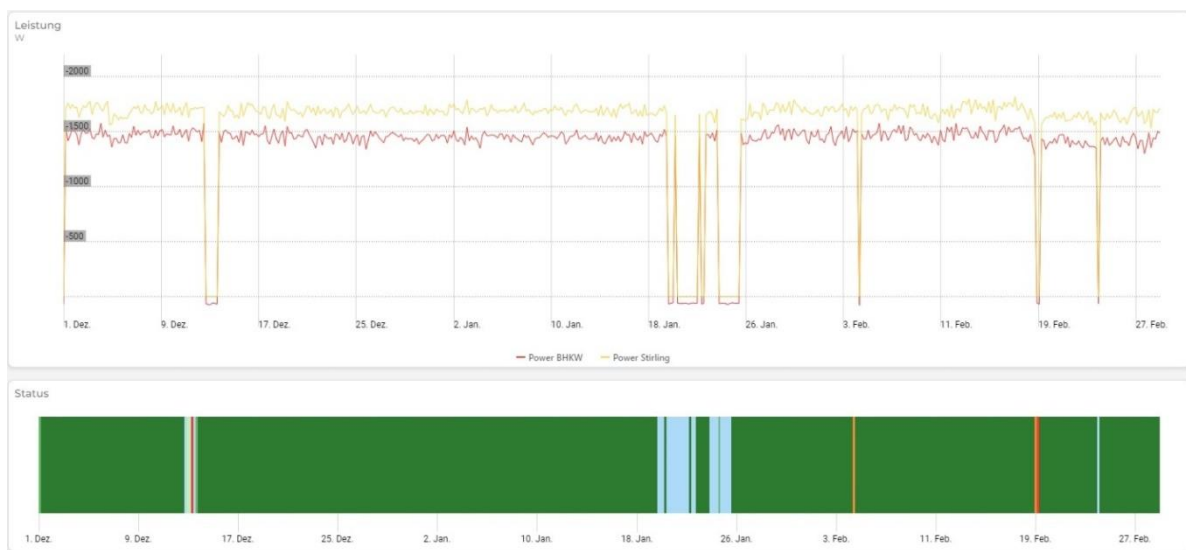


Abbildung 23: Leistungsverlauf des Feldtestgerätes in Nidau 1.12.23 - 28.02.23, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

4.3.3 Stromanalyse Nidau

Die Stromdaten des Feldtestgerätes in Nidau wurden vom eingebauten Loxone-Regler entnommen. Die vom Freikolben-Resonanzstirling produzierte Leistung ist grün, jene der PV-Anlage gelb und der Hausverbrauch rot dargestellt.

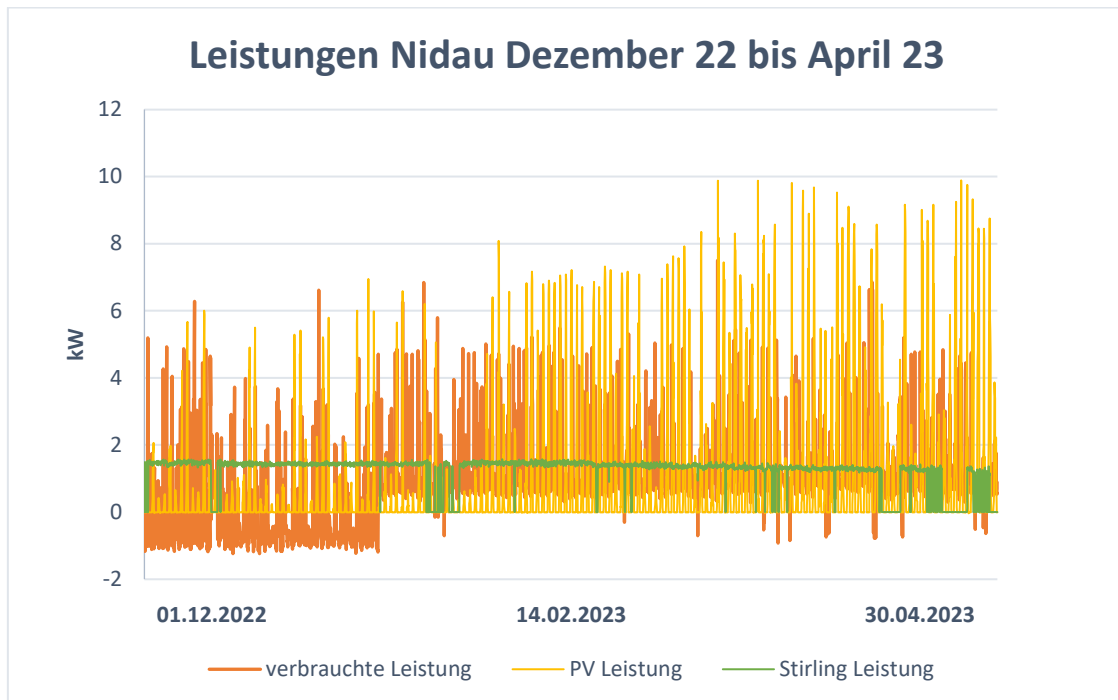


Abbildung 24: Stromverbrauch Nidau 1.12.22 – 30.04.23, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

Im Januar wurden die Ansteuerung der Heizspule für den Freikolben-Resonanzstirling optimiert, wodurch die Rückspeisung vermindert wurde. Dies ist in der Abbildung 24 gut ersichtlich. Auf Wunsch des Kunden wird der überschüssig produzierte Strom in einem Widerstand in Wärme umgesetzt.

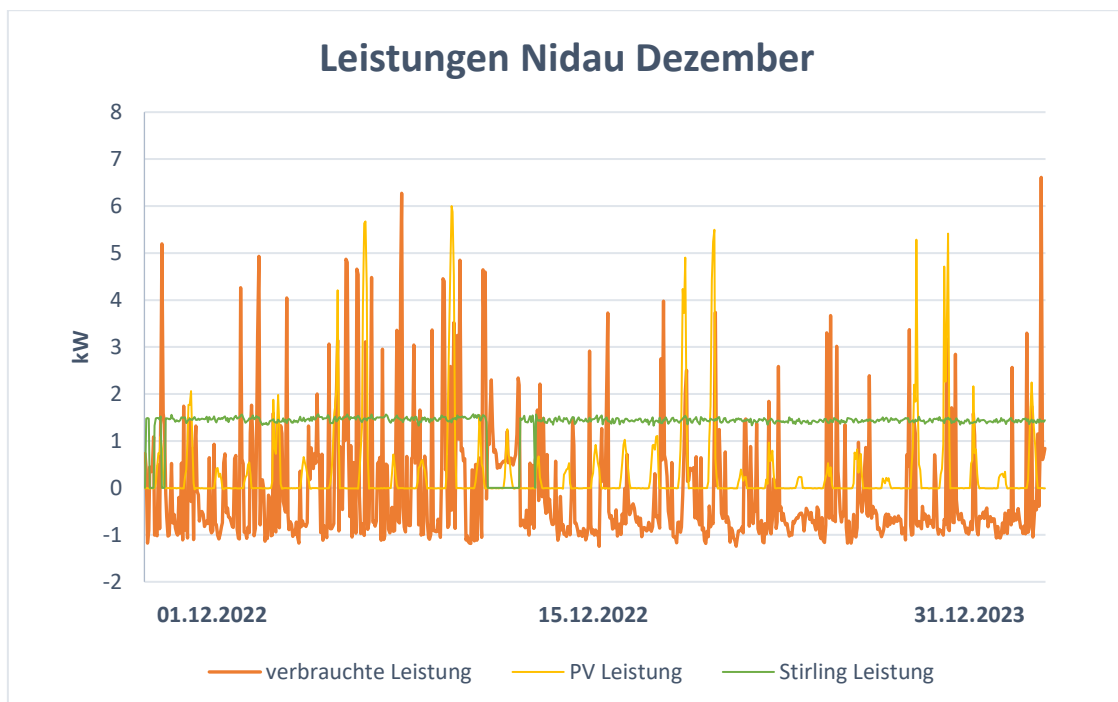


Abbildung 25: Leistungsverlauf des Freikolben-Resonanzstirling in Nidau Dezember 2022, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023



Das Gebäude mit zwei Wohnungen welche je zwei Personen beherbergen benötigt weniger Strom als der Freikolben-Resonanzstirling produziert. Während der Freikolben-Resonanzstirling läuft wird etwa 1 kWh ins Netz zurück gespiesen.

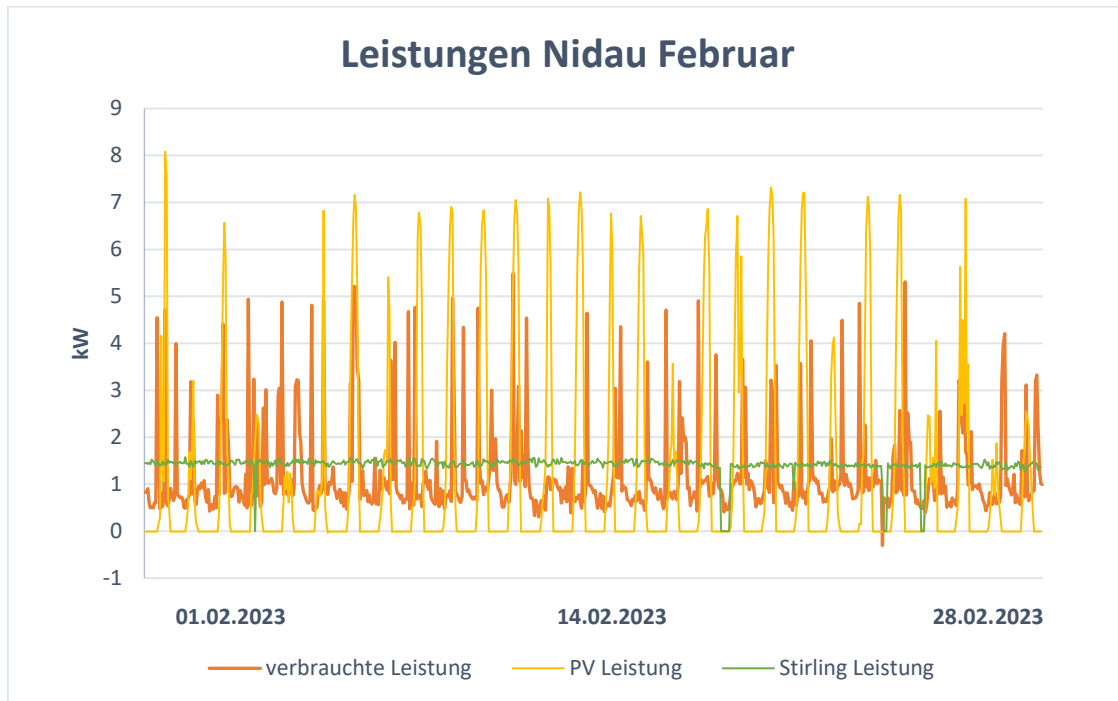


Abbildung 26: Leistungsverlauf des Freikolben-Resonanzstirling in Nidau Februar 2023, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

Im Februar lief der Freikolben-Resonanzstirling sehr konstant. Kein Strom wurde ins Netz zurückgespeist, sondern einer Heizspule zugeführt. Aus der Abbildung 26 ist klar ersichtlich, dass mit dem Einsatz eines Batteriespeichers der Eigenbedarf praktisch vollständig abgedeckt werden könnte. Hierzu befinden sich weitere Ausführungen in den Kapiteln 5.5 - 5.7.



4.4 Grenchen

4.4.1 Aufstellungsort und Beziehung mit dem Kunden

Ein Feldtestgerät wird vom GVM und der SWG Grenchen mitfinanziert und in einem Privathaus installiert. Das Feldtestgerät verfügt über einen Spitzenlastkessel und einen Heisswasserspeicher.



Abbildung 27: Das Feldtestgerät eingebaut in einem Einfamilienhaus in Grenchen, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

Das Feldtestgerät in Grenchen wurde als letzte installiert, die Inbetriebnahme wurde durch die gesammelten Erfahrungen der anderen Feldtestgeräten erleichtert. Eine kleine Undichtheit der Haube führten anfänglich zu Heliumverlusten, wodurch Arbeitsgas regelmässig nachgespeist werden musste. Durch die Reparatur der Haube konnte dies rasch behoben werden.

Anfänglich traten häufig Störsignale auf, wodurch das Feldtestgerät über Not-Aus – Signale abgestellt wurde. Durch stufenweise Verbesserungen konnte die Zahl der Ausfälle vermindert und bis zum Ende des Feldteste behoben werden. Die Sensoren müssen über eine neue Stromversorgung verdrahtet und weitere parametrische Anpassungen vorgenommen werden.

Der Kunde ist sehr zufrieden mit dem Freikolben-Resonanzstirling: er läuft zeitgerecht nach Bedarf und mit guter Leistung. Die Geräuschentwicklung in seinem Haus war noch zu hoch. Ein brummendes Geräusch wird vermutlich über Leitungen, Wände oder Türen in andere Räume übertragen. Lokale Massnahmen sind nötig um den Schallschutz und die Entkoppelung zu verbessern. Der Lüfter des Gestells war anfänglich zu laut; er wurde durch ein grösseres Modell ersetzt, welches bei niedriger Drehzahl die gleiche Fördermenge liefert.

In der zweiten Heizsaison erhöhten sich die Wassertemperaturen beim kombinierten Betrieb mit dem Stückholzofen auf Werte, welche zu einem Not-Aus des Feldtestgerätes führte. Die Grenztemperaturen und Durchflussmengen mussten besser eingestellt werden, um diese Störungen zu beheben.



4.4.2 Standfestigkeit und Ausfälle Dezember 2022 bis April 2023

Beim Betrieb dieses Feldtestgerätes stieg ursprünglich die Temperatur des Wassers am Eintritt des Freikolben-Resonanzstirling zu hoch an. Mehrere Parameter mussten genauer angepasst werden, um das Problem zu lösen.

Nach den Festtagen war die Internetverbindung unterbrochen; ohne Zugriff auf den Freikolben-Resonanzstirling konnte dieser nicht betrieben werden.

Der Kunde wünschte, den Freikolben-Resonanzstirling vorwiegend am Tag zu betreiben, was durch geeignete Softwareanpassungen realisiert wurde.

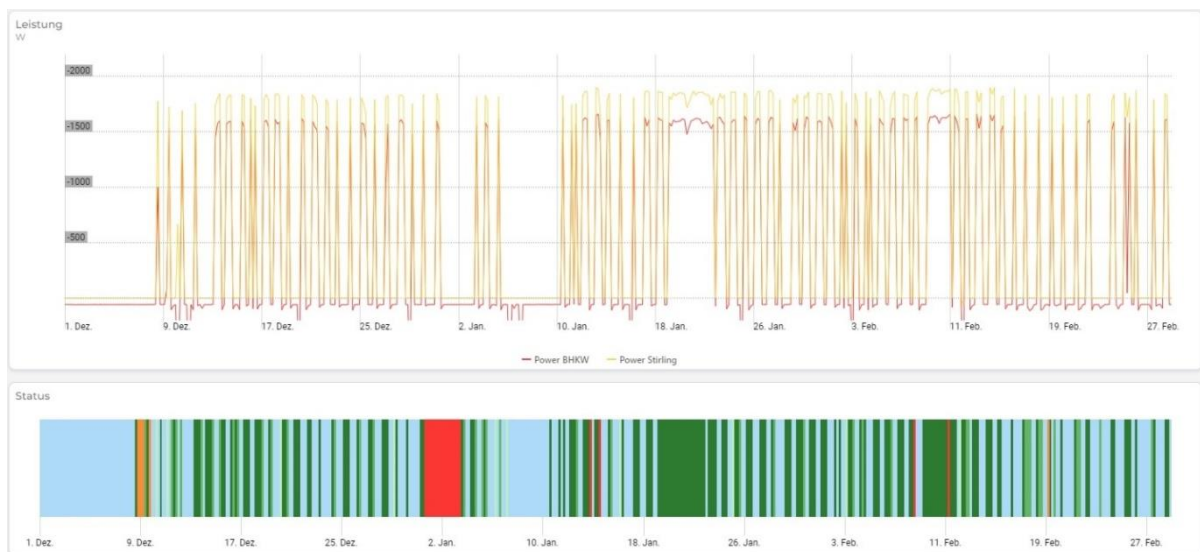


Abbildung 28: Lauf Grenchen 1.12.23 - 28.02.23 Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

4.4.3 Stromanalyse Grenchen

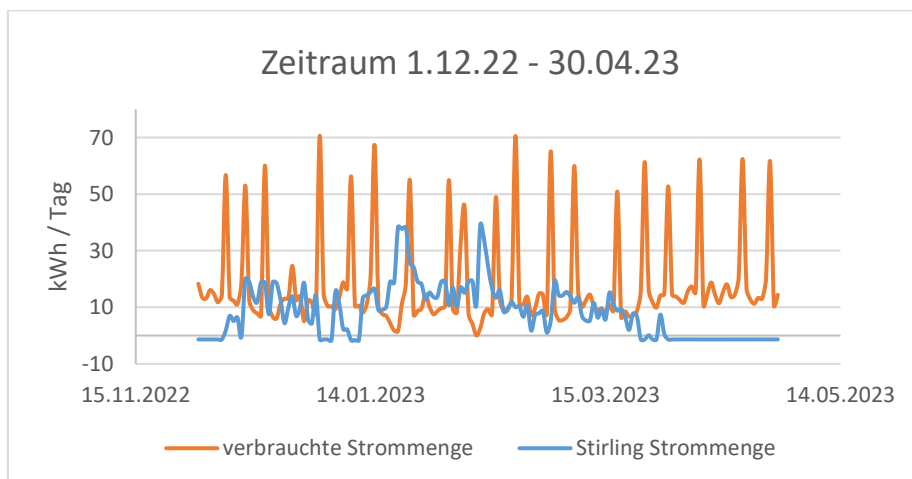


Abbildung 29: Leistungsverlauf des Freikolben-Resonanzstirling in Grenchen 01.12.2023-30.04.2023, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

Die Stromproduktion des Freikolben-Resonanzstirling während 5 Monaten belief sich auf 1242 kWh, der gesamte Verbrauch des Gebäudes 2618 kWh. Die hohen Verbrauchswerte werden beim Laden des Elektroautos erreicht. Mit einer längeren Betriebszeit des Freikolben-Resonanzstirling könnte mehr Strom produziert und mit dem Eigenverbrauch abgeglichen werden. Mit dem Einsatz einer Batterie könnte der Verbrauch noch besser abgedeckt werden.

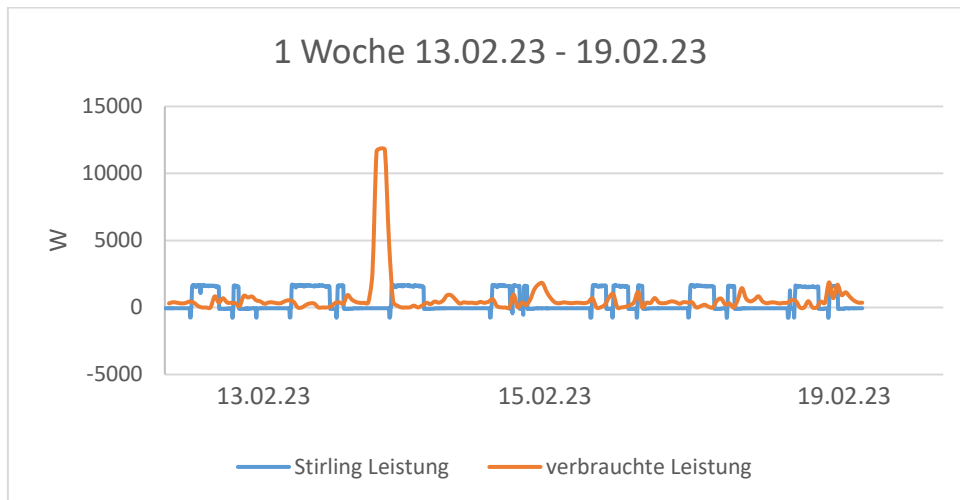


Abbildung 30: Leistungsverlauf des Freikolben-Resonanzstirling in Grenchen 13.02.23 – 19.02.23, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

In der Abbildung 30 ist der Verbrauch über eine Woche dargestellt. Der Freikolben-Resonanzstirling wird wie gewünscht jeden Morgen angestellt. Durch die hohe Wärmeproduktion mit dem Stückholzofen am Nachmittag wird der Freikolben-Resonanzstirling auch am Tag abgestellt. Der hohe Ausschlag beim Stromkonsum wird durch das Laden des Elektroautos verursacht. Mit einer Batterie könnte die Stromproduktion den Hausverbrauch besser abdecken.

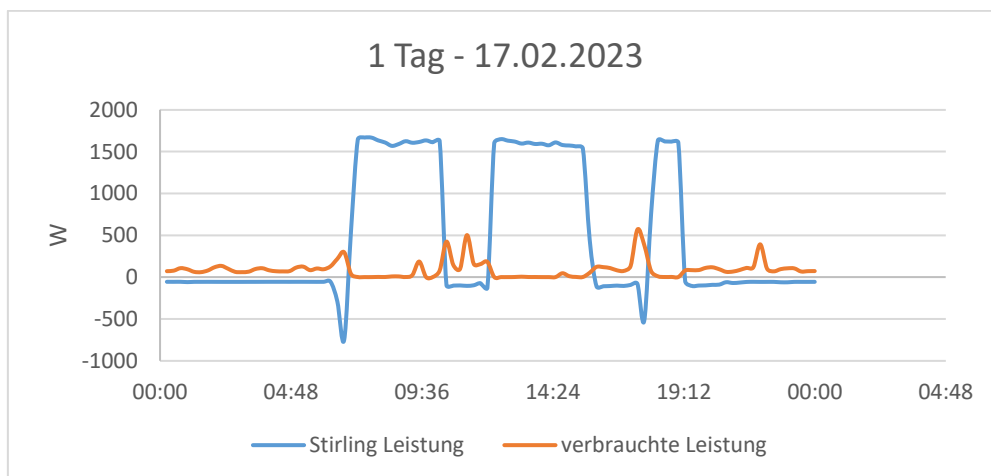


Abbildung 31: Leistungsverlauf der Freikolben-Resonanzstirling in Grenchen 17.02.2023, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

Die Tagesstromproduktion ist abhängig von der Produktion der Wärmemenge aus dem Stückholzofen, der Solarthermie (Somme) und wie viel der Speicher gefüllt ist. In der Abbildung 31 ist gut zu sehen, wie der Speicher gegen Mittag voll ist und der Freikolben-Resonanzstirling am Abend durch die Zeitregelung ausstellt.

Die Stromproduktion deckt sich nicht mit dem Hausverbrauch und ist zu gering.



4.5 St. Gallen

4.5.1 Aufstellungsort und Beziehung mit dem Kunden

Unterstützt durch die Stadtwerke St. Gallen wurde ein Feldtestgerät in einem Vierfamilienhaus installiert. Dieses ersetzt eine Brennstoffzelle, welche nicht zuverlässig funktionierte. Die gesamte Anlage umfasst einen gasbefeuelten Spitzenheizkessel, einen Heisswasserspeicher und eine übergeordnete Steuerung.



Abbildung 32: Der Freikolben-Resonanzstirling eingebaut in einem Vierfamilienhaus, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

Kurz nach der Installation und der Inbetriebnahme ergaben sich Störungen des Resonanzmassensensors, welche vorerst als Störsignale betrachtet wurden. Es stellte sich heraus, dass sich ein Magnet des Läufers gelöst hatte. Die Ausrichtung des Läufers verdrehte sich und die engen Spalten führten zu lokalen Berührungen, bis sich ein Magnet komplett aus seiner Fassung löste.

Die grosse Erfahrung der Stadtwerke St. Gallen mit BHKW war für die Inbetriebnahme äusserst wertvoll. Trotzdem war das Einstellen der Wasser-Rücklauftemperatur schwieriger als erwartet, da sich diese durch äussere Einflüsse verstellte. Der Kühlwasser-Sensor musste besser isoliert werden.

Dieses Feldtestgerät zeichnete sich durch gute Leistungswerte aus. Das Erdgas wird bei relativ hohen Temperaturen vollständig verbrannt, was aber zu einem vorzeitigen Verschleiss am Erhitzerkopf führte. In der zweiten Heizsaison musste dieser zuerst repariert und später ersetzt werden. Die Probleme sind auf die nicht optimale Gestaltung des Brenners zurückzuführen.



4.5.2 Standfestigkeit und Ausfälle Dezember 2022 bis April 2023

Das Feldtestgerät in St. Gallen lief sehr viel und vor allem lange Zeiten ohne Unterbruch. Es ergaben sich nur wenige Störungen; Der Freikolben-Resonanzstirling konnte einen grossen Teil des Wärmebedarfes des Gebäudes abdecken. Eine Leckage des Erhitzerkopfes und seine Reparatur führten zu einem längeren Unterbruch.



Abbildung 33: Lauf St. Gallen 1.12.23 - 28.02.23, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

4.5.3 Stromanalyse St. Gallen

In St. Gallen wurde die eigene Stromproduktion nicht weiter beachtet, da dieser Strom im Verteilnetz der St. Galler Stadtwerke bleibt und bei Nichtgebrauch im Haus an einen anderen Kunden verkauft werden kann. Bei Wärmebedarf wird immer auch Strom produziert. Der Freikolben-Resonanzstirling sollte so betrieben werden, dass Strom während Spitzenbedarfszeiten zurückgespeist wird und zur Auslastung des Netzes beiträgt. Mit angemessenen Rückspeisetarifen können die Interessen des WKK-Betreibers wie der öffentlichen Versorgung besser aufeinander abgestimmt werden.



4.6 Thörishaus

4.6.1 Aufstellungsort und Beziehung mit dem Kunden

In Thörishaus betreibt die Schmid Stirling GmbH zwei Freikolben-Resonanzstirling. Diese laufen mit Propangas an Stelle von Erdgas, da an der Freiburgstrasse 830 keinen Erdgasanschluss vorhanden ist.

Diese Feldtestgeräte wurden im Dauerlauf betrieben, da die Wärme wie auch der Strom im Gebäude jederzeit verwendet werden kann. Die Feldtestgeräte laufen mit konstanten Kühlwassertemperaturen von 50°C bei der SFM3-5 und 55°C bei der SFM3-6.



Abbildung 34: Der Freikolben-Resonanzstirling eingebaut im Heizungskeller der Schmid Stirling GmbH, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2022

4.6.2 Stromanalyse Thörishaus

Der Produktionsbetrieb der Rudolf Schmid AG hat einen konstanten, hohen Strombedarf. Die gesamte Stromproduktion der beiden Freikolben-Resonanzstirling deckt zu jeder Zeit nur einen Teil des Eigenbedarfs ab.

4.7 Vergleich der Laufzeit und Ausfälle von Dezember 2022 bis April 2023

Der Betrieb der 7 Feldtestgeräte ist über die Dauer von 5 Monaten zwischen Dezember 2022 und April 2023 in den Abbildungen 17, 20, 23, 28 und 33 dargestellt. Die Betriebszeiten richten sich nach den vom Betreiber gewünschten Einsätzen. Sie können aber auch durch technische Zwischenfälle begrenzt sein.



Die Betriebsdauer dieser Feldtestgeräten ist in Tabelle 9 für den Einsatz vom 1.12.2022 und bis am 30.4. 2023 angegeben. Für jedes Gerät kann daraus die effektive Laufzeit während 5 Wintermonaten ermittelt werden. Der Betrieb während 5 Monaten ist für alle Feldtestgeräte wiedergegeben. Die gesamte Laufzeit aller 7 Feldtestgeräte (inkl. der beiden Geräte in Thörishaus) belief sich während diesen 5 Monaten auf 16'643 Stunden, bei einer totalen Betriebszeit der Feldtestgeräte von ca. 40'000 Stunden.

	Stand 1.12.22 [h]	Stand 30.04.23 [h]	Totale Laufstunden [h]	Maximal Möglicher Mehrbetrieb [h]	Total Laufstunden mit Mehrbetrieb [h]	Jährlich mögliche Laufstunden [h] (umgerechnet)
Yverdon- les-Bains	6419	8960	2541	0	2541	3481
Genf	2026	4265	2239	1344	3583	4909
Nidau	4681	7879	3198	0	3198	4381
Grenchen	3188	4169	981	64	1045	1432
St. Gallen	894	3601	2707	408	3115	4268
Thörishaus SFM3-5	1330	3700	2370	1057	3427	4694
Thörishaus SFM3-6	3819	6426	2607	793	3400	4657

Tabelle 9: Übersichtstabelle der Laufzeiten Dezember 2022 bis April 2023, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

Tabelle 9 zeigt, dass die 7 Freikolben-Resonanzstirling während 5 Monaten Winterzeit (Dezember 2022 bis April 2023, in maximal möglichen 3624h) zwischen 980 und 3200 h lang betrieben wurden, im Durchschnitt währen dies 2378 h. Das Feldtestgerät in Grenchen wurde nur tagsüber betrieben (wenn kein Holz verfeuert wurde), weshalb die Betriebszeit recht kurz war. Das Feldtestgerät in Nidau lief während 3198 h, war also zu 88% der Zeit im Betrieb.

Auf das gesamte Jahr mit einem Faktor von 1.37 (abgeleitet aus den Heizgradtagen) umgerechnet ergeben sich längere Laufzeiten, insbesondere wenn ein Teil der Wärme zur Produktion von sanitärem Heizwasser verwendet wird. Es lässt sich daraus schliessen, dass bei normalen Anwendungsfällen eine jährliche Betriebszeit des Freikolben-Resonanzstirling zwischen 3000 und 5000 h (im Durchschnitt 4000 h) erwartet werden kann oder bei einem Dauerlauf noch deutlich mehr. Die Auslastung ist genügend hoch, damit die Mehrkosten dieses Freikolben-Resonanzstirling gegenüber normalen Gasheizungen amortisiert werden können.

4.7.1 Ausfall-Auswertetabelle

Während den geplanten Einsätzen traten gewisse Störungen auf. In Tabelle 10 sind für alle Feldtestgeräte die totale Anzahl der Ausfälle während den 5 Wintermonaten aufgelistet. Die meisten dieser Ausfälle konnten durch Änderung der Steuerungsparameter, entweder am Feldtestgerät oder am Heizkreis behoben werden. Sie beeinflussen die Standfestigkeit kaum.

Auf den Feldtestgeräten traten 1 bis 6 Störungen auf, welche Reparaturen benötigten und die Einsatzzeit begrenzten. Die untenstehende Tabelle umfasst die Ausfälle und die Ausfallzeiten, woraus die Ausfallrate in Bezug auf die Betriebszeit ermittelt wurde. Die Freikolben-Resonanzstirling liefen recht zuverlässig mit Ausfallraten zwischen 0.4 und 7.1%.



	Yverdon- les-Bains	Genf	Nidau	Grenchen	St. Gallen	Thörishaus SFM3-5	Thörishaus SFM3-6
Totale Anzahl an Ausfälle	35	32	17	35	39	14	15
Anzahl Ausfälle mit Vororteinsatz	4	6	3	1	2	0	1
Ausfallzeit in Std.	93.8	125.15	52.15	117.8	256.45	11.1	151.75
Ausfallrate in %	2.6	3.5	1.4	3.3	7.1	0.4	4.6

Tabelle 10: Ausfälle und Ausfallratentabelle Dezember 2022 bis und mit April 2023, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

Wenn bei dem Feldtestgerät in St. Gallen der Erhitzerkopf direkt hätte ersetzt werden können, läge die Ausfallrate bei diesem Feldtestgeräte bei 1.8 %. Der durchschnittliche Ausfall aller Feldtestgeräten wäre entsprechend niedriger.

Mit diesen bereinigten Daten entsteht eine mittlere Ausfallrate von 2.51%; dies entspricht einer Zuverlässigkeit von 97.49% welche für einen Feldtest sehr gut ist.

4.8 Leistungsvergleich zwischen Labor und Feldtest

Dieser Vergleich wird im Bericht «Essais d'endurance» (Anhang 5) ausführlich behandelt.

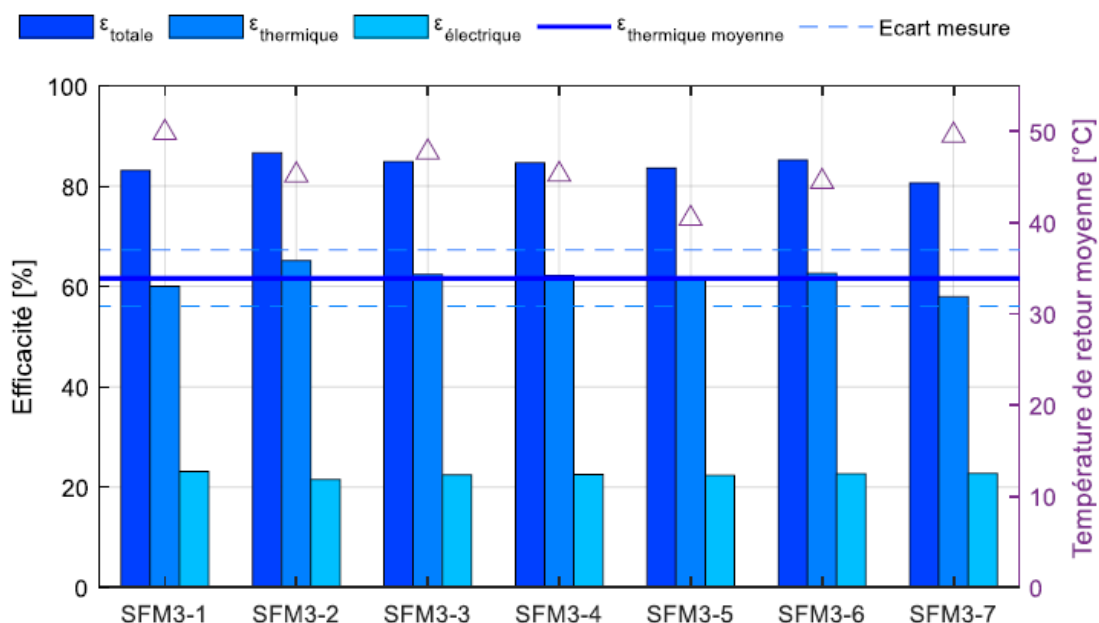


Abbildung 35: Gesamt-, Wärme- und Stromeffizienz gemittelt über den Betrachtungszeitraum für jeden Freikolben-Resonanzstirling (SFM3-1 = Grenchen, SFM3-2 = Yverdon, SFM3-3 Nidau, SFM3-4 = Genf, SFM3-5 + SFM3-6 = Thörishaus, SFM3-7 = St. Gallen), Quelle: «Essais d'endurance» (Anhang 5), 2023

Mit einem Durchschnitt für alle Feldtestgeräte von 22,5 % gegenüber ~26 %, die im Labor gemessen wurden, ist dies eine relative Abweichung von fast 13 %.



Durch die Erfahrungen aus den Vorversuchen der SFM3 werden sich alle Wirkungsgrade leicht verbessern, wenn der Freikolben-Resonanzstirling mit Nennleistung und nicht nur mit 70-80% Last betrieben wird. Eine weitere Verbesserung der Wirkungsgrade ergibt sich, wenn die im Abschnitt 6.1, 6.2 und 6.4 erwähnten Probleme mit dem Flox-Brenner, dem Erhitzerkopf und dem Stirling-Regenerator beseitigt sind. Insgesamt wird der elektrische Wirkungsgrad dann sicher auf über 25% und der Gesamtwirkungsgrad auf über 90% steigen.

4.9 Vergleich der Feldtestgeräte untereinander

Diesen Vergleich wird im Bericht «Essais d'endurance» (Anhang 5) ausführlich behandelt.

Der Betrieb der SFM3-5 und SFM3-6 hat gezeigt, dass sich der Brenner mit Flüssiggas besser auf den Anwendungsfall mit dem Erhitzerkopf / der Brennkammer einstellen lässt. Gewisse Differenzen beim Vergleich der Feldtestgeräte lassen sich damit erklären (siehe Schlussfolgerungen im Bericht «Essais d'endurance» (Anhang 5): Effizienzverlust bei praktisch allen Feldtestgeräten, mit Ausnahme derjenigen, die bei Schmid Stirling GmbH installiert sind sowie NOX-Werte der Feldtestgeräte SFM3-5 und SFM3-6, die den Grenzwert von 80 mg/m³ immer einhalten).

4.10 Verdankungen

Das Feldtestprogramm wurde finanziell durch das Bundesamt für Energie (BFE), den Verband der Schweizerischen Gasindustrie (VSG) und die Klimastiftung Schweiz unterstützt.

Zudem wurden die einzelnen Pilotanlagen durch die lokalen Energieversorger - Gasverbund Mittelland (GVM) – ESB Biel – Services Industriels de Genève (SIG)-, die Fachhochschulen HEIG-VD und HEPIA, die St.Galler Stadtwerke, die Gemeinde Plan-les-Ouates und die Kunden der verschiedenen Feldtestgeräte mit unterstützt. Für die genossene persönliche Begleitung und finanzielle Unterstützung drückt das Arbeitsteam seinen besten Dank aus.

Ort	Unterstützer		
Yverdon	HEIG	Kanton VD	Bart Wind
Genf	HEPIA	SIG (Service Industriels de Genève)	Gemeinde Plan-les-Ouates
Nidau	ESB-Biel	GVM	Guido Fringeli
Grenchen	GVM	SWG	Andreas Stierli
St. Gallen	SGSW		
Thörishaus SFM3-5	Schmid Stirling GmbH		
Thörishaus SFM3-6	Schmid Stirling GmbH		

Tabelle 11: Unterstützer des Feldtests, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023



5 Schlussfolgerungen und Fazit

5.1 Wichtige technische Charakteristiken

Die Feldtestversuche haben gezeigt, dass der Freikolben-Resonanzstirling flexibel mit verschiedenen Heizsystemen kombiniert und gemeinsam betrieben werden kann. Ihr Einsatz lohnt sich insbesondere dank folgender Charakteristiken, welche unter 5.2 ausführlicher umschrieben sind:

- Die eingesetzte Primärenergie wird effizient genutzt, was gesetzlich vorgeschrieben ist. Der laufend gemessene elektrische Wirkungsgrad übersteigt bei nominalen Betriebsbedingungen (BHKW-ein = 30°C, BHKW-aus = 40°C) 25%, bei einem Gesamtwirkungsgrad (Strom und Heizenergie) von 90%. Die Anforderungen der MuKE bezüglich WKK-Einheiten werden damit erfüllt. Im kombinierten Betrieb mit einer Wärmepumpe, werden 40 bis 50% Energie gegenüber fossilen Heizkesseln eingespart. Mit zunehmendem erneuerbarem Anteil im Erdgas reduziert sich der CO₂-Ausstoss um 65-70%; im Grenzfall ist kein CO₂-Ausstoss mehr vorhanden.
- Die mechanische Einheit ist gekapselt und braucht nicht geschmiert zu werden; dies ermöglicht einen langzeitigen Betrieb mit einem minimalen Unterhaltsbedarf. Dank vollem Ausgleich der schwingenden Massen laufen die Einheiten ruhig und erzeugen nur minimale Vibrationen.
- Die äussere, kontinuierliche Verbrennung zeichnet sich durch saubere Abgase aus (geringe Schadstoffe). Wie bei den üblichen Heizgeräten muss der Brenner jedes Jahr kontrolliert und der Ausstoss an Schadstoffen gemessen werden. Der gesamte, benötigte Wartungsaufwand ist gering, ähnlich zu jenem bestehender Gasheizgeräte.
- Mit dem Freikolben-Resonanzstirling werden alle wichtigen Charakteristiken erstmals mit kleinen Motoreinheiten erfüllt, es besteht praktisch keine Konkurrenz. Für die Energieversorgung kleiner Wohneinheiten liegt eine alternative Lösung zu den elektrisch betriebenen Wärmepumpen vor. Während der kalten Jahreszeit dient der WKK-Strom für den Antrieb der Wärmepumpen, zum Zeitpunkt des grössten Strommangels. Diese Kombination kann einen wesentlichen Beitrag zur Sicherstellung der Stromversorgung im Winterhalbjahr leisten.

5.2 Erläuterung der Charakteristiken

5.2.1 Effiziente Energienutzung

Die eingesetzte Primärenergie wird effizient genutzt: Der laufend gemessene elektrische Wirkungsgrad unter nominalen Betriebsbedingungen (BHKW-ein = 30°C, BHKW-aus = 40°C) überstieg 25%. Bei höheren Kühlwassertemperaturen sank dieser Wirkungsgrad auf rund 23%, wobei der Gesamtwirkungsgrad (Strom und Heizenergie) beinahe 90% betrug. Die Anforderungen der MuKE bezüglich WKK-Einheiten werden damit erfüllt. Im kombinierten Betrieb mit einer Wärmepumpe (WP), welche den erzeugten Strom zusätzlich in Heizwärme umsetzt, kann viel Energie gegenüber fossilen Heizkesseln eingespart werden, je nach Qualität der WP und der erforderlichen Heiztemperatur. Dieser Gewinn wird im Bericht «Essais d'endurance» (Anhang 5) der HEIG-VD bestätigt und in folgender Abbildung dargestellt.

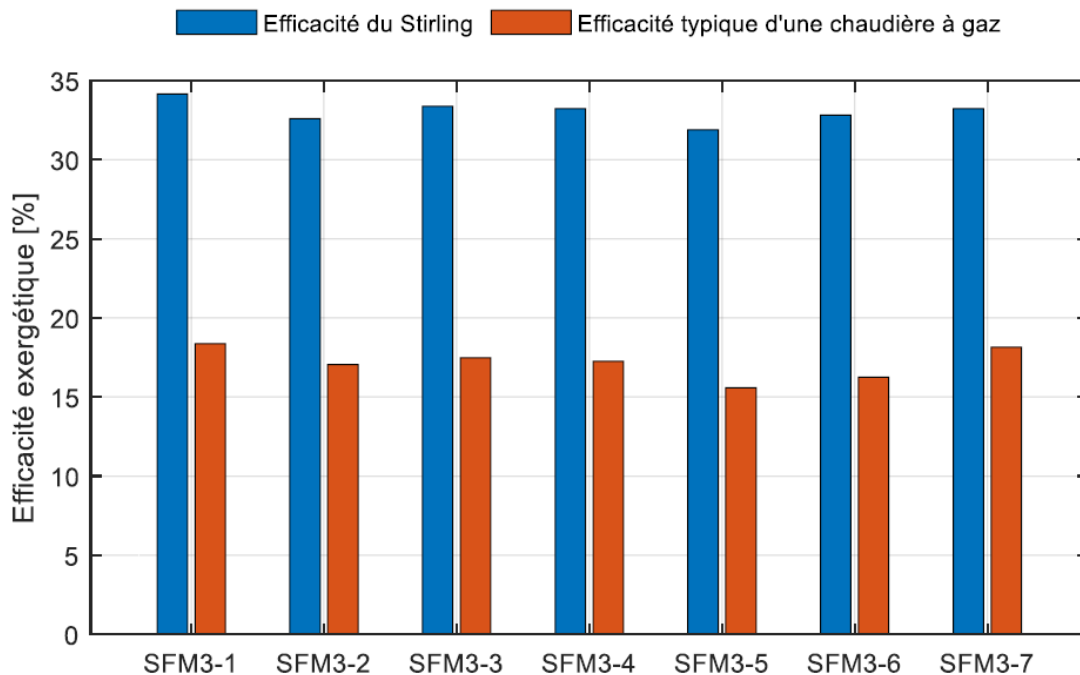


Abbildung 36: Vergleich der exergetischen Effizienz von Freikolben-Resonanzstirling mit einem typischen Gaskessel, (SFM3-1 = Grenchen, SFM3-2 = Yverdon, SFM3-3 Nidau, SFM3-4 = Genf, SFM3-5 + SFM3-6 = Thörishaus, SFM3-7 = St. Gallen), Quelle «Essais d'endurance» (Anhang 5), 2023

5.2.2 Schadstoffarme Verbrennung

Die äussere, kontinuierliche Verbrennung zeichnet sich durch saubere Abgase aus, welche den LRV-Normen für Wohnquartiere erfüllen. Wie bei den üblichen Heizgeräten muss der Brenner jedes Jahr kontrolliert und der Ausstoss an Schadstoffen gemessen werden. Die Freikolbensysteme laufen ausserdem ungeschmiert, so dass der gesamte, benötigte Wartungsaufwand äusserst gering ist.

Die Einsatzbedingungen sind damit deutlich günstiger als bei kleinen Verbrennungsmotoren, welche hauptsächlich von Senertec in Form des Dachs-Motors angeboten wird. Die elektrische Abgabeleistung von 2 kW_{EL} und 6 kW_{TH} Heizleistung ist dem Bedarf vieler kleiner Wohngebäude ideal angepasst, deutlich besser als die bestehenden Verbrennungsmotor-Einheiten.

Die folgenden Darstellungen sind dem Bericht der HEIG-VD entnommen, mit der Darstellung der gemessenen Abgaswerte von sämtlichen Feldtestgeräten.

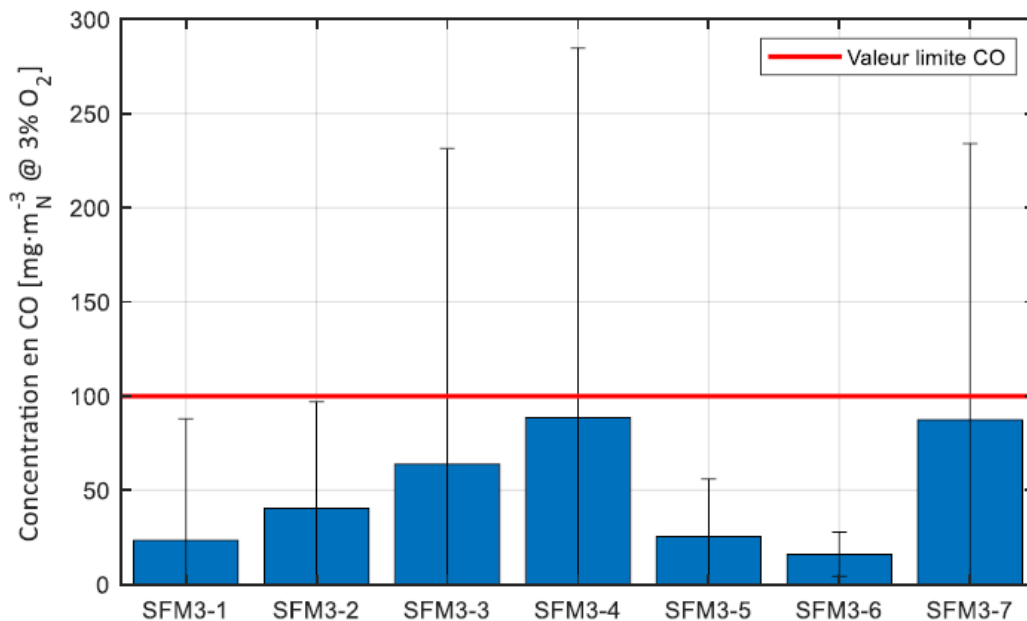


Abbildung 37: Gemessene Kohlenmonoxid-Konzentration aller Feldtestgeräten mit LRV-Grenzwert, Quelle: «Essais d'endurance» (Anhang 5), 2023

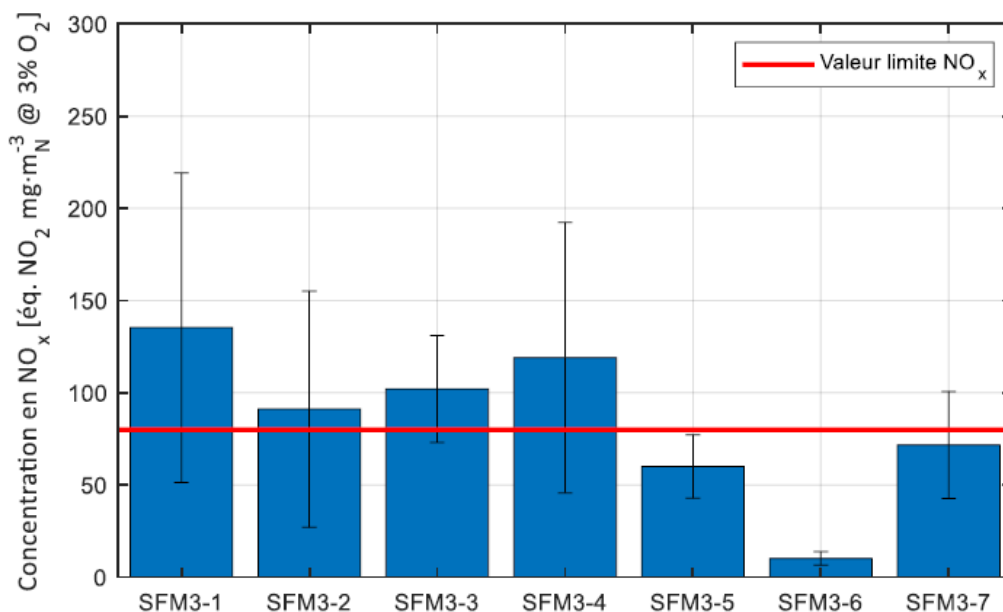


Abbildung 38: Gemessene Stickoxidkonzentration für alle Feldtestgeräte mit LRV-Grenzwert, Quelle: «Essais d'endurance» (Anhang 5), 2023

HEIG-VD vergleicht die Messwerte mit den zulässigen Konzentrationen von CO und NO_x. Es ist zu bemerken, dass die verfügbaren Brenner noch nicht die gewünschte Qualität zum Betrieb der Freikolben-Resonanzstirling aufweisen. Bei gewissen Versuchsläufen waren die CO- und NO_x-Konzentrationen extrem niedrig. Diese günstigen, niedrigen Extremwerte gelten als massgebende Richtlinien für die Qualität, welche mit angepassten Brennern standardmässig erreicht werden können. Die HEIG-VD verglich die LRV-Werte wie in Kapitel 1.1.2 beschrieben mit den gasbefeuerten Feuerungsanlagen und nicht mit den stationär betriebenen Verbrennungsmotoren. Im Vergleich zu den stationär betriebenen Verbrennungsmotoren sind alle gemessenen Werte immer eingehalten.



5.3 Laufzeiten der Feldtestgeräte

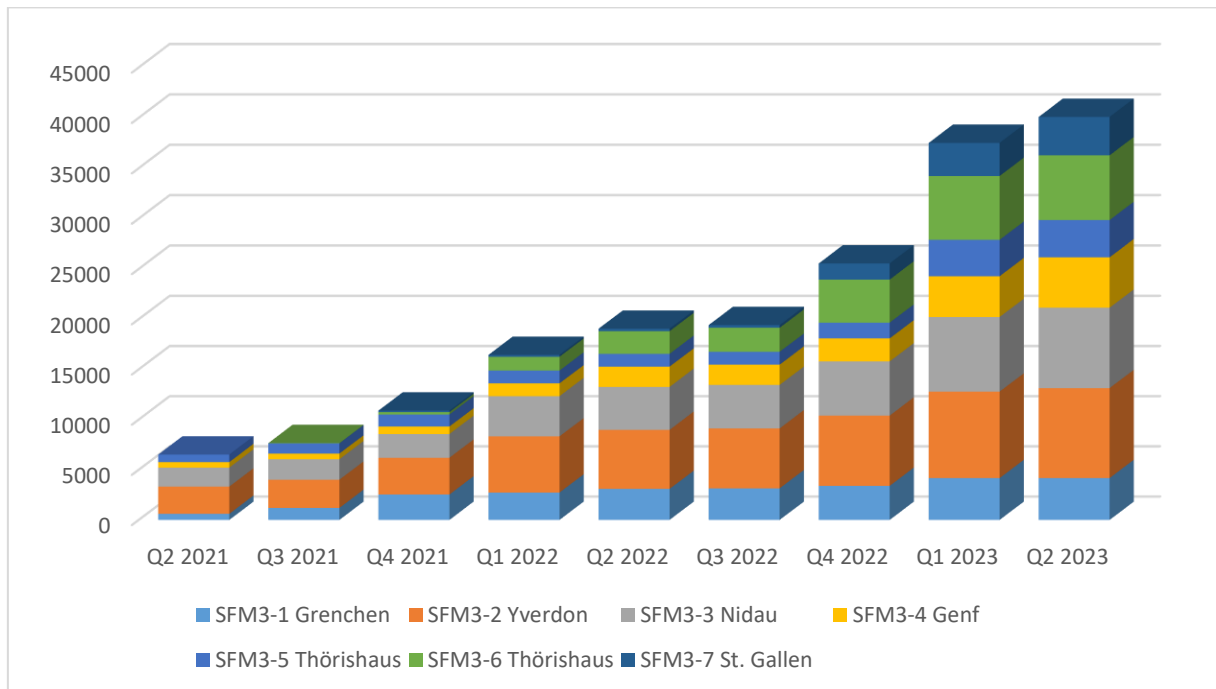


Abbildung 39: Grafik mit den Laufzeiten der SFM3 Feldtest, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

In der Abbildung 39 sind die Laufzeiten pro Quartal der einzelnen Feldtestgeräte dargestellt. Bis Ende Juni 2023 belief sich die summierte Laufzeit aller sieben Feldtestgeräten auf 40'086 Stunden. In beiden Heizperioden liefen die Feldtestgeräte jeweils rund 20'000 Stunden.

5.4 Fazit des Betriebs

Die durchgeführten Feldtests zeigen, dass sich die Freikolben-Resonanzstirling-Systeme für den geplanten Einsatz als Gebäudeheizung unter verschiedenen Bedingungen gut eignen. Eine langzeitige, sichere Versorgung mit Strom und Wärme ist belegt.

Anfänglich führten vorgegebene Grenzwerte gewisser Parameter zu Notausschaltungen. Durch Änderung der Vorgaben bei der Freikolben-Resonanzstirling-Steuerung, dem zeitlichen Ablauf des Startvorgangs oder an den Heizkreisläufen konnten viele Ursachen dieser Unterbrüche behoben werden.

Eine Reihe von Ausfällen sind durch Schwachstellen der Auslegung bedingt und sollten künftig verbessert werden:

- Der vorhandene FLOX-Brenner ist den Anforderungen des Freikolben-Resonanzstirling nicht richtig angepasst. Die durchgeführten Berechnungen zeigten, dass die Abgase nicht genügend rezirkuliert werden. Die Form des Brenners wie des Rekuperators für die Vorheizung der Brennerluft müssen neu ausgelegt werden.
- Der Erhitzerkopf ist hohen Temperaturen ausgesetzt. Hohe mechanische Spannungen können Risse oder Undichtheiten in den Schweissnähten verursachen. Robustere Formen sollten entwickelt werden. Sehr wahrscheinlich wird eine bessere Auslegung des Brenners bereits günstigere Bedingungen für den Erhitzerkopf ergeben.
- Ausserhalb der beschriebenen Berichtsperiode traten bei mehreren Feldtestgeräten auch Federbrüche auf. Dabei wurden die nominalen Spannungen in diesen Federn bereits vermindert, indem jeweils 3, leicht dünnere Federn an Stelle der ursprünglich vorgesehenen 2 eingesetzt



wurden. Die unebenen Tellerfedern, die zudem grosse Massdifferenzen aufwiesen, wurden beim Montieren verspannt. Dies führte zu Brüchen in den Federarmen. Damit ist erwiesen, dass weitere Entwicklungen gewisser Komponenten nötig sind um sämtliche Erwartungen erfüllen zu können. Weitere Anpassungen sollten auch vorgenommen werden, um die Herstellkosten zu senken.

Auffällig ist, dass die verschiedenen Feldtestgeräte, welche praktisch identisch aufgebaut sind, recht unterschiedlich liefen. Das verschiedene Verhalten konnte bisher nicht genauer erklärt werden. Es wird vermutet, dass die bestehenden Feldtestgeräte nahe an begrenzenden Bedingungen betrieben werden. Ein Lernprozess scheint nötig, um diese Unterschiede genauer erfassen zu können, was zu weiteren Verbesserungen führen wird.

5.5 Einbindung und Optimierung des BHKW's am Betriebsort

5.5.1 Installation

Die Installationen der Freikolben-Resonanzstirling bei den Kunden verlief nicht immer reibungslos. Die Hilfe von Projektleitern, sowie die Erfahrung durch vorangehende Installationen war von grossem Vorteil, um die nötigen Absprachen zu treffen. Die sanitäre Wasserregelung der Gebäude war oft verschieden ausgeführt und konnten Probleme bereiten. Klare Vorgaben zur Regelung wäre von Vorteil, insbesondere auch für die Feldtestgeräte im Fernzugriff führen zu können.

5.5.2 Optimale tägliche Betriebszyklen

Ein Vorteil der Kleinanlagen ist, dass die erzeugte Wärme beim Verbraucher gespeichert und vollständig genutzt werden kann. Die in 3 bis 4 Betriebsstunden erzeugte Wärme kann in einem Boiler mit vertretbaren Dimensionen zwischengespeichert werden. Je nach Eigenverbrauch werden die Anlagen längere Zeit betrieben. Bei einem solchen Betrieb werden die Geräte weniger oft den hohen thermischen Zyklen ausgesetzt und beansprucht. Die Startverluste bleiben gering im Vergleich mit den langen Betriebszyklen.

Mit diesen Zyklen richtet sich der Betrieb nicht nach dem zeitlich stark schwankenden elektrischen Eigenbedarf. Ein gewisser Ausgleich mit Batterien ist möglich, bleibt meist jedoch beschränkt. Die Anlagen werden ans elektrische Netz angeschlossen das auch den Ausgleich zwischen Produktion und Verbrauch übernimmt. Wichtig ist, dass die gesamte elektrische Produktion sinnvoll verwendet wird.

5.5.3 Eigenstromnutzung

Der Strom des Freikolben-Resonanzstirling kann vom Betreiber nicht immer selbst genutzt werden. Der phasenweise kontinuierlich produzierte Strom stimmt mit dem wechselhaften Bedarf kaum überein. In vielen Fällen könnte mit einer Batterie der Eigenverbrauch deutlich erhöht werden. Mit entsprechendem Strommanagement werden Elektroautos den Eigenverbrauch noch einmal erhöhen.

Die Feldtests zeigen, dass WKK und PV-Anlagen sich ideal ergänzen. Solange die Sonne scheint, wird nur wenig Wärme benötigt und die WKK steht meistens still. Der Versuchsbetrieb in Yverdon zeigt, dass bei kaltem Wetter Winterstrom produziert wird, welcher den Mangel an PV-Strom günstig ausgleicht.

Produzierter Strom kann vom Kunden selber genutzt oder ins Netz zurückgespeist werden. Die St. Galler Stadtwerke betonen, dass «bei Wärmeanforderung Strom immer verwendet werden kann»; bei Mangellage im Winter sollte dieser auch höher vergütet werden. Ein Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) wäre ebenfalls sehr hilfreich.



5.5.4 Ideales Speichervolumen

Herr Gabriel Tschumi hat in dem Bericht «Essais d'endurance» (Anhang 5) ein optimales Speichervolumen in Abhängigkeit zur Aussentemperatur erstellt, unter der Annahme, dass der Freikolben-Resonanzstirling etwa mit 3-4 Stunden Laufzeit betrieben werden soll.

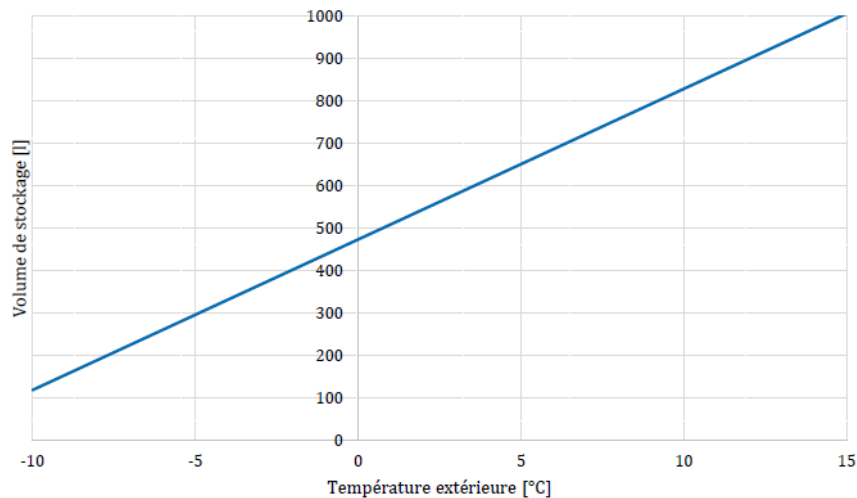


Abbildung 40: Speichervolumen für Freikolben-Resonanzstirling-Betrieb von 3 Stunden, abhängig von der Außentemperatur, Quelle: «Essais d'endurance» (Anhang 5) 2023

Zur Begrenzung des Speichervolumens wäre bei hohen Aussentemperaturen ein Teillastbetrieb angezeigt. Ein Teillastbetrieb konnte bisher jedoch nur im Labor getestet werden.

5.6 Marktbereich und Marktchancen in der Schweiz, Vermarktungsplan

Das laufende P + D – Projekt umfasste keine Marktstudie. Damit handelt es sich hier bloss um allgemeine Gesichtspunkte, welche nachträglich, in einer zusätzlichen Studie vertieft werden können.

Der Einsatzbereich dieser kleinen WKK entspricht in erster Linie jenem, für den die Schweiz eine Wärmeversorgung mit Wärmepumpen (WP) vorschlug: ca. 1 bis 1.5 Millionen Gebäude, die abgelegen sind und kaum an Fernheizungen angeschlossen werden. Kleinere Gebäude können von dieser WKK etwa 6 kW Heizleistung beziehen, welche durch eine zusätzliche Spitzenlastheizung ergänzt werden kann.

WP bilden eine energetisch gute Lösung, müssen aber mit Strom angetrieben werden, welche in der Schweiz gerade in der kalten Jahreszeit fehlt.

Eine gemischte Lösung mit WKK und WP wäre damit angebracht, wobei WKK den Strom produziert, welcher als Antrieb der WP (praktisch zeitgleich) benötigt wird. Bei einem ausgeglichenen Verbrauch des erzeugten Stroms können in beiden Gebäuden 40 bis 50% Primärenergie gegenüber bekannten, fossilen Heizungen eingespart werden, je nach Qualität und Arbeitsbedingungen der WP.

Ein erfolgreicher Einsatz bliebe nicht auf die Schweiz beschränkt. Mit ihrem Export ins Ausland, typischerweise nach Deutschland, könnte ihr Umsatz wesentlich erhöht und die Herstellkosten der Einheiten deutlich gesenkt werden.

Ursprünglich war vorgesehen, nach Abschluss der Feldtestversuche die Geräte schrittweise weiter zu verbessern, in steigender Anzahl herzustellen und auf dem Markt anzubieten. Mit gezielter Werbung könnten genügend private Interessenten gefunden werden, um an solchen Entwicklungen teilzunehmen und diese zu unterstützen.

Die Herstellung und der Betrieb von 7 Feldtestgeräten erwies sich als recht aufwändig. Weitere Verbesserungen sind erforderlich, welche im Kapitel 7 näher dargelegt sind. Zudem erwies sich, dass diese Weiterentwicklung der Hauptkomponenten eine rationelle und kostengünstige Produktion bei



kleinen und mittleren Serien schwierig macht. Die Kosten des Endproduktes müssen noch deutlich gesenkt werden können. Industrielle Erfahrung ist erforderlich, um ein solches Serienprodukt marktreif zu gestalten. Die Frage der Vermarktung und der Strategie zum Umsatz sollte in Zusammenarbeit mit einem industriellen Partner erfolgen, der die nötige Erfahrung aus dem Heizungsgewerbe oder einem ähnlichen Bereich mitbringt.

In den meisten europäischen Ländern wird der Frage der Winterstromproduktion viel Beachtung geschenkt. Die Problematik in der Schweiz ist bekannt, mögliche Alternativen zur Deckung des Strommangels während der kalten Jahreszeit werden diskutiert. Die deutsche Wirtschaft hängt stark vom Import von Erdgas ab; ein rationeller, effizienter Einsatz dieser Energien ist unbedingt erforderlich. Im Laufe der geführten Entwicklung erfuhren wir auch, dass China gezielt nach Lösungen sucht, welche einen effizienten Einsatz dieser wertvollen Energiereserven ermöglicht.

Ein Vermarktungsplan wird von der industriellen Umsetzung des entwickelten Konzeptes und der erwünschten geografischen Ausrichtung abhängig sein.

5.7 Wirtschaftlichkeit der Stirling-WKK-Anlagen

Die vorliegende P+D-Studie betrifft serienmässig hergestellte Stirling-Freikolbenmotoren, welche als WKK-Anlage zu Heizzwecken eingesetzt werden. Andere Anwendungen dieser Motorsysteme bestehen, wie z.B. als Notstromgruppen, für den Betrieb in Systemen ohne Netzanschluss, welche hier aber nicht weiter betrachtet werden.

Beim Betrieb dieser Einheiten wird Heizwärme und elektrischer Strom erzeugt. Der relative Wert dieser beiden Produkte wird für ein kombiniertes System bestimmt, bei welchem der erzeugte elektrische Strom eine WP antreibt, welche zusätzliche Heizwärme abgibt. Die von beiden Einheiten abgegebene Wärmemenge ist höher als die dem Motor zugeführte Heizenergie, was für die Qualität der betrachteten Systeme massgebend ist. Diese Kombination WKK + WP ist nicht zwingend notwendig, die WKK kann auch ohne WP betrieben werden.

Die Wirtschaftlichkeit der WKK hängt vom Mehrwert der verfügbaren Heizwärme gegenüber dem verbrauchten Erdgas ab. Der über die Lebensdauer des Gerätes kumulierte Gewinn sollte die Mehrkosten der WKK gegenüber einer entsprechend dimensionierten, modernen Gasheizung decken. Diese einfache Vergleichsbasis setzt voraus, dass die Unterhaltskosten des Freikolben-Resonanzstirling gering sind, nicht höher als jene der konventionellen Gasheizung. Lange Betriebszeiten sind erforderlich, um eine Rendite erwarten zu können. Unter 5.1 und 5.2 wurde dargelegt, dass die vorliegende Entwicklung genau diese Ziele anstrebt.

5.7.1 Vergleich mit dem Freikolbenstirling nach Beale

Die folgenden Tabellen zeigen die Resultate einer Analyse des Resonanz-Stirlings im Vergleich mit einem Freikolbenstirling nach Beale (Beta-Anordnung). Es wird angenommen, dass beide Systeme mit vergleichbaren Dimensionen, (d.h. der periodischen Volumenänderungen durch die Kolbenbewegung) ausgelegt sind. Das Resonanzsystem zeichnet sich durch deutlich höhere, zyklische Druckänderungen des Arbeitsgases aus, womit auch die elektrische Leistungsabgabe höher ist. Gestützt auf unsere (besten) Messresultate am Resonanzsystem und die verschiedenen, publizierten Resultate von Beale-Systemen werden folgende elektrische Wirkungsgrade verwendet:

System	Elektrischer Wirkungsgrad
Freikolben-Resonanzstirling	23 – 25%
Beale - Stirling	12.5 – 15%

Tabelle 12: Elektrischer Wirkungsgrad, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023



Für beide Systeme wird angenommen, dass die WP im Mittelwert über das ganze Jahr 4- bis 5-mal mehr Heizwärme abgibt als sie für elektrische Antriebsenergie verbraucht. In der folgenden Tabelle werden die umgesetzten thermischen und elektrischen Leistungen auf die Wärmezufuhr bezogen und sind damit als dimensionslose Werte angegeben.

System	Wärme zufuhr	Erzeugte elektr. Leistung	Vom Motor abgegebene Heizleistung	Von der WP abgegebene Heizwärme	Totale verfügbare Heizwärme	Gewinn vs. üblicher Heizung	Ersparnis In %
Freikolben-Resonanz-stirling	1	0.23 – 0.25	0.77 – 0.75	1.0 - 1.25	1.75 – 2.0	0.75 – 1.0	40 – 50
Beale - Stirling	1	0.12 – 0.15	0.875 – 0.85	0.6 – 0.75	1.45 – 1.6	0.45 – 0.6	22.5 – 30

Tabelle 13: Elektrischer Wirkungsgrad, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

5.7.2 Mehrertrag der Freikolben-Stirling Systeme gegenüber einer Gasheizung

Der Mehrertrag hängt von folgenden Faktoren ab:

- Der Anzahl von Betriebsstunden, oder Amortisationszeit der WKK, welche ohne Ersatz oder grosse, kostspielige Reparaturen angenommen werden kann. Dazu fehlen aber weltweit die nötigen Erfahrungswerte. Die wichtigste Aussage stammt von QENERGY, welche angibt, dass eine ihrer Versuchsmaschinen gesamthaft **60'000 h** lang betrieben werden konnte; neben der periodischen Revision des Brenners wurden praktisch keine Ersatzteile benötigt. Wir gehen von der Annahme aus, dass zukünftige Maschinen während 50'000 h mit mässigen Revisionsarbeiten, ohne Ersatz der Hauptkomponenten, betrieben werden können.
- Der effektiven Leistungsabgabe der WKK: Der Resonanzstirling gibt unter Volllast zwischen **1800 und 2000 W** elektrischer Leistung ab, wogegen das Beale-Konzept zwischen **1000 und 1200 W** produziert. Dieser tiefere Wert ist bedingt durch die relativ niedrigen, periodischen Druckänderungen des Arbeitsgases, unter welchen ein stabiler Betrieb möglich ist.
- Der **Kostendifferenz** zwischen der erzeugten elektrischen Energie und der gasförmigen Antriebsenergie. Diese Energiekosten sind lokal verschieden und werden in Zukunft stark fluktuieren; für die folgende, einfache Abschätzung nehmen wir für beide Systeme folgende Werte an:

Strom von 0.40 und 0.50 CHF/kWh_{EL}, minus Gas von 0.15 CHF/kWh = 0.25 bis 0.35 CHF/kWh.

Gewinn Resonanzsystem IR = 50'000 h x 2 kW_{EL} x (0.25 – 0.35 CHF/kWh) = 25'000 – 35'000 CHF

Gewinn mit Beale-System IB = 50'000 h x 1.2 kW_{EL} x (0.25 – 0.35 CHF/kWh) = 15'000 – 21'000 CHF

Die ermittelten Gewinnraten entsprechen den zulässigen Mehrkosten einer Stirlinganlage gegenüber einer modernen Gasheizung gleicher thermischer Leistung.

Die relativ niedrige elektrische Leistung der vorhandenen Beale-Systeme beschränken ihren möglichen Rückgewinn. Vor 20 Jahren waren zudem die Strompreise deutlich niedriger als hier angenommen. Die damals stark engagierten Firmen der Heizungsbranche, wie Viessmann, Bosch oder BDR stellten ihre Entwicklungsarbeiten ein und trennten sich deshalb von der Serienproduktion dieser Maschinen.

Der Resonanz-Stirling weist einen höheren erzielbaren DB1 (Deckungsbeitrag 1 aus den variablen Kosten und dem Stromerlös) auf als alle bisher existierenden Geräte, ein wirtschaftlicher Erfolg ist nur möglich, wenn diese Einheiten möglichst kostengünstig, in grossen Serien hergestellt werden.



5.7.3 Betriebskostenvergleich Freikolben-Resonanzstirling-BHKW mit einer Wärmepumpe

In einer zweiten Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde der Betrieb eines Freikolben-Resonanzstirling-BHKW mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (WP) gleicher Wärmeleistung verglichen. Da die Investitionskosten beider Systeme etwa gleich hoch sind, werden nur die Betriebskosten berücksichtigt.

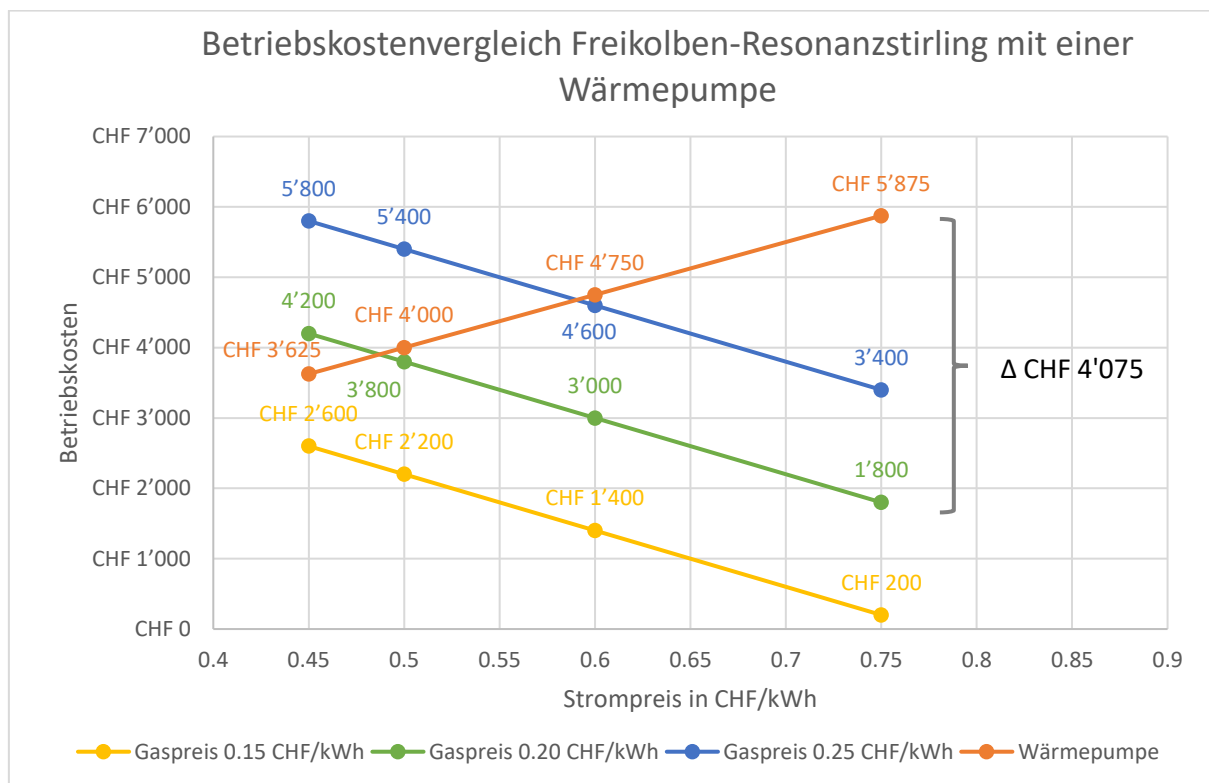


Abbildung 41: Betriebskostenvergleich Freikolben-Resonanzstirling-BHKW mit einer Wärmepumpe, Quelle: Schmid Stirling GmbH (Anhang 2) 2024

Die jährlichen Betriebskosten eines Freikolben-Resonanzstirling-BHKW werden ab einer Differenz zwischen Strom- und Gaspreis von ca. Fr. 0.30 pro kWh günstiger als die einer Wärmepumpe.

Herr Dr. Florian Habermacher, Dozent und Projektleiter am Kompetenzzentrum Regionalökonomie des Institutes für Betriebs- und Regionalökonomie der Hochschule Luzern HSLU erwähnt in der Jahresausgabe 2024 «Energiezukunft Schweiz», dass im Winter der Strompreis auch mal die Grössenordnung von Fr. 1.- pro kWh erreichen könnte. Wenn wir von einem mittleren Strompreis im Winter von Fr. 0.75 pro kWh ausgehen und der Gaspreis Fr. 0.20 pro kWh beträgt, liegt die jährliche Betriebskostendifferenz (bei 4000 Betriebsstunden des BHKW, siehe dazu Kapitel 4.7) bei über Fr. 4'000.- zu Gunsten der BHKW-Lösung. Über eine Lebensdauer von 20 Jahren beträgt der Betriebskostenvorteil somit mehr als Fr. 80'000.-.

5.8 Politische Fragen und Entscheide

5.8.1 Gebäudeheizung mit fossilen Energien

Am 18. Juni 2023 wurde das «Bundesgesetz über die Ziele im Klimaschutz, die Innovation und die Stärkung der Energiesicherheit (indirekter Gegenvorschlag zur Gletscher-Initiative)» in einer Volksabstimmung angenommen. Mit der Gletscher-Initiative wäre der Verbrauch von Heizöl und Erdgas ab 2050 verboten worden, was vom Bundesrat und Parlament aber abgelehnt wurde.



Bereits vorher wurden in mehreren kantonalen Abstimmungen die Beschränkung des Einsatzes fossiler Heizanlagen abgelehnt, da die Rechte der Hausbesitzer dadurch zu stark eingeschränkt würden.

In WKK-Geräten werden fossile Energien deutlich besser genutzt als durch ihre blosse Verbrennung in Heizkesseln. Durch den verbreiteten Einsatz dieser Technologie wird die Atmosphäre weniger stark mit Treibhausgasen belastet. Die Anwendung effizienter Lösungen ist gesetzlich vorgeschrieben und sollte daher möglichst rasch vorangetrieben werden. Zusätzlich zur Heizwärme wird elektrische Energie lokal, vorwiegend im Winter erzeugt, welche z.B. zum Antrieb von WP eingesetzt werden kann, wodurch das öffentliche elektrische Netz entsprechend entlastet wird.

5.8.2 Zukunftsstrategie für die Wärme-Kraft-Kopplung / Standpunkt der Schmid Stirling GmbH

In Anbetracht des Strommangels während der kalten Jahreszeit veröffentlichte der Bundesrat am 2.12.2022 die Zukunftsstrategie für Wärme-Kraft-Koppelung. Wärmegeführte, möglichst mit erneuerbaren Energien betriebene Geräte können einen wertvollen Beitrag zur Stromversorgung im Winterhalbjahr leisten. Ihr Betrieb reduziert die Stromnachfrage, es werden weniger Wärmepumpen benötigt.

Wichtige Forderungen sind, dass die anfallende Wärme vollständig verwertet wird und die Anlagen nicht betrieben werden, wenn genügend Solarenergie (oder andere Formen erneuerbarer Energien) vorhanden ist. Kleine WKK-Anlagen erfüllen diese Anforderungen äusserst gut, da bei Sonnenschein automatisch weniger Heizwärme gebraucht wird.

Nach publizierten Angaben sollen über 1 Mio. kleiner, fossiler Heizanlagen durch Wärmepumpen (WP) ersetzt werden. Es besteht ein grosses Marktsegment, für welches bisher noch keine günstigen WKK-Lösungen mit angepasster Leistung vorhanden oder genügend bekannt sind und eine Alternative zu den propagierten WP darstellen können.

Beim Betrieb der WKK mit teilweise erneuerbaren Energien können enorme Mengen von klimaschädlichen Abgasen eingespart werden, was beachtet werden sollte. Die WKK stellt eine gleichwertige Alternative zu den WP dar. Die Hausbesitzer sollten die freie Wahl zwischen verschiedenen, effizienten Lösungen haben.

Wichtig ist, dass alle vielversprechenden Technologien, welche einen bestehenden Markt abdecken, auch berücksichtigt werden. Die von der Schmid Stirling GmbH entwickelten Freikolben-Resonanzstirling-Geräte tragen dazu bei, Energie effizient zu nutzen und den Ausstoss klimaschädlicher Gase massiv zu senken. Die Unterstützung zur fertigen Entwicklung eines innovativen Konzeptes sollte erwartet werden können.

Bis ins Jahr 2050 sollen praktisch keine klimaschädlichen Gase in die Atmosphäre ausgestossen werden. Erneuerbare Energien werden eine wichtige Rolle spielen, um dieses Ziel zu erreichen. Der VSG sieht vor, dass in Zukunft 30% erneuerbare Energien bis 2030 dem Erdgas beigemischt werden und später einen grösseren Anteil. Der Betrieb kleiner WKK-Anlagen wird klimaneutraler.

5.9 Zusammenfassende Ergebnisse der Kundenumfrage

Die Betreiber der 5 Feldtestgeräten wurden aufgefordert, einen Fragebogen auszufüllen und ihre gesammelten Erfahrungen beim Betrieb ihren WKK-Geräten mitzuteilen. Diese Beurteilungen können wie folgt zusammengefasst werden:

Positive Beantwortung: Alle Kunden waren von Anfang an positiv eingestellt, sonst hätten sie nicht am Feldtest teilgenommen. Meist waren sie sich bewusst, dass der Winterstrom fehlt und die WKK dazu beiträgt, diese Lücke zu schliessen. Diese positive Beurteilung wird auch nach Abschluss des Feldtestprogramms festgestellt.



Negativ beurteilt wurde, dass der Feldtest beendet wird und im Moment keine Weiterentwicklung vorgesehen ist (siehe Kapitel 6). Die Laufzeit wurde allgemein als befriedigend eingestuft, ausser dass verschiedene Pannen am Brenner und Erhitzerkopf jeweils längere Betriebsunterbrüche verursachten.

Eine offene Frage betrifft die zukünftige Verfügbarkeit von Erdgas und die Entwicklung des Gaspreises. Offen bleibt, wie sich dieser Preis gegenüber anderen Energieformen entwickeln wird, aber ein effizienter, sparsamer Umgang wird aus wirtschaftlichen Gründen befürwortet.

In den Antworten zum Fragebogen wurde falsch vermerkt, dass die WKK im Gegensatz zu den aktuellen Energiegesetzen stehen würden. Der Bundesrat hat am 2.12.2022 die Unterstützung der WKK beantragt, was bisher aber nicht umgesetzt wurde. Nach Gesetz wird gefordert, dass die fossilen Energien effizient genutzt werden sollen, was für den Einsatz von WKK spricht. Nach dem Gegenvorschlag zur Gletscher-Initiative, welcher am 18.06.2023 angenommen wurde, sind Öl- und Gasheizungen weiterhin zulässig.

Beanstandet wurde, dass der ins Netz zurückgespeiste Strom viel zu wenig entschädigt wird. Diese Rückspeisung während der kalten Jahreszeit ist äusserst wertvoll und trägt dazu bei eine Stromlücke abzudecken. Eine entsprechende, faire Entschädigung würde den Betrieb von WKK unmittelbar wirtschaftlicher machen und ihre Marktaussichten deutlich verbessern.

5.10 Grösste mögliche Hemmnisse:

- Antriebsenergie: Frage des Stromimportes oder Gaslieferungen aus dem Ausland

Während der kalten Jahreszeit stellt die verfügbare Primärenergie ein entscheidendes Kriterium bei der Wahl zwischen WP oder WKK dar. Erdgas oder Strom müssen in der kalten Jahreszeit aus dem Ausland eingeführt werden. Die umliegenden Länder sind ähnlichen Begrenzungen ausgesetzt und die Bezugsbedingungen können sich ständig verändern. Eine möglichst flexible Anpassung ist von Vorteil, weshalb beide Technologien verfügbar sein sollten. Damit kann sich der Markt möglichst rasch den Umständen entsprechend anpassen.

- Ausstiegsstrategie von Energieversorgern in grösseren Städten

Energieversorger und ganze Kantone haben den Ausstieg aus der Erdgasversorgung beschlossen. Diese Entscheide sind im Hinblick auf das «netto Null Ziel» bezüglich Treibhausgas-Emissionen entstanden. Nach unserer Einschätzung sind diese Entscheide jedoch voreilig und verhindern möglicherweise die Verteilung von CO₂-freien Energieträger (Wasserstoff, Biogas) über das heute bestehende Erdgasverteilnetz.

- Bau neuer Atomkraftwerke

Ein massiver Ausbau der Atomkraftwerke würde dazu führen, dass genügend Strom im Winter zur Verfügung steht. Dieses Szenario ist wenig wahrscheinlich, da ein Bau von neuen Atomkraftwerke gesetzlich verboten ist.

- Klare Rahmenbedingungen bezüglich der Vergütung des zurückgespeisten Stroms

Die Rückspeisung von WKK-Strom ins Netz wird bisher nur minimal vergütet. Die Entschädigung entspricht nicht ihrem realen Marktwert während der kalten Jahreszeit, wenn ein hoher Bedarf vorliegt. Da ist die Politik gefordert. Sie muss die entsprechenden Rahmenbedingungen zur Zukunftssicherheit schaffen.

- Fehlinformationen zum CO₂-Ausstoss beim Betrieb von Wärmepumpen

Wärmepumpen-Heizungen werden als erneuerbar (grün) eingestuft; obschon der benötigte Strom häufig mit hohen CO₂-Emissionen belastet ist (Der Bericht von Urs P. Gasche vom 22.12.2023 im Infosperber erläutert und unterstreicht diese Aussage). Diese unklare Einschätzung (welche durch die Politik gepflegt wird) benachteiligt die WKK gegenüber den Wärmepumpen häufig stark.

- Rationelle Herstellung und Markteinführung, welche mit Investitionen (und Risiken) verbunden ist
Weitere Ausführungen befinden sich im Kapitel 6.6.



5.11 Dringlichkeit

Im Jahr 2050 sollen praktisch keine klimaschädlichen Gase in die Atmosphäre ausgestossen werden. Erneuerbare Energien werden eine wichtige Rolle spielen, um dieses Ziel zu erreichen. Mit Solarenergie wie mit Windkraftwerken kann Strom zu niedrigen Kosten erzeugt werden.

Dieser verbreitete Hinweis ist recht irreführend oder ungenügend. Es wird verschwiegen, dass viel Energie gespeichert werden muss, um das elektrische Netz dauernd und sicher betreiben zu können. Die benötigte Infrastruktur wird hohe Kosten verursachen und der Umstrukturierungsprozess wird viel Zeit in Anspruch nehmen. Das, von der AXPO zur Verfügung gestellte Tool (www.powerswitcher.axpo.com) stellt für verschiedene Szenarien die zu erwartenden Kosten dar.

Die verfügbaren Mittel werden beschränkt bleiben. Der CO₂-Ausstoss kann nur mit möglichst kostengünstigen Techniken rasch gesenkt werden. Solange fossile Energien eingesetzt werden, müssen diese effizient genutzt werden. WKK-Anlagen können dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Die meisten BHKW lassen sich schon heute mit Biogas betreiben und eine Umstellung auf ein Gasgemisch mit einem Wasserstoffanteil scheint möglich zu sein. Diese Flexibilität lässt einen allmählichen Übergang von fossilen zu erneuerbaren Brennstoffen zu.

5.12 Stirling-WKK in Kombination mit Biomasse-Verbrennung

Stirling-Anlagen werden von aussen beheizt, wodurch beliebige Brennstoffe eingesetzt und verwertet werden können. Die wichtigsten Einschränkungen ergeben sich vom praktischen Betrieb dieser Kleinanlagen in den Wohnquartieren.

Als günstigste Lösung gilt der Einsatz von gasförmigen Biomasse-Produkten, die dem Erdgas zu rund 30% beigemischt werden sollen, siehe Kapitel 5.8.2. Hierbei wird angenommen, dass diese Gemische zentral aufbereitet und über das bestehende Gasnetz an die Kunden verteilt werden. Die Qualität dieser Gemische wird kontrolliert und der Heizwert wird nur innerhalb von beschränkten Grenzen variieren können. Grössere Schwankungen könnten den Betrieb der eingesetzten Brenner stören.

Die Stirling-WKK in Kombination mit Holz-Verbrennung wird im Kapitel 6.8 näher erläutert.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Beim Betrieb der 7 Feldtestgeräten zeigten zahlreiche Messungen und Beobachtungen mögliche Lösungen, um qualitativ einwandfreie WKK-Einheiten zu bilden. Ein innovatives Konzept liegt vor, welches zahlreiche, hohe Anforderungen für ein marktreifes Produkt erfüllen muss. Diese Verbesserungen können in mehreren Schritten, im Rahmen der entsprechenden Finanzierung, durchgeführt werden. Anschliessend an die eigentliche Produktentwicklung muss die gesamte Einheit serienreif, kostengünstig hergestellt werden können, damit diese langfristig mit geringem Unterhalt effizient und flexibel betrieben werden kann.

Diese geschilderten Schritte können nur von einem Industrialisierungspartner durchgeführt werden, der neben dem Marktzugang, den Produktionsmöglichkeiten auch über genügend finanzielle Mittel verfügt. Bis derjenige gefunden ist, wird das Projekt nicht weitergeführt; die Feldtestgeräte werden demontiert und zurückgenommen mit Ausnahme der Anlage HEIG, die für Laborversuche zur Verfügung steht. Zwei weitere Geräte stehen zur Vorführzwecken bei der Schmid Stirling GmbH.

6.1 FLOX-Brenner und Wärmerekuperator

Die bestehenden FLOX-Brenner wurden als fertiges Produkt gekauft, mitsamt dem Luftvorwärmer und der Regelapparatur. Zahlreiche Verbesserungen waren erforderlich, um diese Brenner überhaupt einsetzen zu können. Die Form des Venturirohres muss angepasst werden, damit der Brenner möglichst flexibel in einem gewünschten Leistungsbereich betrieben werden kann und eine genügend hohe Abgasmenge rezirkuliert wird.

Der Rekuperator für die Luftvorwärmung sollte eine grössere Wärmeaustauschfläche aufweisen als die bestehenden, abgeflachten Wärmetauscherröhrchen. Diese können durch eine kegelförmige Austauschfläche ersetzt werden, welche in der Isolation, auf Höhe der Erhitzerröhrchen, angeordnet wird. Die Gesamthöhe der Freikolben-Resonanzstirlings würde damit um 200 bis 300 mm reduziert.

Bei dieser Lösung strömen die Abgase der Verbrennung unter dem zylindrischen Isolationsmantel aus. Die Feuchtigkeit der Abgase könnte besser als bisher auskondensiert werden. Bei entsprechender Gestaltung des FLOX-Brenners in Kombination mit der Brennkammer können äusserst tiefe CO und NO_x-Werte eingestellt werden.

6.2 Erhitzerkopf

Der Erhitzerkopf mit dem Übergang zu den Erhitzerröhrchen wurde bereits konstruktiv verbessert. Weitere Anpassungen scheinen angebracht, um diese hoch beanspruchten Teile langfristig betreiben zu können. Die Materialwahl und die Schweissstellen werden eine grosse Rolle bei der Dauerfestigkeit dieser Komponente spielen. Die Herstellung sollte verbessert werden, z.B. durch ein kombiniertes Schweissen und Hartlöten. Weiter würde eine Reduktion der Brenntemperatur um etwa 50° die Belastung stark reduzieren.

6.3 Tellerfedern

Die bestehenden Einheiten wurden mit je 3 Tellerfedern am Hauptkolben und an der Gegenschwingmasse ausgerüstet. Die durchgeführten Analysen zeigten, dass jeweils 2 Tellerfedern genügen, sofern keine überlagerten Schwingungen die Federarme zusätzlich belasten. Dazu muss die Form der Federarme überarbeitet werden, um die instationären Kräfte zu vermindern.

6.4 Regenerator

Der Regenerator besteht aus gewickelten Drahtgeflechten, welche geeignet verformt und aufgeplustert werden. Bisher wurden die günstigsten Resultate mit Metall-Geflechtdichten von mindestens 17% erzielt. Analysen zeigen, dass geringere Dichten vorzuziehen wären, sofern sich ein



gleichmässig stabiler Durchfluss einstellt. Die Form der Aufplusterung spielt offenbar eine Rolle und müsste weiter verbessert werden. Als Alternative ist zu untersuchen, ob gesinterte Regeneratoren, wie Microgen Engine sie einsetzt, eine günstigere Lösung ergäbe.

6.5 Regelsystem

Bisher sind mehrere, getrennt funktionierende Regelkreisläufe vorhanden. Unter anderem verfügt der Brenner über einen separaten Regelkreis. Zukünftig sollte das gesamte Regelsystem als Einheit gestaltet werden, damit die einzelnen Funktionen besser aufeinander abgestimmt werden können.

Je nach Einsatzbedingungen müssen Netzfrequenzschwankungen aufgenommen werden können. Dazu muss entweder das gesamte Schwingssystem (inkl. Gegenschwingmasse) mit einer variablen Frequenz betrieben werden können, oder ein Netzanschluss über einen Wechselrichter vorgesehen werden.

6.6 Senkung der Herstellkosten

Für serienweise gebaute Freikolben-Resonanzstirling müssen sämtliche Komponenten überprüft werden, damit diese möglichst rationell, zu niedrigen Kosten hergestellt werden können.

Dieser Teil der Entwicklung, namentlich die Herstellung eines Serienproduktes, wird in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner erfolgen müssen. Ansätze zu einem gemeinsamen Vorgehen sind im folgenden Abschnitt umschrieben.

6.7 Betrieb der WKK mit Erdgas-Biogasgemischen

Der VSG sieht vor, in Zukunft Biogasgeräte zu betreiben, um das erzeugte, erneuerbare Gas dem Erdgas beizumischen und über das bestehende Versorgungsnetz an die Kunden zu verteilen. Im Grenzfall können bis zu 30% der Energie aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden. Diese Entwicklung sollte bis 2030 erfolgen.

Durch die WKK kann bereits viel Primärenergie gegenüber den Heizkesseln eingespart werden. Werden dem Erdgas 30% erneuerbaren Gase beigemischt, wird der CO₂-Ausstoss gegenüber der heutigen, getrennten Strom- und Wärmeproduktion um 65 bis 70% gesenkt.

Vermutlich wird die Qualität des Gemisches die stattfindende Verbrennung mit beeinflussen. Der Heizwert des Gasgemisches wird davon abhängig sein, wie viel Wasserstoff (H₂) und Biogase aus Landwirtschaftsprodukten dem Erdgas beigemischt werden. Genauere Aussagen über diese Einflüsse müssen aus zusätzlichen Versuchsreihen abgeleitet werden.

6.8 Weiterentwicklung der Holzverbrennung in Kombination mit dem Freikolben-Resonanzstirling

Mit Pellets/Holzschnittel betriebene Stirlingmotoren werden (und wurden) z.B. von Ökofen, Frauscher Motors und Sunmachine gebaut und angeboten. Die grundsätzliche Möglichkeit dieser Lösungen ist somit aufgezeigt, ein marktgerechter Verkauf ist aber nicht weiter bekannt.

Die vielversprechenden Leistungen des Freikolben-Resonanzstirling, der zunehmende Druck zur Dekarbonisierung unserer Gesellschaft und die wachsende Zahl wissenschaftlicher Publikationen zu diesem Thema rechtfertigen die weitere Entwicklung eines solchen Mikro-WKK-Systems, das auf dem erneuerbaren Energieträger Holz basiert. Bei dieser Anwendung kommen die ganzen Vorteile der Freikolben-Resonanzstirling-Technik zum Tragen. Die äussere Verbrennung, in Zusammenspiel mit der im Feld bereits getesteten Motorentechnik, stellt ein vielversprechendes Konzept dar.



Im «Essais d'endurance» (Anhang 5) wird die Kombination des Freikolben-Resonanzstirling mit Holzbasierter-Verbrennung positiv beurteilt und zur Weiterentwicklung empfohlen. Weitere Ausführungen sind im Bericht von Herr Carré, Optimisation Brûler FLOX pour moteur Stirling <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48982>, aufgelistet.

Laufende Gespräche mit der HEIG in Yverdon (mit Herrn Roger Röthlisberger) zeigen, dass eine Entwicklung in dieser Richtung angedacht ist. Im Labor der HEIG steht ein Freikolben-Resonanzstirling, der für entsprechende Entwicklungen umgebaut werden könnte.

7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Seit Beginn dieses P + D – Projektes wurde eine Zusammenarbeit mit nationalen und international tätigen Interessenten angestrebt, vorerst bezüglich der rationellen Herstellung der Baugruppen (oder der Hauptkomponenten) dieser Systeme. Ein Durchbruch der entwickelten Technik wird erst mit einer rationellen, serienweisen Fertigung des gesamten Freikolben-Resonanzstirlings möglich sein.

Als wichtigste Aktivität wurden Kontakte mit Microgen Engine Corporation (MEC) gepflegt, welche bereits seit Jahren kleine Freikolben-Stirling herstellt und vertreibt, MEC zeigte Interesse an unserem Konzept, um Einheiten mit höheren Abgabeleistungen anbieten zu können.

Andere Industriepartner aus der Heizungsbranche können ebenfalls angesprochen werden. Von ihnen wird die nötige Erfahrung in Präzisionsfertigung der Komponenten im Systembau erwartet und sie die fertigen Produkte weitläufig vermarkten können.

Die Frage der Markteinführung wird von dieser Zusammenarbeit abhängig sein und kann nicht getrennt betrachtet werden.

Eine enge Zusammenarbeit mit Fachhochschulen wird angestrebt, insbesondere mit HEIG-VD, welche im Bereich der Biomassenverbrennung bereits Studien durchgeführt hat.

8 Kommunikation

Publikationen zum Einsatz kleiner WKK-Geräte werden folgende Aspekte umfassen:

8.1 Technische Eigenschaften neuer WKK-Geräte

Die Eigenschaften der neu entwickelten WKK-Geräte und ihr Einsatz in Wohnquartieren sind in Kapitel 5.1 zusammengefasst. Die 2 Jahre dauernden Feldtests haben erwiesen, dass die Einheiten einfach bedienbar sind und wenig Wartung bedürfen. Sie genügen den strengen, bestehenden Normen für ihren Einsatz in Wohnquartieren (Abgase, Lärm, Vibrationen) und erfüllen die von MuKE geforderten Effizienznormen.

Das Funktionsprinzip der entwickelten Systeme, die erzielten oder umgesetzten Leistungen und der Vergleich mit bestehenden, konkurrierenden Konzepten wird in technischen Publikationen näher beschrieben. Diese Unterlagen, der Entwicklungsstand und der Betrieb der Freikolben-Resonanzstirling sind im vorliegenden Bericht zusammengefasst.

8.2 Vergleich mit den heute angewandten Technologien

Alle bisher bestehenden, kleinen stromerzeugenden Heizungen weisen gewisse Nachteile auf, die ihren Durchbruch verhinderten:

- Kleine Verbrennungsmotor BHKW scheitern an den strengen Abgasvorschriften für den Betrieb in Wohnquartieren, den hohen Wartungskosten und den unzulässigen Lärmemissionen.



- Kinematische Stirling BHKW scheitern am Verschleiss und dem Unterhaltsbedarf einer geschmierten Mechanik. Automobile mit Verbrennungsmotor benötigen einen Service alle 300 Betriebsstunden, während eine Heizanlage jährlich während etwa 3000 h betrieben werden sollte.
- Brennstoffzellen-Heizungen scheitern bis heute an den Kosten und der niedrigen elektrischen Leistung. Die verbreiteten japanischen und koreanischen Einheiten sind für die Bereitstellung von sanitärem Heisswasser dimensioniert und nicht für die bei uns üblichen Gebäudeheizungen.
- Die bisher verfügbaren Freikolben-Stirling auf Basis der Auslegung von Beale haben eine beschränkte elektrische Leistungsabgabe und einen ungenügenden elektrischen Wirkungsgrad von 12 bis 15%. MuKEN schreibt einen minimalen Grenzwert von 25% vor. Die Begrenzung ist Folge des instabilen Betriebes bei erforderlichen, höheren periodischen Druckänderungen des Arbeitsgases.
- Hier setzt die Lösung der Schmid Stirling GmbH mit dem Freikolben-Resonanzstirling an; er erfüllt alle geforderten Merkmale und ist somit einzigartig und konkurrenzlos. Die hohe, erzielbare Leistungsdichte ergibt günstige Bedingungen für ihren wirtschaftlichen Betrieb.

	25% el. Wirkungsgrad	Abgase einhalten der LRV-Norm	Lärm- und Vibrationsarm	geringer Unterhalt	Hohe Investition
WKK mit Freikolben-Resonanzstirling	Über 25%		gering		Nicht teurer als Wärmepumpen
Bisherige WKK mit Freikolbenstirling	12-13%				
Verbrennungsmotor-WKK		Mit Nachbehandlung	Benötigt viel und gute Schallisolation	Öl und Dichtungen ersetzen	
Brennstoffzellen-WKK				Stack muss viel gewechselt werden	Teuer in der Anschaffung
Gasheizung	keine Stromerzeugung				

Tabelle 14: Charakteristiken, Quelle: Schmid Stirling GmbH, 2023

8.3 Einsatz von regenerativen oder synthetischen Brennstoffen

Kleine WKK-Anlagen werden durch äussere Verbrennung angetrieben. Ihre CO₂-Bilanz kann durch den Einsatz von regenerativen Brennstoffen deutlich verbessert werden. Entsprechende Brenner wurden bereits für den Betrieb von kinematischen Stirling-Einheiten eingesetzt, die Technologie ist bekannt und dient als Grundlage für den Einsatz am Freikolben-Resonanzstirling.

Ein Fernziel der laufenden Klimapolitik ist es, mit dem überschüssigen Strom der Sommermonate Wasserstoff herzustellen. Zur besseren Lagerung kann dieser auch in synthetisches Erdgas oder Methanol umgewandelt werden. Die Herstellung und Lagerung dieses Brennstoffs werden teuer sein. Dies wird erfordern, dass die Brennstoffe möglichst effizient genutzt werden: statt sie einfach zu verbrennen, wird es besser sein, diese zum Betrieb von WKK-Anlagen einzusetzen.

Während geraumer Zeit können die synthetischen Brennstoffe dem Erdgas beigemischt werden. Ihre Lagerung beschränkt sich auf jene des Erdgases, zudem können diese über das bestehende Verteilnetz ganze Wohnquartiere versorgen. Mit ihrem Einsatz beim Betrieb kleiner WKK-Anlagen kann der teuer hergestellte, synthetische Brennstoff optimal genutzt werden.



9 Publikationen

An der im September 2021 durchgeführten internationalen Stirling-Konferenz ISEC-19 wurde ein Vortrag über die Entwicklung und den Versuchsbetrieb der Freikolben-Resonanzstirling gehalten. In Folge der COVID-Epidemie verlief die Konferenz ausschliesslich per Internet, womit sich der Kontakt mit Stirling-Spezialisten auf wenige Gespräche beschränkte. Die Publikation der Vortragsreihe steht noch aus, sollte aber die Gelegenheit für schriftliche Kontakte unter Kollegen bieten.

Eine Veröffentlichung in Form eines Applikationsberichtes mit der Firma Sigmatek AG erschien in der Ausgabe «Technik und Wissen» Mitte November 2022. Der Beitrag des Freikolben-Resonanzstirling zur Deckung der Stromlücke im Winter und das Zusammenspiel der Steuerung und der Remote Funktionen werden umschrieben.

Ein zusammenfassender Artikel liegt vor, welcher sich an ein breites Publikum wendet und kritische Fragen der Klimaerwärmung analysiert. Die WKK zeigt Wege auf zur Minderung des Ausstosses von Treibhausgasen. Die wichtigen Eigenschaften werden zusammen mit einfachen Erläuterungen für eine technische Fachzeitschrift dargestellt und sollte von Journalisten (vom VSG, der Klimastiftung Schweiz oder von technischen Fachzeitschriften) noch überarbeitet werden.



10 Literaturverzeichnis

AXPO: www.powerswitcher.axpo.com

BFE: Zukunftsstrategie für die Wärme-Kraft-Kopplung (2.12.2022)

Urs P. Gasche: «Greenwashing» mit Strom aus der Steckdose (Infosperber, 22.12.2023)

HP. Guggenbühl: Energiewende und wie sie gelingen kann (Rüegger Verlag)

HP. Guggenbühl: Klimapolitik: Lieber 80% umsetzen als 100% ankündigen
(www.infosperber.ch/Artikel/Umwelt/EICom)

Dr. Florian Habermacher: Dozent und Projektleiter an der Hochschule Luzern (Energiezukunft Schweiz, Jahresausgabe 2024)

ISEC-17: Resonance Stirling Engine Producing Heat and Power (R. Schmid, J.P. Budliger, Newcastle, 2016)

ISEC-19: Resonance Stirling Engine Producing Heat and Power (R. Schmid, J.P. Budliger, Roma, 2021)

Dr. Ed. Kiener: Wir laufen auf eine Versorgungsknappheit zu (Tagesanzeiger, 23.03.2018)

Amin Maalouf: Le naufrage des civilisations (Ed. Grasset, 2019)

Roger Nordmann: Urgence énergie et climat (2023)

VSG: Eine Heizung, die auch Strom erzeugt (<https://gazenergie.ch/de/newsletter>)

VSG: WKK – überraschend einfach und klug (Gazette Nr. 1/2017)

Patent **EP 11'718'884.7, Piston résonant:** (29.03.2011)

Sigmathek Applikationsbericht: (Technik und Wissen, 22.11.2022)

www.stirling.ch

11 Anhang

- 1 **Schmid Stirling GmbH:** Abbildung mit allen aufgezeichneten Datenpunkten
- 2 **Schmid Stirling GmbH:** Betriebskostenvergleich Freikolben-Resonanzstirling- BHKW mit Luft-Wasser Wärmepumpe
- 3 **HEIG-VD:** InnoFloxStirling – 55880.1 INNO-ENG (2022),
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=48982>
- 4 **HEIG-VD:** Caractérisation d'un Stirling à résonance, AGP 98914 (2021)
- 5 **HEIG-VD:** Essais d'endurance (Système CCF avec piston libre), AGP 98914 (2023)
- 6 **HEPIA:** Projet Stirling, (2023)

66/67



Anhang 2: Betriebskostenvergleich Freikolben-Resonanzstirling- BHKW mit Luft-Wasser Wärmepumpe

Wärmemenge pro Jahr in kWh	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000	24000
Gaskosten Fr./kWh	0.15	0.15	0.15	0.15	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.25	0.25
Stromkosten/Ertrag Fr./kWh	0.75	0.6	0.5	0.45	0.75	0.6	0.5	0.45	0.75	0.6	0.45
Leistungsziffer der Wärmepumpe	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
El. Leistung des BHKW in kW	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Th. Leistung des BHKW in kW	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Wartungskosten der Wärmepumpe in Fr./Jahr	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Wartungskosten des BHKW/in Fr./Jahr	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
Revision BHKW (1x in 10 Jahren): Anteil in Fr./Jahr	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500

Betriebskosten der Wärmepumpe/Jahr											
Stromkosten/Jahr	5625	4500	3750	3375	5625	4500	3750	3375	5625	4500	3750
Wartungskosten/Jahr	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Totale Betriebskosten WP/Jahr	5875	4750	4000	3625	5875	4750	4000	3625	5875	4750	3625

Betriebskosten des BHKW/Jahr											
Gaskosten/Jahr in CHF	4'800	4'800	4'800	4'800	6'400	6'400	6'400	6'400	8'000	8'000	8'000
Stromertrag/Jahr in CHF	6'000	4'800	4'000	3'600	6'000	4'800	4'000	3'600	6'000	4'800	3'600
Wartungskosten/Jahr in CHF	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
Revisionskosten Anteil/Jahr in CHF	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Totale Betriebskosten BHKW/Jahr in CHF	200	1'400	2'200	2'600	1'800	3'000	3'800	4'200	3'400	4'600	5'800

Differenz BHKW zu WP in CHF	5'675	3'350	1'800	1'025	4'075	1'750	200	-575	2'475	150	-1'400
-----------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	------	-------	-----	--------

Differenz BHKW zu WP in 20 Jahren in CHF	113'500	67'000	36'000	20'500	81'500	35'000	4'000	-11'500	49'500	3'000	-28'000
--	---------	--------	--------	--------	--------	--------	-------	---------	--------	-------	---------

InnoFloxStirling – 55880.1 INNO-ENG

„Optimisation Brûler FLOX pour moteur Stirling

Rapport de projet - AGP # 113650

Auteur

Marc-André Baillifard

Résumé

Dans ce travail, le brûleur FLOX du moteur Stirling de la société Rudolf Schmid SA a été analysé. Une recherche bibliographique a mis en évidence l'importance du taux de recirculation k_v sur la stabilité du brûleur : une valeur $k_v > 250\%$ est généralement recommandée. Les simulations de dynamique des fluides du brûleur existant confirment les résultats obtenus sur le prototype, à savoir que la combustion n'est pas stable. Les taux de recirculation calculés sont de l'ordre de 88%. La mise en rotation de l'écoulement améliore la stabilité de l'écoulement, ce que confirment les essais en laboratoire. La géométrie de l'échangeur de chaleur joue une influence prépondérante sur le taux de recirculation : des valeurs de plus de 300% ont été obtenues avec un échange de chaleur idéal, mais malheureusement non réalisable. Une amélioration significative a été obtenue en faisant passer le nombre de chicanes côté échangeur de 5 à 3. Cette amélioration a également été confirmée par des essais en laboratoire. Les modifications entreprises sur le brûleur à ce stade permettent d'assurer un fonctionnement significativement plus stable que précédemment.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. : +41 (0)24 557 76 00
E-mail : info@heig-vd.ch

Table des matières

Introduction.....	3
1 Rappels combustion FLOX®	3
2 Présentation du brûleur FLOX® analysé.....	8
2.1 Zone I : mélange entre air neuf et gaz de combustion	10
2.2 Zone II : combustion	11
2.3 Zone III : échangeur de chaleur.....	12
2.4 Paramètres de fonctionnement généraux	14
3 Simulations CFD	15
3.1 Hypothèses de base.....	15
3.1.1 Géométrie de calcul	15
3.1.2 Modèles de calcul	16
3.1.3 Conditions aux limites.....	16
3.2 Simulation de l'état actuel	18
3.3 Simulation de l'état actuel : inclinaison des buses de 5°	20
3.4 Influence de l'échangeur de chaleur	21
3.5 Influence des diamètres de buses d'air de combustion	24
3.6 Influence de la longueur du brûleur.....	25
3.7 Influence de la forme du déflecteur	26
4 Conclusions/recommandations.....	27
5 Bibliographie	28

Introduction

La société Rudolf Schmid SA a réalisé un nouveau type de moteur Stirling à pistons libres, qui se distingue par des performances (puissance et rendement électriques) nettement plus élevées que les produits connus à ce jour. Le concept de ce moteur et les performances atteintes par des unités CCF sont décrits en plus de détail sous www.stirling.ch. A présent, un projet Pilote et Démonstration (P + D) de l'OFEN est en cours, bénéficiant du soutien de l'ASIG et du Fonds climatique Suisse ainsi que des services industriels des sites d'implantation. Cette étude comprend la réalisation de 5 unités pilotes, qui sont installées chez des clients qui les exploiteront durant au moins 2 ans.

Le projet dont il est question ici se focalise sur la conception du brûleur FLOX. Le but est de pouvoir améliorer sa stabilité ainsi que d'étendre sa plage de fonctionnement. Pour ce faire, une meilleure compréhension de l'écoulement de gaz au sein du brûleur est nécessaire. C'est dans ce but que des simulations de dynamique des fluides ont été réalisées. Les résultats de ces simulations sont présentés dans ce document.

1 Rappels combustion FLOX®

Le terme Flox® est le nom commercial donné par l'entreprise WS Wärmeprozessstechnik GmbH au procédé de combustion sans flamme qu'elle a développée dans les années 1990. Ce procédé de combustion sans flamme est aussi connu sous d'autres noms, comme MILD (Moderate or Intense Low oxygen Dilution) ou HiTAC (High Temperature air combustion), ou encore Colorless distribution combustion.

Dans une combustion traditionnelle de type flamme de diffusion, lorsque le combustible (par exemple du méthane) entre en contact avec un oxydant (généralement l'oxygène de l'air), et que la température est suffisamment élevée, ils vont réagir instantanément et générer un dégagement de chaleur important. Ces réactions ont lieu au sein de la flamme, où la température peut être ponctuellement très élevée (potentiellement jusqu'à 2200 K pour du méthane). Cette température élevée entraîne généralement des émissions de NOx élevées, ce qui peut être problématique.

En mélangeant à l'air de combustion une grande quantité de gaz inerte préchauffé à une température supérieure à la température d'auto-ignition du combustible, par exemple en recirculant les gaz de combustion, il est possible de brûler le combustible sans flamme apparente : il s'agit du mode de combustion sans flamme. La dilution de l'air de combustion avec les gaz de combustions a plusieurs effets, dont les principaux sont les suivants : (1) diminuer la concentration d'oxygène (2) augmenter la masse de gaz à chauffer sans changer le rapport stœchiométrique. (3) ramener d'éventuels gaz imbrûlés dans la chambre de combustion. Cela a pour conséquence que les réactions de combustion ne sont plus instantanées, et que la température locale est toujours nettement inférieure à la température adiabatique de combustion. Les émissions de NOx restent donc faibles, tout comme les émissions d'imbrûlés.

Le fonctionnement d'un brûleur en mode combustion sans flamme nécessite donc :

- Une température de la chambre de combustion T_{four} suffisante : cela a pour conséquence qu'il est nécessaire de préchauffer le brûleur avant qu'il puisse fonctionner en mode Flox. Il est également nécessaire de préchauffer l'air de combustion;
- Un taux de recirculation K_v suffisamment élevé ;

La figure ci-dessous (Figure 1) représente un schéma de principe d'un brûleur avec combustion sans flamme.

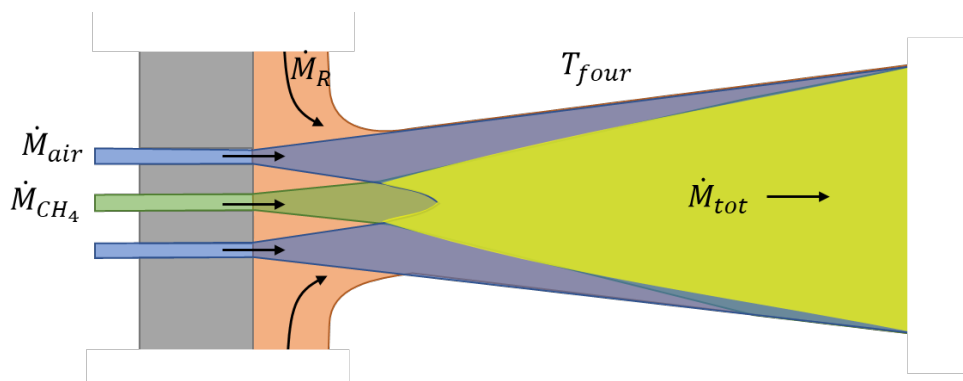


Figure 1 : schéma de principe, brûleur combustion sans flamme

Le taux de recirculation est généralement défini comme suit :

$$K_v = \frac{\dot{M}_R}{\dot{M}_{air} + \dot{M}_{CH_4}} \quad (1)$$

Avec :

- K_v : le taux de recirculation
- \dot{M}_R : le débit de gaz recirculés
- \dot{M}_{air} : le débit d'air de combustion
- \dot{M}_{CH_4} : le débit de combustible (du méthane dans le cas présent)

La figure suivante (Figure 2) montre pour quelle plage de taux de recirculation K_s et de température de four T_{four} le mode de combustion sans flamme est possible (Wünning and Wünning, 1997). Ce graphique montre qu'entre la combustion classique (combustion stable) et la combustion sans flamme, il existe une zone pour laquelle la combustion est instable.

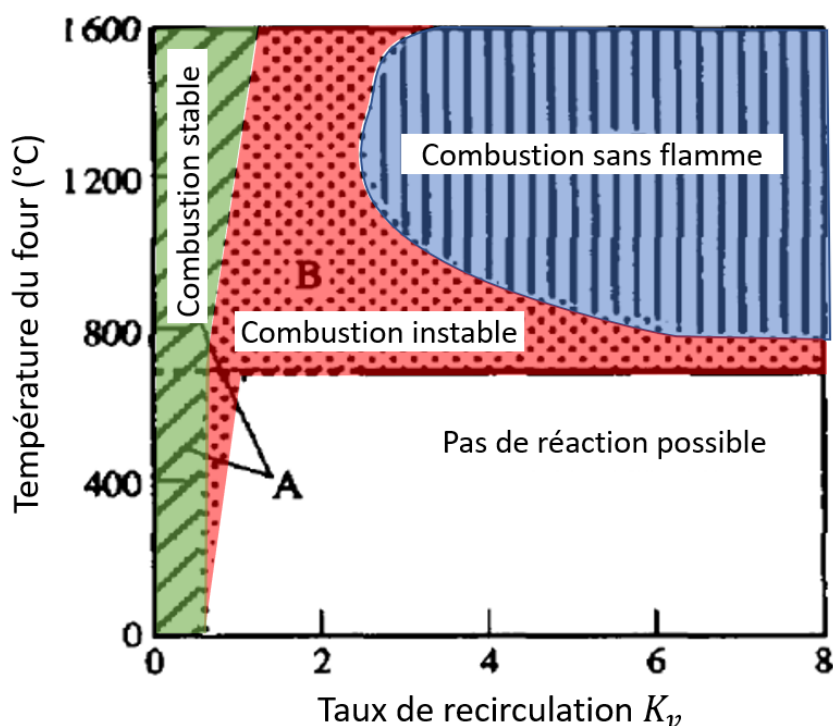


Figure 2: Régimes de combustion possibles en fonction de la température dans le four et du taux de recirculation selon (Wünning and Wünning, 1997)

Comme la combustion sans flamme nécessite une température élevée dans la chambre de combustion pour pouvoir se développer, il est nécessaire de préchauffer cette dernière en utilisant une combustion classique, comme illustré sur la figure ci-dessous. La température de la chambre de combustion lors du passage en mode combustion sans flamme peut influencer le point de fonctionnement du brûleur.

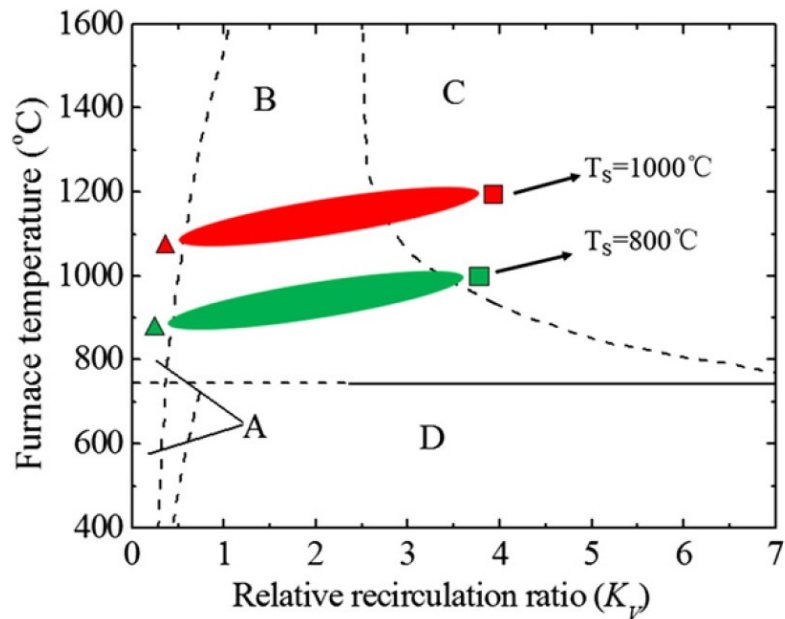


Figure 3: Illustration du processus de démarrage d'un brûleur sans flamme (Tu et al., 2017)

Idéalement, un brûleur avec mode de fonctionnement sans flamme est composé de 3 parties bien distinctes (Figure 4) :

- (I) Une zone de mélange entre les gaz de combustion recirculés et l'air de combustion ;
- (II) Une zone de combustion ;
- (III) Une zone de refroidissement des gaz de combustion, qui fournit la chaleur au processus.

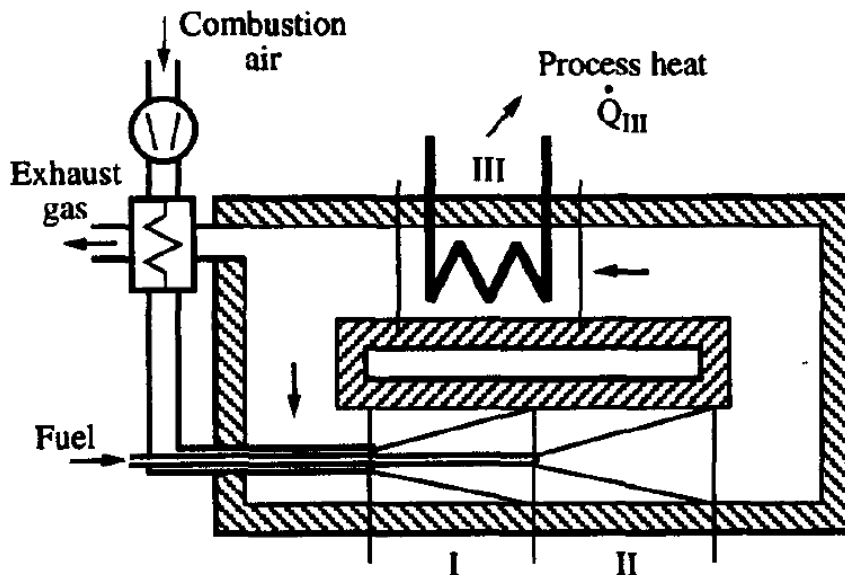


Figure 4: Vue schématique d'un brûleur en mode sans flamme, avec les 3 zones nécessaires au bon fonctionnement du brûleur (Wünning and Wünning, 1997)

Les gaz de combustion sont généralement entraînés dans la chambre de combustion grâce à la vitesse des jets d'air de combustion (Heil, 2010).

En effet, un jet d'air entrant à grande vitesse (quantité de mouvement) dans un espace contenant de l'air au repos aura tendance à mettre en mouvement l'air au repos et à l'entraîner avec lui. Ce faisant, la vitesse centrale du jet va diminuer (Figure 5)

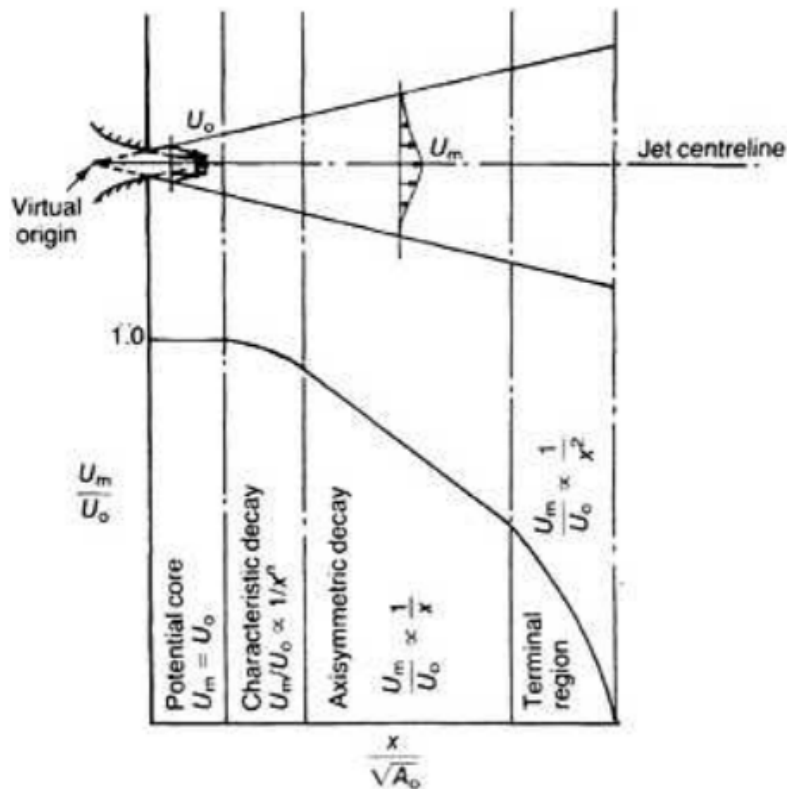


Figure 5: Jet d'air libre rentrant dans de l'air au repos : évolution de la vitesse centrale du jet (Awbi, 2002)

Il n'existe pas de formule analytique permettant de déterminer le débit d'air entraîné par un jet. Des mesures expérimentales ont montrée que pour un jet d'air circulaire dans de l'air au repos, le débit d'air entraîné varie comme suit (Awbi, 2002):

$$\frac{\dot{V}(x)}{\dot{V}_0} = 0.32 \cdot \frac{x}{d_0} \quad (2)$$

Avec :

- x l'éloignement à partir de l'entrée du jet d'air
- \dot{V}_0 le débit d'air à l'entrée du jet d'air (en $x = 0$)
- $\dot{V}(x)$ le débit d'air à une distance x de l'entrée du jet d'air
- d_0 le diamètre de l'entrée d'air

On constate donc que pour un débit d'air \dot{V}_0 donné (fixé par le coefficient d'excès d'air désiré pour la combustion), le moyen principal pour augmenter le débit d'air entraîné est de diminuer le diamètre de l'entrée d'air. Cette constatation est confirmée par les résultats présentés sur la figure suivante tirée de (Cheong et al., 2018), si le diamètre des buses est insuffisant, le taux de recirculation K_s ne sera pas suffisant pour atteindre la région stable de combustion sans flamme.

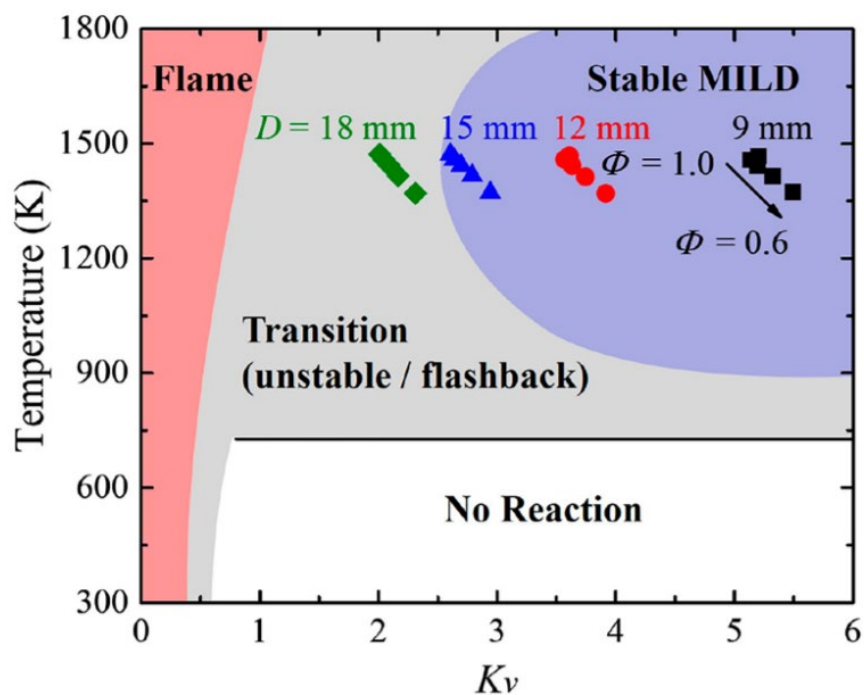


Figure 6: Effet du diamètre des sorties d'air de combustion sur le mode de fonctionnement du brûleur (Cheong et al., 2018).
 D correspond aux diamètre des buses d'air de la publication, et non pas du brûleur présenté ici.

2 Présentation du brûleur FLOX® analysé

Le brûleur FLOX utilisé pour le moteur Stirling est fourni par l'entreprise WS Wärmeprozessstechnik GmbH. Seule la chambre de combustion et l'échangeur de chaleur ont été adaptés pour le moteur Stirling. La figure ci-dessous montre une vue en coupe du brûleur complet. Avec les organes principaux du brûleur mise en évidence.

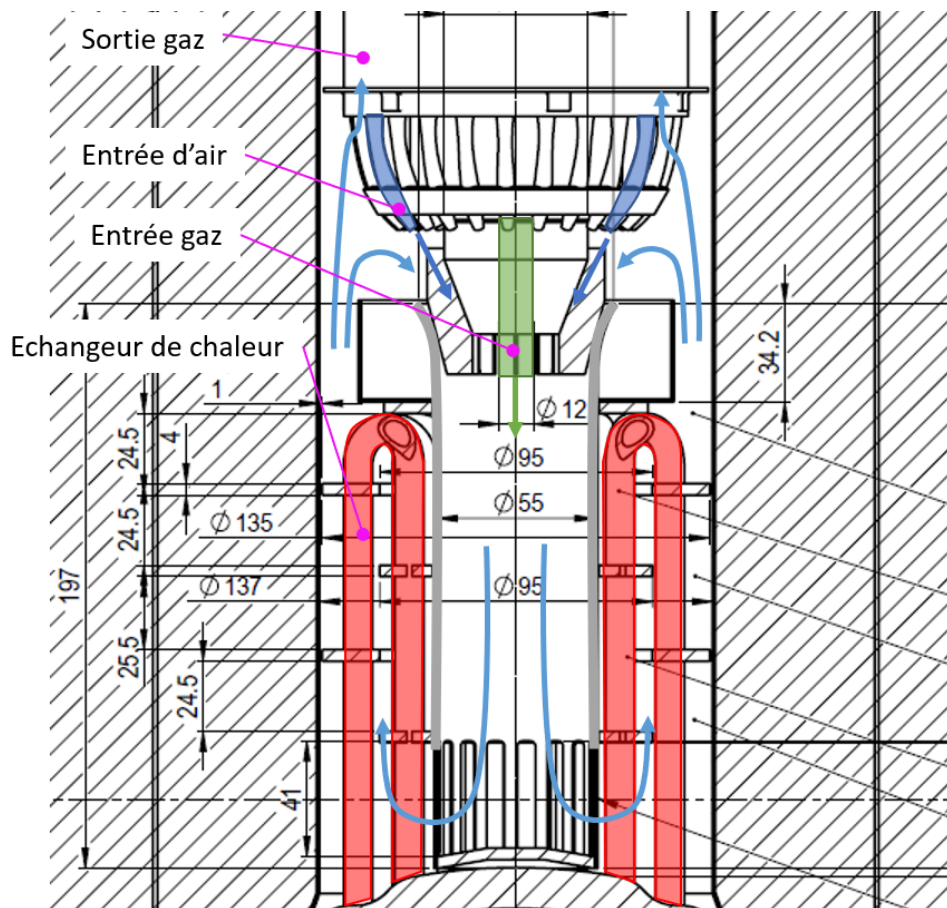
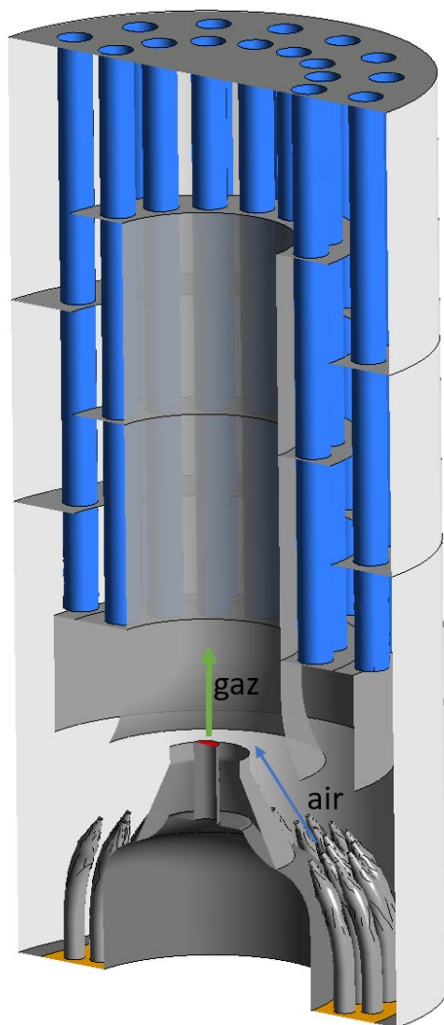


Figure 7 : Vue en coupe du brûleur étudié.

La figure suivante (Figure 8) montre une coupe du modèle 3D de base utilisé pour les simulations, ainsi que le positionnement des zones principales du brûleur décrites au chapitre 1 (Figure 4), à savoir :

- (I) Zone I : mélange entre les gaz de combustion recirculés et l'air de combustion ;
- (II) Zone II : combustion ;
- (III) Zone III : refroidissement des gaz de combustion, échangeur de chaleur

Les options constructives retenues pour ces 3 zones sont décrites plus en détail dans les paragraphes qui suivent.



Vue 3D

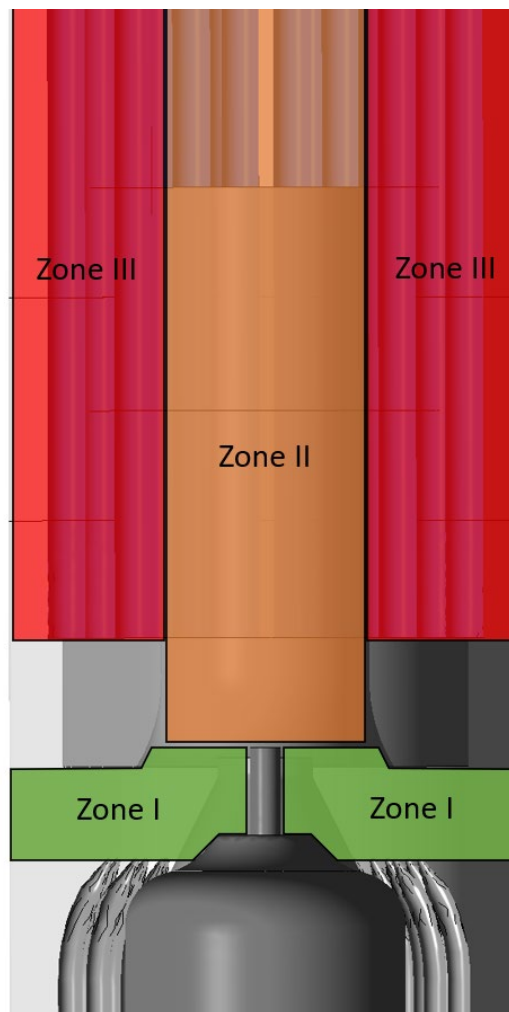


Illustration des zones du brûleur Zone I : entraînement,
Zone II : combustion, Zone III : échange de chaleur,

Figure 8 : vue 3D du brûleur

2.1 Zone I : mélange entre air neuf et gaz de combustion

La figure ci-dessous (Figure 9) présente les caractéristiques principales de la zone de recirculation. L'air neuf de combustion est injecté via 48 buses réparties sur le pourtour du brûleur. Chaque buse a un diamètre de 1.4 mm. Les buses sont inclinées avec un angle de $\sim 30^\circ$ en direction de l'entrée du gaz de combustion. Un déflecteur de forme conique est placé autour de l'entrée d'air d'allumage ainsi que de l'entrée de gaz naturel.

Selon les considérations avancées au chapitre 1, plus particulièrement l'équation (2), la quantité de gaz de combustion entraînée devrait dépendre principalement des paramètres suivants :

- **La vitesse de sortie v_0** , influencée par le nombre de buses et le diamètre de sortie d'une buse. En considérant que le nombre de buse ne peut pas être varié, le paramètre restant est le diamètre de la buse d_0 : plus celui-ci est petit, plus le débit de gaz entraîné est élevé.
- **La longueur du jet L** dans les gaz de combustion : celle-ci est principalement influencée par l'angle du jet et la position du brûleur en forme de venturi. Plus cette longueur est grande, plus le taux d'entraînement est élevé.
- **La vitesse des gaz de combustion environnante** : l'équation (2) est en effet valable uniquement pour un jet pénétrant dans un gaz au repos. La vitesse du gaz environnant peut augmenter ou diminuer le taux d'entraînement selon sa direction.
- **La géométrie environnante des jets** : les jets étant rapprochés les uns des autres, ils vont nécessairement s'influencer. Il en va de même pour le déflecteur et le tube du brûleur.

L'influence de ces différents facteurs est analysée plus en détail dans à l'aide des simulations présentées au chapitre 3.

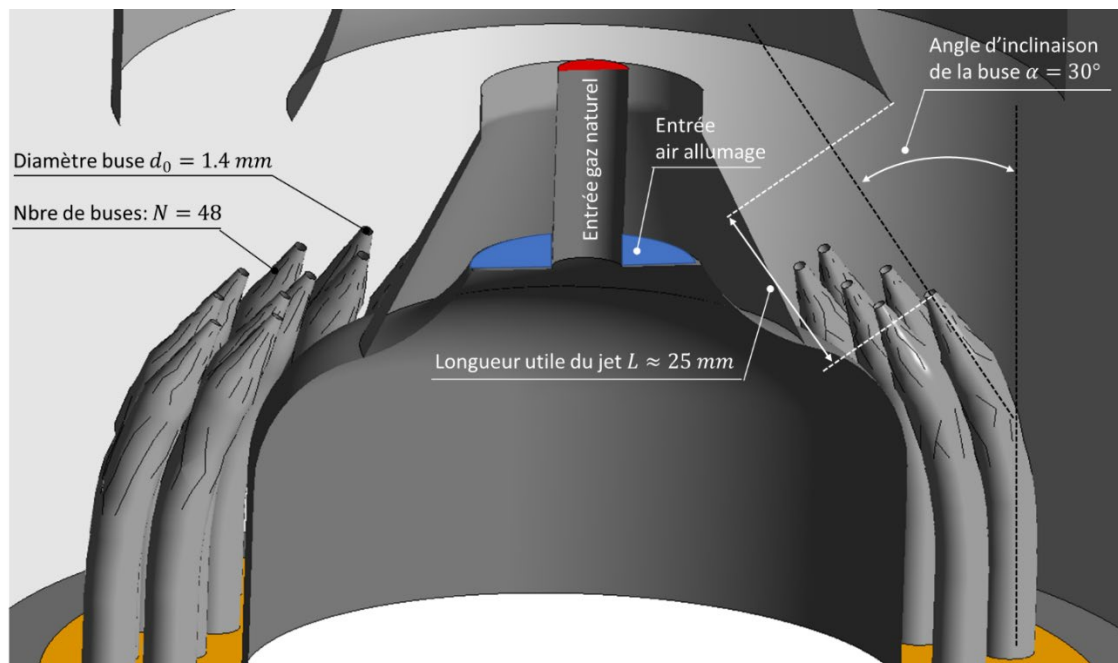


Figure 9: Principaux paramètres influençant le taux d'entraînement de gaz de combustion

Compte tenu du débit d'air présenté au Tableau 1, du nombre de buses et de leur diamètre, la vitesse d'entrée d'air peut être calculée. On obtient une vitesse d'entrée d'air de 103 m/s.

2.2 Zone II : combustion

La figure ci-dessous (Figure 10) présente les caractéristiques principales de la zone de combustion. Il s'agit pour l'essentiel d'un cylindre de hauteur $H = 197 \text{ mm}$ et de diamètre intérieur $D = 55 \text{ mm}$, évasé en partie basse pour faciliter l'entrée des gaz et ouvert en partie haute pour permettre le passage des gaz de combustion vers la zone d'échange de chaleur.

La géométrie de la chambre de combustion va principalement influencer le temps de résidence des gaz de combustion dans la zone chaude, avant qu'ils soient refroidis par échange de chaleur. Le temps de résidence va dépendre de la géométrie de la chambre de combustion, mais également de la température de celle-ci, ainsi que du taux de recirculation. Un temps de résidence de gaz > 0.5 secondes est généralement considéré comme nécessaire pour assurer une combustion complète.

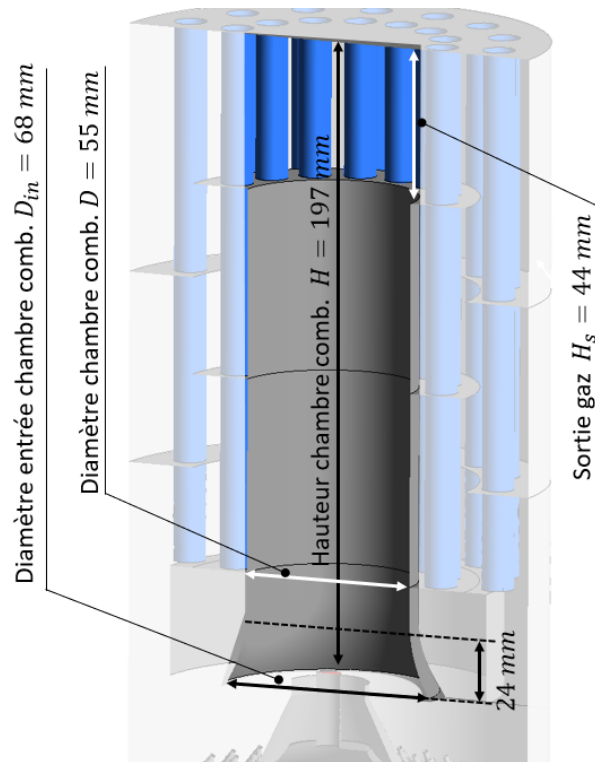


Figure 10: Principaux paramètres décrivant la chambre de combustion

2.3 Zone III : échangeur de chaleur

La figure ci-dessous (Figure 11) présente les caractéristiques principales de la zone d'échange de chaleur. Cette zone est constituée de 16 tubes en U, qui sont modélisés ici comme 32 tubes simples, pour simplifier la géométrie de calcul. Le but de ces tubes est de transférer la chaleur des produits de combustibles à l'hélium.

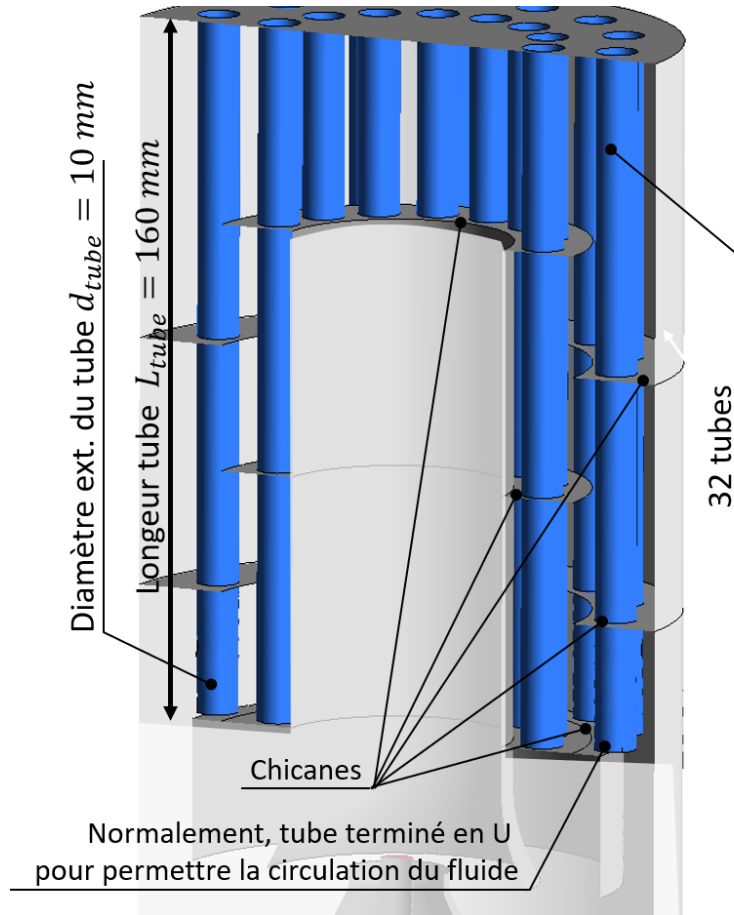


Figure 11: Echangeur de chaleur

La quantité de chaleur transmise par l'échangeur va dépendre de la différence de température entre les gaz de combustion et l'hélium (ΔT_{lm} le delta T logarithmique moyen), de la surface d'échange extérieure A_e (m^2) ainsi que du coefficient de transfert de chaleur global entre les deux fluides U ($\frac{W}{m^2 K}$).

$$P = U \cdot A_e \cdot \Delta T_{lm} \quad (3)$$

La valeur effective du coefficient de transfert de chaleur global dépend principalement de la résistance au transfert de chaleur la plus importante, qui est dans notre cas due au transfert de chaleur par convection côté gaz de combustion, caractérisé par le coefficient de convection α_e ($\frac{W}{m^2 K}$) entre les gaz de combustion et la paroi. Ce coefficient de convection va dépendre du fluide, via le nombre adimensionnel de Prandtl Pr et des conditions locales de l'écoulement, via le nombre de Reynolds Re .

La quantité de chaleur transférée par l'échangeur est donc principalement influencée par :

- La surface extérieure de l'échangeur A_e . Celle-ci peut être augmentée par l'addition d'ailettes thermiques, comme illustré par exemple sur la Figure 12.
- La turbulence de l'écoulement peut être augmentée en augmentant la vitesse du fluide, ou en perturbant l'écoulement, comme par exemple c'est le cas dans un échangeur type "shell and Tubes" (Figure 13).



Figure 12 : exemple d'ailettes thermiques longitudinales

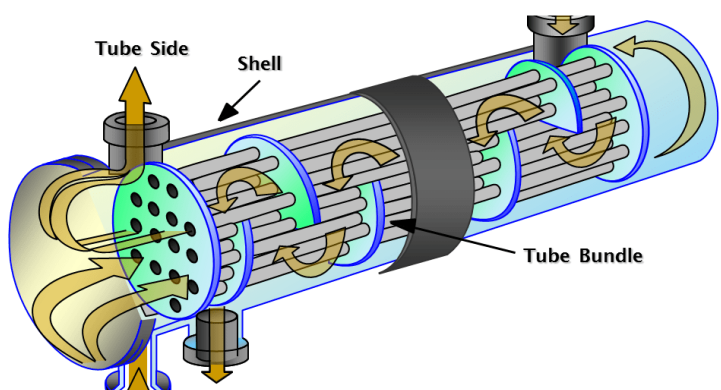


Figure 13: Echangeur type "shell and Tubes" (<https://arvengtraining.com/>)

Dans la configuration actuelle de l'échangeur, la surface d'échange extérieure A_e est d'environ 0.17 m^2 . Si l'on considère une différence de température moyenne de ΔT_{lm} de l'ordre de 400 à 500°K et une puissance de chauffage à transmettre par convection de $P = 4 \text{ kW}$, le coefficient d'échange à atteindre serait donc environ $\alpha_e = 50$ à $60 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$, ce qui est déjà assez conséquent. Plus la différence de température est réduite, plus le coefficient de convection doit être amélioré, comme on peut le voir sur la figure 14.

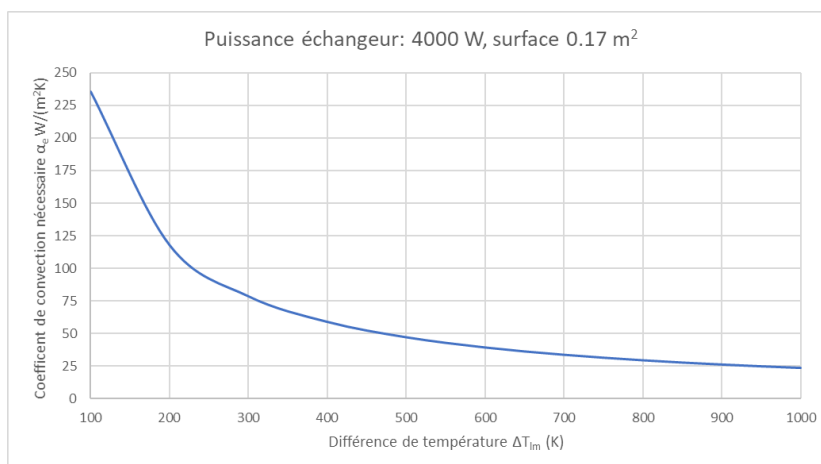


Figure 14 : coefficient de convection nécessaire pour un échange de 4 kW et une surface d'échange extérieure de 0.17 m^2

2.4 Paramètres de fonctionnement généraux

L'installation de cogénération étudiée peut produire de la chaleur à différents niveaux de température. Pour l'analyse présentée ici, le mode de fonctionnement retenu correspond à une production de chaleur à 50°C et température de retour à 40°C. Dans ces conditions, les tests effectués sur un prototype dans le laboratoire de la HEIG-VD ont montré les caractéristiques listées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1)

Tableau 1: point de fonctionnement du moteur Stirling

Grandeur	Valeur mesurée
Puissance gaz consommée (basée sur PCI) (kW)	7.15 kW
Puissance électrique produite (kW)	1.92 kW
Puissance thermique fournie (kW)	4.55 kW
Coefficient d'excès d'air global λ (-)	$\lambda = 1.3$
Débit de gaz naturel (Nm³/h)	0.695 Nm ³ /h
Débit d'air de combustion (Nm³/h)	8.72 Nm ³ /h
Température des tubes de chauffage Stirling	800 °C
Température de préchauffage de l'air de combustion	550 °C

Les figures 10 et 11 montrent que le cylindre du brûleur est entouré du banc de tubes servant à chauffer le gaz de travail du Stirling (échangeur A_E). Une partie de la chaleur de combustion chauffe le cylindre du brûleur, qui est transmise par rayonnement sur les tubes du Stirling. La chaleur convective transmise par les gaz chauds est donc inférieure à la chaleur dégagée par combustion.

Un bilan énergétique simplifié montre que 30 à 40% de la chaleur de combustion est transmise par rayonnement, la chaleur convective se situe autour de 4000 à 4500 W.

Cette analyse simplifiée permet d'évaluer les niveaux de températures qui s'établissent dans cet ensemble. La zone de combustion est portée à une température moyenne de 1200 et 1350°C, le cylindre du brûleur à environ 1000°C. Ces températures sont tracées à la Figure 15 en fonction du taux de recirculation K_v , avec la puissance de combustion (5 à 8 kW) comme paramètre.

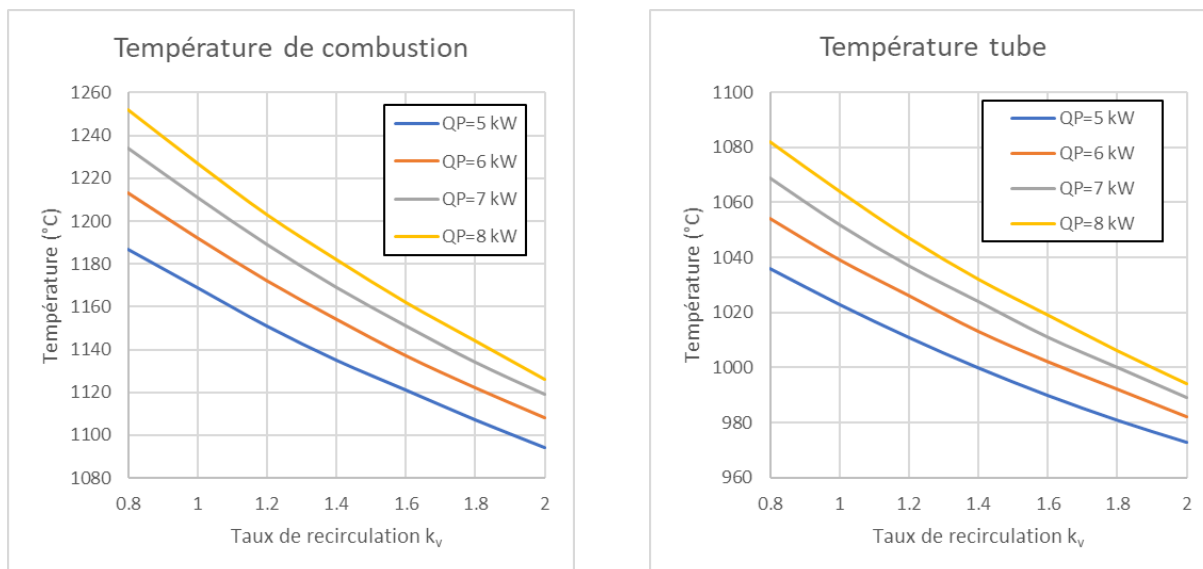


Figure 15 : Température estimées de combustion et du cylindre du brûleur en fonction du taux de recirculation, pour différentes puissances de combustion

Dans l'hypothèse d'un bon mélange des gaz et une uniformité de température dans l'ensemble du brûleur FLOX, peu de NO_x et de CO sont formés. Le tube cylindrique est porté à la limite de tenue pour un acier haute température.

Le coefficient d'échange de chaleur convectif de 50 à 60 W/(m²°C) ne peut être atteint qu'avec un écoulement turbulent du gaz de combustion. Des chicanes sont nécessaires pour atteindre ces performances thermiques.

3 Simulations CFD

Dans ce chapitre, les hypothèses principales concernant les simulations CFD sont d'abord brièvement présentées. Ensuite, les principaux résultats sont résumés. Le logiciel utilisé pour effectuer les simulations est Ansys Fluent 2020R2.

3.1 Hypothèses de base

Ce paragraphe résume les hypothèses principales retenues pour les simulations CFD : il s'agit des hypothèses concernant la géométrie de calcul, les modèles de calculs retenus, ainsi que les conditions aux limites.

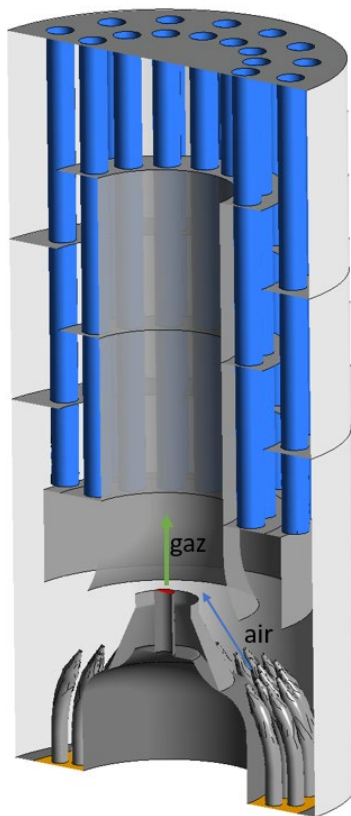
3.1.1 Géométrie de calcul

Deux géométries de base ont été utilisées : dans un cas, le brûleur complet a été modélisé, et dans l'autre cas, la symétrie axiale a été mise à profit pour réduire la taille de la géométrie de calcul. Dans le cas de la géométrie axisymétrique, il n'est pas possible de mettre en évidence d'éventuelles asymétries de l'écoulement, ou des instabilités, raison pour laquelle le domaine complet a été calculé.

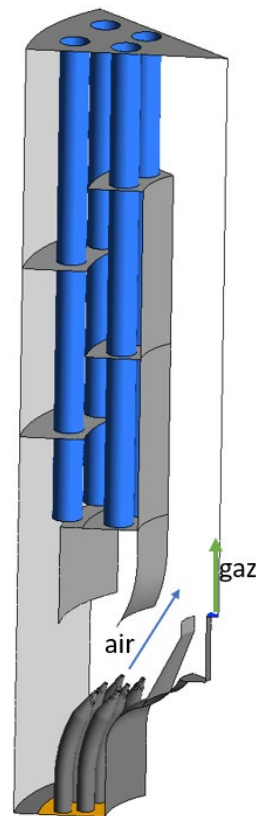
Seule la partie du brûleur où les gaz circulent a été modélisée. Les simplifications principales suivantes ont été faites :

- Toutes les tôles de faible épaisseur ont été considérées comme ayant une épaisseur nulle (chicanes, tube du brûleur, déflecteur)
- Les tubes de l'échangeur de chaleur ont été modélisés comme de simples cylindres, afin de réduire le nombre d'éléments de maillage
- Les chicanes annulaires

Les deux géométries de calcul utilisées sont représentées sur la figure ci-dessous.



Coupe modèle de calcul complet



Vue du modèle axisymétrique

Figure 16 Vue des deux géométries de calcul principales utilisées

3.1.2 Modèles de calcul

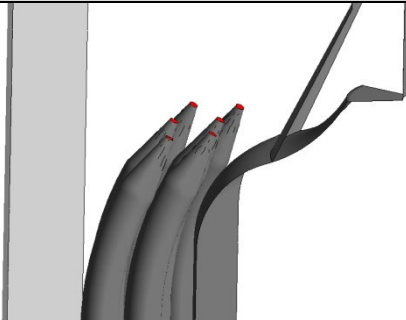
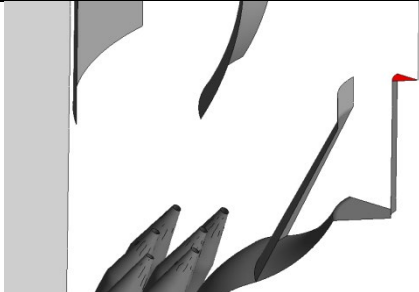
Dans ce paragraphe, les modèles de calcul retenus sont brièvement résumés.

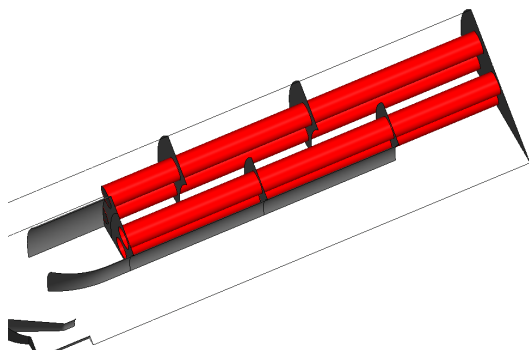
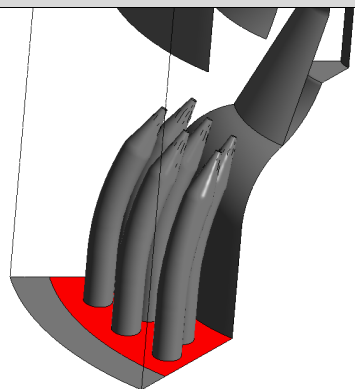
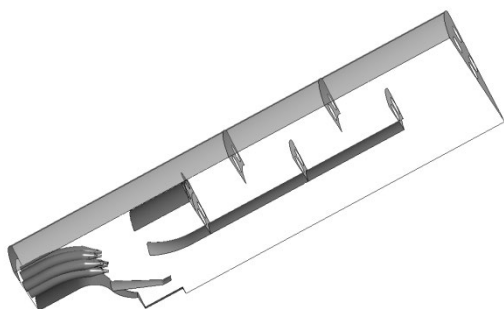
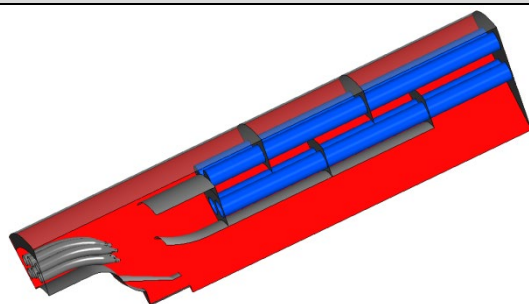
- **Calcul stationnaire** : Le brûleur est simulé en mode stationnaire, ce qui suppose que l'écoulement dans le brûleur est stable. C'est une limitation importante, mais nécessaire étant donné le temps à disposition pour les simulations ;
- **Modèle de turbulence SST k-omega** : il s'agit du modèle de turbulence le plus utilisé actuellement pour des applications de simulations concrètes ;
- **Transfert de chaleur activé** ;
- **Modèle de combustion : Eddy.dissipation** : Il s'agit d'un modèle de combustion du type « mixed is burnt ». Ce type de modèle est conseillé pour une première approche de la modélisation de la combustion FLOX (Wünning, n.d.). Pour une modélisation plus détaillée, un modèle de combustion tenant compte de la cinétique des réactions est conseillé, comme par exemple le modèle Eddy Dissipation Concept (EDC).
- **Fluide composé d'un mélange de gaz O_2 , CH_4 , CO_2 , H_2 , H_2O et N_2** : Etant donné que le modèle de combustion est du type « mixed is burnt », l'addition de gaz supplémentaires dans la simulation n'est pas nécessaire. Pour connaître la concentration de CO , et d'autres polluants, il serait nécessaire de considérer un modèle de combustion du type EDC, ce qui dépasse le cadre de cette étude.
- **Rayonnement** : pour les simulations réalisées ici, le rayonnement n'a pas été considéré, ce qui est une limitation importante qui a dû être faite pour des raisons de temps de calcul, et car l'accent a plutôt été mis sur l'étude de la zone de recirculation qui ne nécessite pas une description très précise de la répartition de température dans le brûleur ;

3.1.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites principales sont présentées ci-dessous (Tableau 2) pour le cas du modèle avec symétrie axiale. Les mêmes conditions sont appliquées pour le modèle de calcul complet.

Tableau 2: Conditions aux limites appliquées pour les simulations. En rouge sur chaque image, la zone pour laquelle la condition est fixée

<i>Entrée d'air</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> • Débit massique total : 0.003117 [kg/s], à diviser par le nombre d'entrées d'air de la simulation. • Turbulence : Intensité de 15% et rapport de viscosité de 10 à l'entrée d'air • Température d'entrée : 550 [°C] • Composition massique: 23% O_2, 77% N_2
<i>Entrée de gaz</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> • Débit massique total : 0.0001382 [kg/s] • Turbulence : Intensité de 5% et rapport de viscosité de 10 à l'entrée de gaz • Température d'entrée : 20 [°C] • Composition massique: 100% CH_4

<i>Echangeur de chaleur</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> Chaleur extraite, uniformément répartie sur la surface de l'échangeur : 4 [kW]
<i>Sortie</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> Sortie de type pression, avec pression absolue de 0 [Pa]
<i>Parois</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> Parois adiabatiques
<i>Symétrie</i>	
	<ul style="list-style-type: none"> Dans le cas du modèle axisymétrique, condition de symétrie sur les deux surfaces du modèle

3.2 Simulation de l'état actuel

Des simulations de la géométrie complète ont été réalisées, sans symétrie axiale. Comme le montre l'historique des résidus de calcul (Figure 17), la solution ne converge pas entièrement, ce qui peut s'expliquer par une mauvaise qualité de maillage, des conditions aux limites fausses ou un problème instationnaire. La qualité du maillage étant suffisante selon les critères de Fluent, et le problème convergeant pour d'autres géométries, c'est le caractère instationnaire de l'écoulement qui est la cause la plus probable de ce manque de convergence.

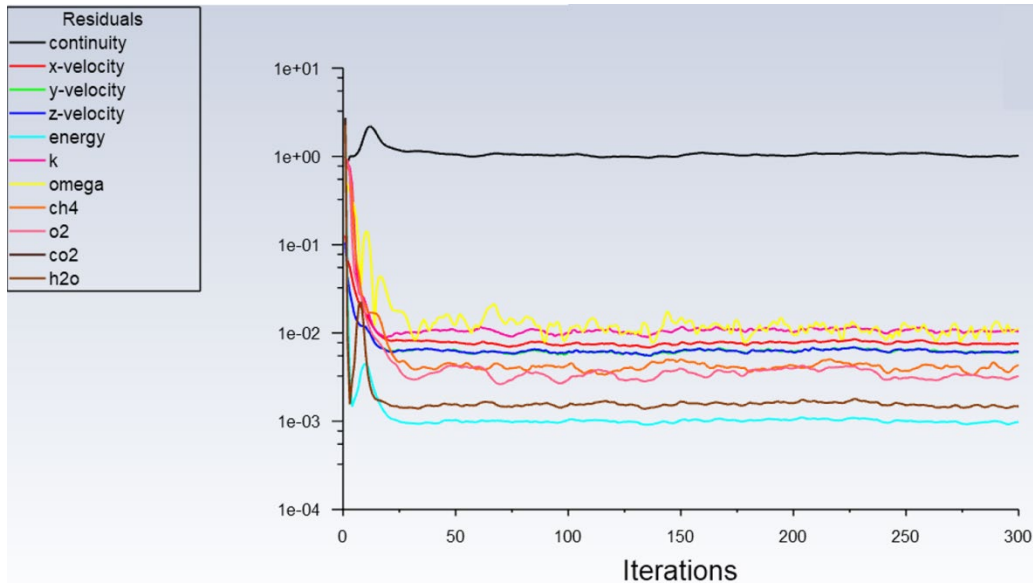
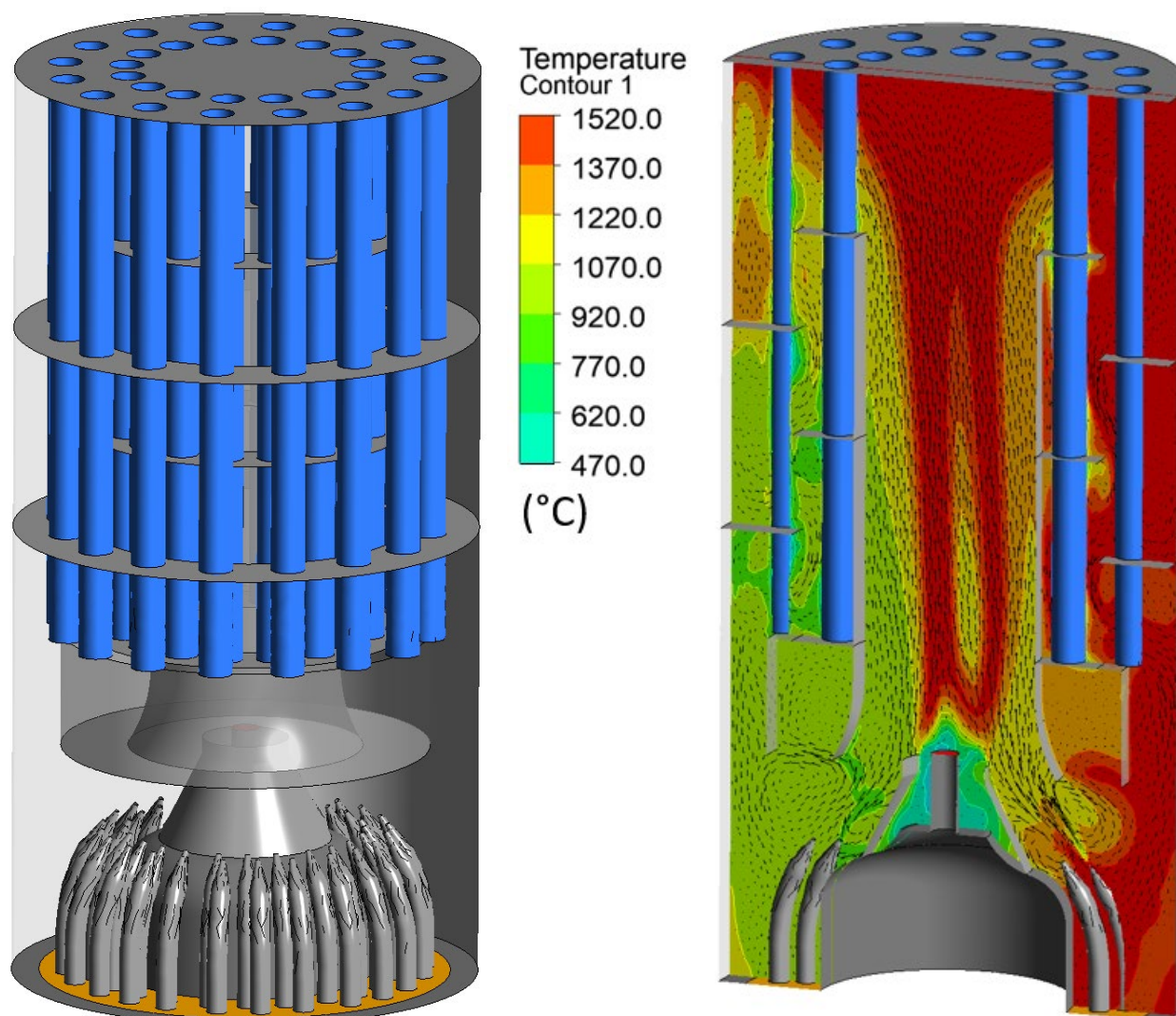


Figure 17: historique des résidus de calcul, géométrie complète

La figure suivante montre les résultats de simulation après 300 itérations. Ces résultats ne représentent pas nécessairement une situation réelle, le calcul n'ayant pas suffisamment convergé. Cependant, ils permettent de visualiser les instabilités probablement à l'origine de la non-convergence : il s'agit d'instabilités dans l'écoulement, qui génèrent un écoulement asymétrique, avec de grandes différences de température d'un côté à l'autre du brûleur. Les raisons de cette instabilité d'écoulement mettent en évidence les difficultés des essais constatés sur prototypes.

Le taux de recirculation calculé dans cette situation est de $K_v = 88\%$. Ce taux de recirculation est nettement insuffisant pour que le brûleur fonctionne en mode FLOX.

La vitesse moyenne dans le brûleur est de 12.3 m/s, pour une température moyenne de 1330 °C. Cela correspond donc à un temps de résidence de 0.16 secondes, si l'on considère un seul passage dans le brûleur.



Géométrie de calcul

Coupe montrant la répartition de température

Figure 18 : résultats géométrie complète, Température et vecteurs vitesse

3.3 Simulation de l'état actuel : inclinaison des buses de 5°

Afin d'améliorer la stabilité des résultats, l'effet de l'ajout d'un tourbillon dans la chambre de combustion a été étudié. Pour générer ce tourbillon, les buses ont été inclinées de 5° tangentiellement. La convergence des résultats est là aussi insuffisante. On voit cependant sur les résultats après 300 itérations que l'asymétrie de l'écoulement est plus faible. Cela semble indiquer que la génération d'un tourbillon central a un effet stabilisateur sur l'écoulement.

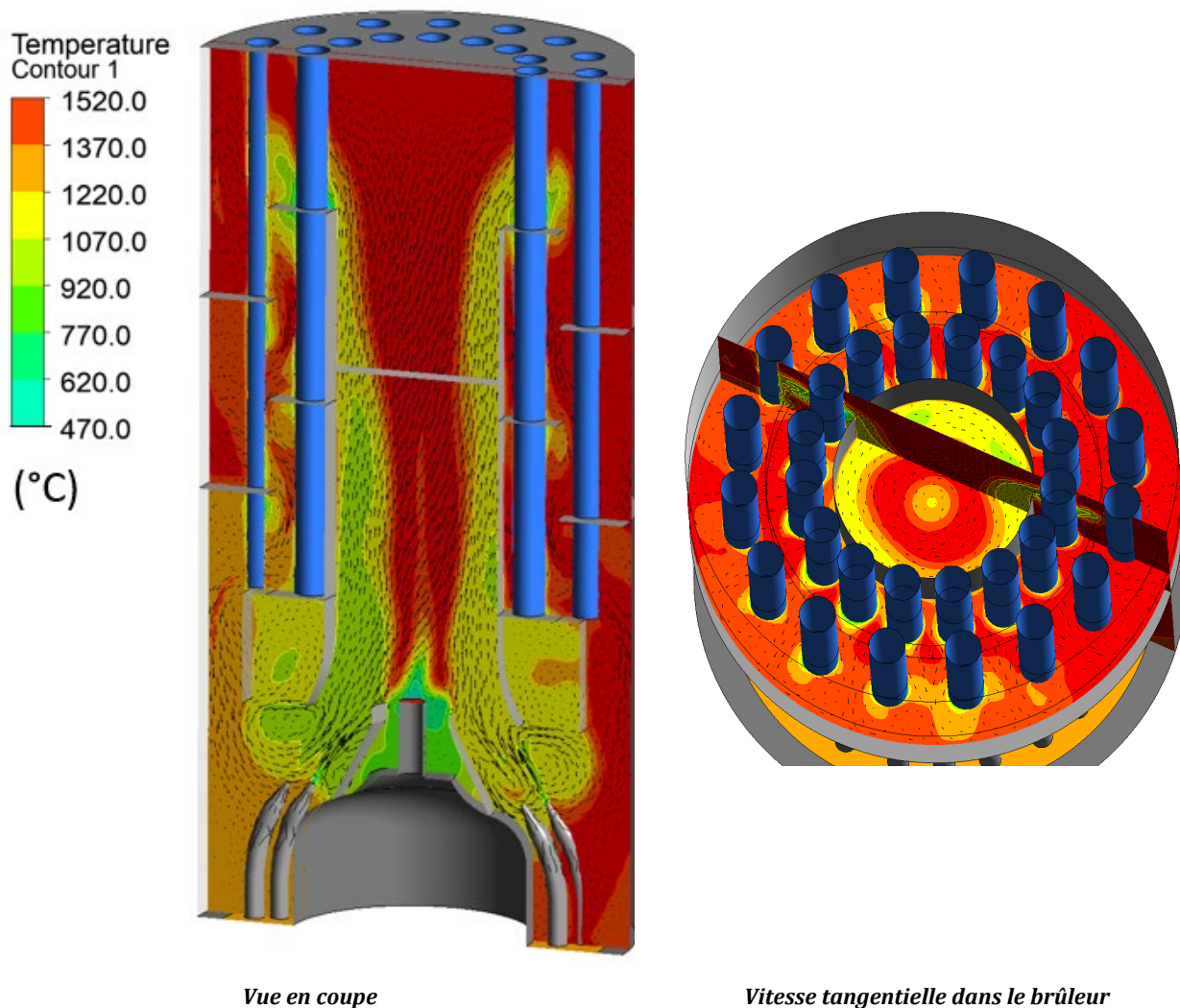


Figure 19 : résultats géométrie complète, avec tourbillon central

Le taux de recirculation calculé dans cette situation est de $K_v = 80\%$. Ce taux de recirculation est nettement insuffisant pour que le brûleur fonctionne de manière stable en mode FLOX.

3.4 Influence de l'échangeur de chaleur

Les deux cas précédents ont montré que mis à part les problèmes de stabilité, les taux de recirculation calculés sont très faibles. Une hypothèse pour expliquer ces taux de recirculations faibles est liée aux pertes de charges de l'échangeur de chaleur, ainsi qu'à l'écoulement perturbé proche des buses d'air. Pour ce faire, une simulation avec l'échange de chaleur se faisant uniquement sur la surface extérieure a été réalisée. Comme pour les simulations précédentes, la stabilité des résultats laisse à désirer, ce qui se manifeste par l'asymétrie des résultats en termes d'écoulement (Figure 20). On constate cependant que la température dans le brûleur est bien inférieure aux deux cas précédents, et cela pour les mêmes conditions aux limites. Cela s'explique par le taux de recirculation beaucoup plus élevé de $K_v = 305\%$.

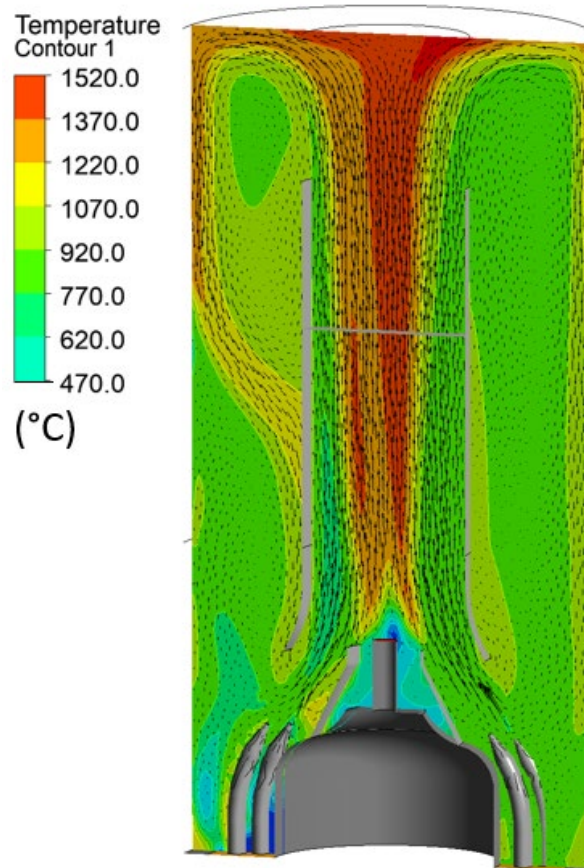


Figure 20 : résultats géométrie complète, échange de chaleur uniquement sur le côté

Le taux de recirculation ayant un rôle prépondérant sur le fonctionnement du brûleur en mode FLOX (voir Figure 2), il est indispensable d'accroître ce taux de recirculation. Or il y a un énorme écart de taux de recirculation entre la variante de base qui a un taux de recirculation calculé de $K_v = 88\%$ et la variante sans échangeur, qui a un taux de recirculation calculé de $K_v = 305\%$. Pour comprendre cette différence de taux de recirculation, les champs de vitesse proche des buses d'air des deux variantes ont été comparés (Figure 21).

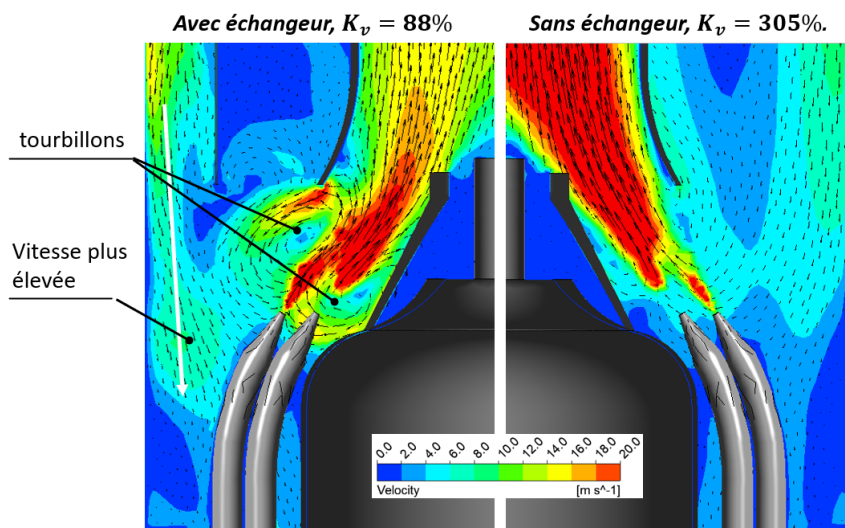
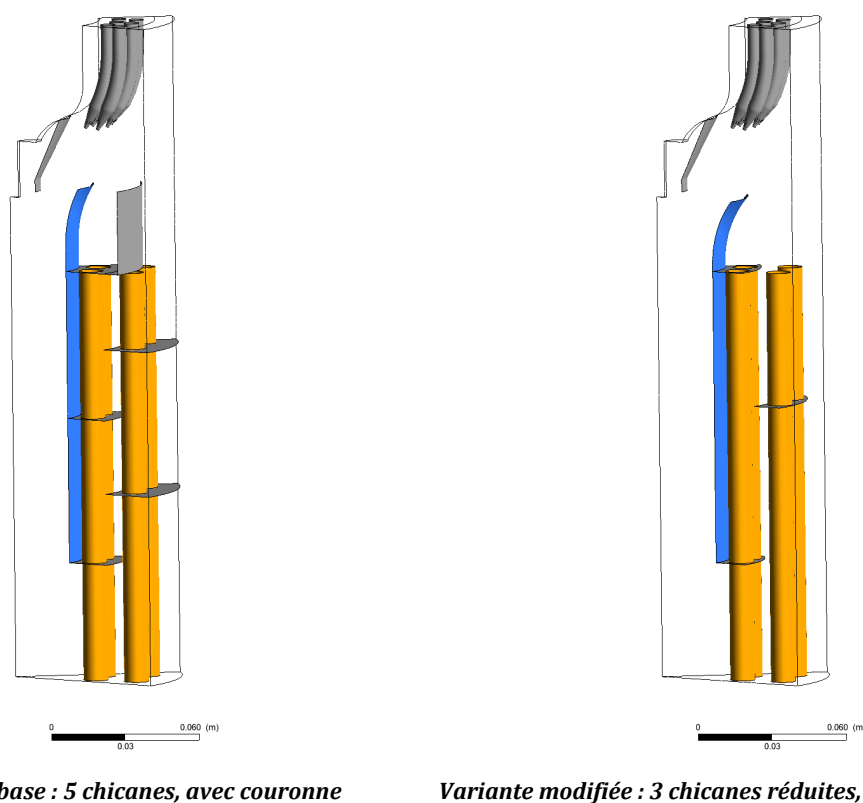


Figure 21 : comparaison du champ de vitesse, cas avec taux de recirculation de 88% et avec taux de recirculation de 305%

On voit que dans le cas avec échangeurs, deux tourbillons se développent à l'abord des jets d'air neuf. Ces tourbillons piègent des gaz de combustion et limite le pouvoir d'entraînement des jets d'air neuf. De plus, la présence de l'échangeur et de la couronne engendre une composante de vitesse vers la sortie plus élevée que dans le cas sans échangeur. Dans le cas sans échangeur, l'écoulement à l'abord des jets d'air neuf et plus proche d'un écoulement au repos similaire à celui utilisé pour le développement de la corrélation présentée à l'équation (2). Il serait donc favorable de modifier la géométrie de l'échangeur de manière à rendre l'écoulement proche des buses d'air le plus lent possible. Cela peut par exemple être atteint en réduisant le nombre de chicanes, et en supprimant la couronne présente au sommet de l'échangeur (Figure 22).



Variante de base : 5 chicanes, avec couronne

Variante modifiée : 3 chicanes réduites, sans couronne

Figure 22: Présentation de la géométrie de l'échangeur de base, ainsi que de celle modifiée

Si l'on observe l'évolution de la pression totale dans le brûleur pour la variante de base et pour celle avec chicanes réduites, on constate que pour la variante de base, les pertes de charge dans l'échangeur sont beaucoup plus importantes, et qu'il y a comme un « blocage » à l'entrée du brûleur. Cela se traduit aussi en termes de taux de recirculation, qui est environ 3 fois plus élevé dans la variante avec chicanes réduites par rapport à la variante de base. Il faut cependant noter ici que la réduction du nombre de chicanes peut péjorer le transfert de chaleur avec les tubes de l'échangeur. Cela n'est cependant pas considéré dans ces simulations, car le transfert de chaleur est imposé à la paroi des tubes de l'échangeur. Des simulations plus détaillées de l'échangeur de chaleur devraient être faites pour s'assurer que le transfert de chaleur est toujours suffisant. Le cas échéant, il faudrait envisager d'accroître la surface d'échange, par exemple en ajoutant des ailettes verticales aux tubes des échangeurs. L'optimisation de l'échangeur dépasse cependant le cadre de cette étude.

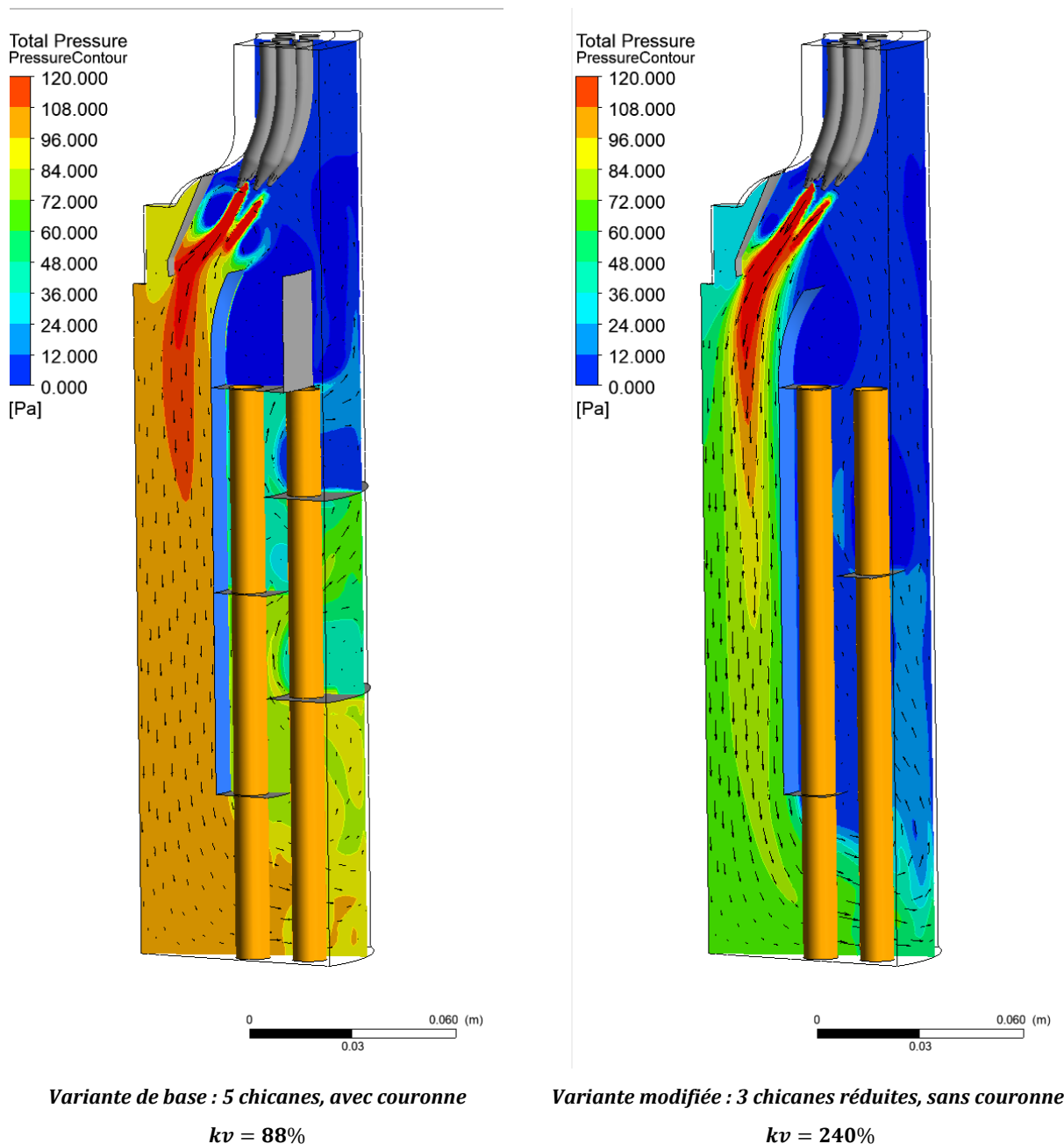


Figure 23: Evolution de la pression totale dans le brûleur

3.5 Influence des diamètres de buses d'air de combustion

Selon les rappels du chapitre 1, et plus spécialement l'équation (2), le débit d'air entraîné est inversement proportionnel au diamètre de sortie de la buse d'air de combustion. Afin de vérifier si cela est vérifié dans les simulations, le taux de recirculation a été calculé pour différents diamètres de sortie de buse. La figure suivante montre les champs de vitesse calculés pour 3 diamètres de buses différents. On y constate la grande influence du diamètre sur le champ de vitesse, et donc sur le taux de recirculation.

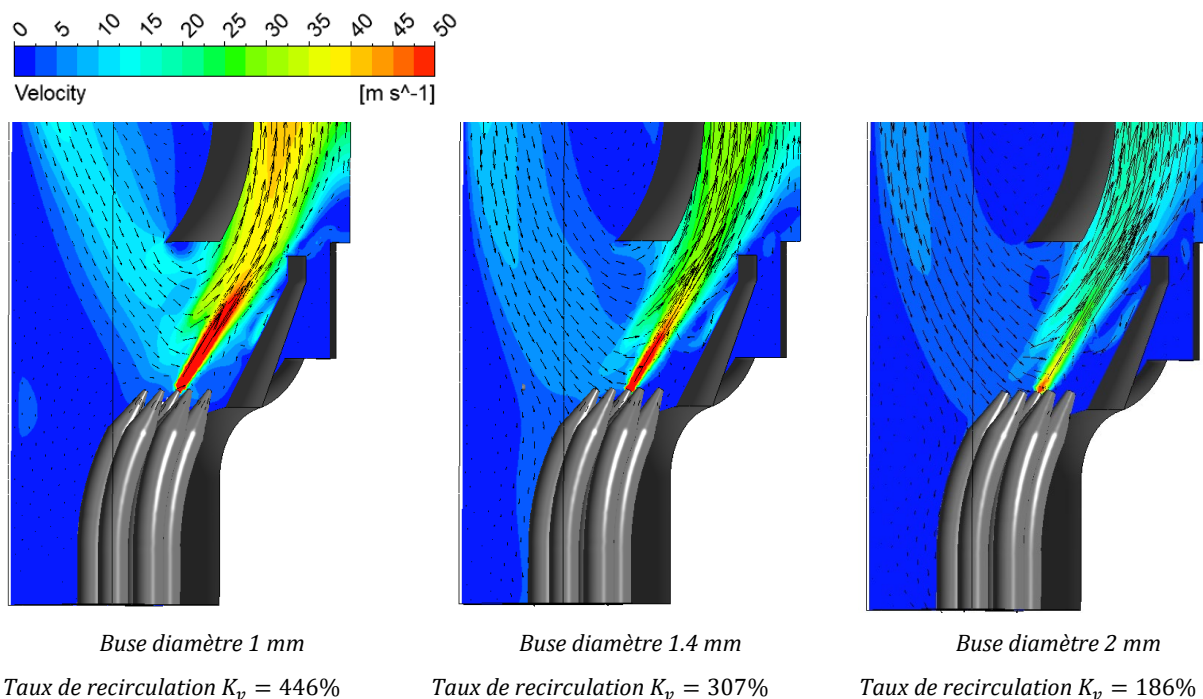


Figure 24 : effet du diamètre de sortie sur le champ de vitesse ainsi que sur le taux de recirculation, configuration sans tubes d'échangeur

La figure suivante compare les valeurs de recirculation obtenues par simulation à celles prédites par l'équation (2) pour une longueur de jet de 25 mm (longueur du jet utile selon Figure 9).

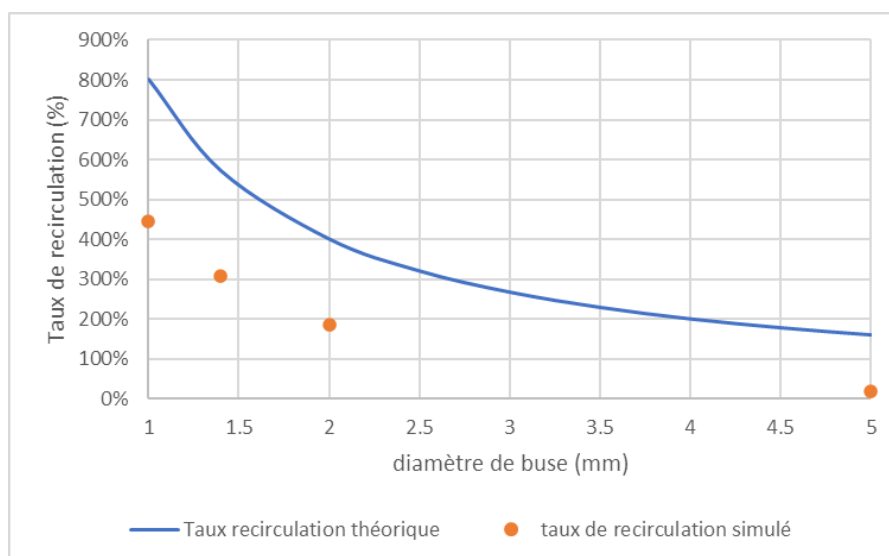


Figure 25 : taux de recirculation obtenu par simulation, comparé au taux de recirculation calculé avec l'équation (2) à une distance de 25mm de la sortie du jet

On constate que les valeurs simulées de recirculation sont également inversement proportionnelles au diamètre de buse, mais avec un taux de recirculation environ 2 fois moins important. Cette différence s'explique par le fait que dans le brûleur, les jets sont agencés selon deux couronnes concentriques, et qu'ils sont très proches les uns des autres, ce qui explique la diminution de débit entraîné.

3.6 Influence de la longueur du brûleur

Selon les rappels du chapitre 1, et plus spécialement l'équation (2), le débit d'air entraîné est proportionnel à la longueur du jet. Afin d'analyser l'effet de la distance entre le tube du brûleur et la sortie des jets d'air, deux situations ont été comparées : l'une avec le cylindre du brûleur de base, et l'autre avec un cylindre de brûleur raccourci.

La comparaison de ces deux variantes (Figure 26) montre peu d'influence de la longueur du tube du brûleur sur l'écoulement et sur le taux de recirculation. Cela s'explique par la largeur du tube du brûleur, ainsi que son évasement à l'entrée du brûleur, qui ont pour conséquence que la longueur utile des jets d'air est probablement supérieure aux 25 mm considérés au paragraphe précédent (longueur du jet utile selon Figure 9).

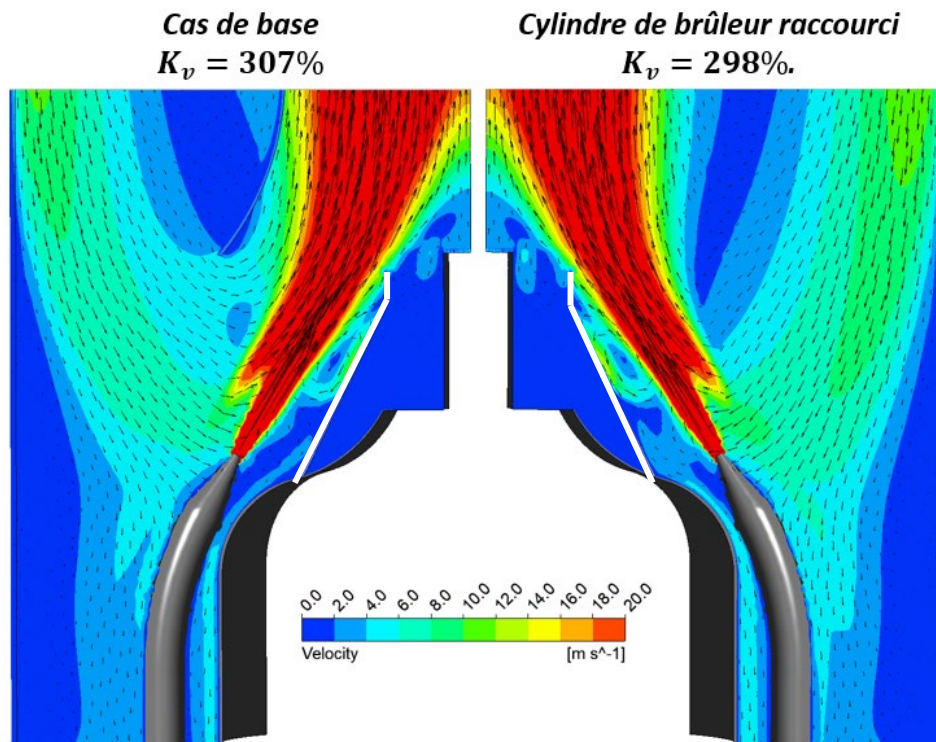


Figure 26 : effet de la longueur du brûleur sur le champ de vitesse ainsi que sur le taux de recirculation

3.7 Influence de la forme du déflecteur

Autour de la sortie de gaz naturel se trouve un déflecteur, qui sert entre autres à protéger l'entrée d'air utilisée lors de l'allumage du brûleur. Pour voir l'effet de ce déflecteur sur le taux de recirculation, deux géométries ont été comparées : un déflecteur conique, et un déflecteur cylindrique.

La comparaison des deux variantes (Figure 27) montre qu'avec le déflecteur cylindrique, un tourbillon se forme entre le jet d'air et la sortie de gaz. Ce tourbillon diminue le taux de recirculation, et pousse légèrement vers l'extérieur les jets d'air. La forme de base semble donc bien adaptée pour garantir un taux de recirculation élevé.

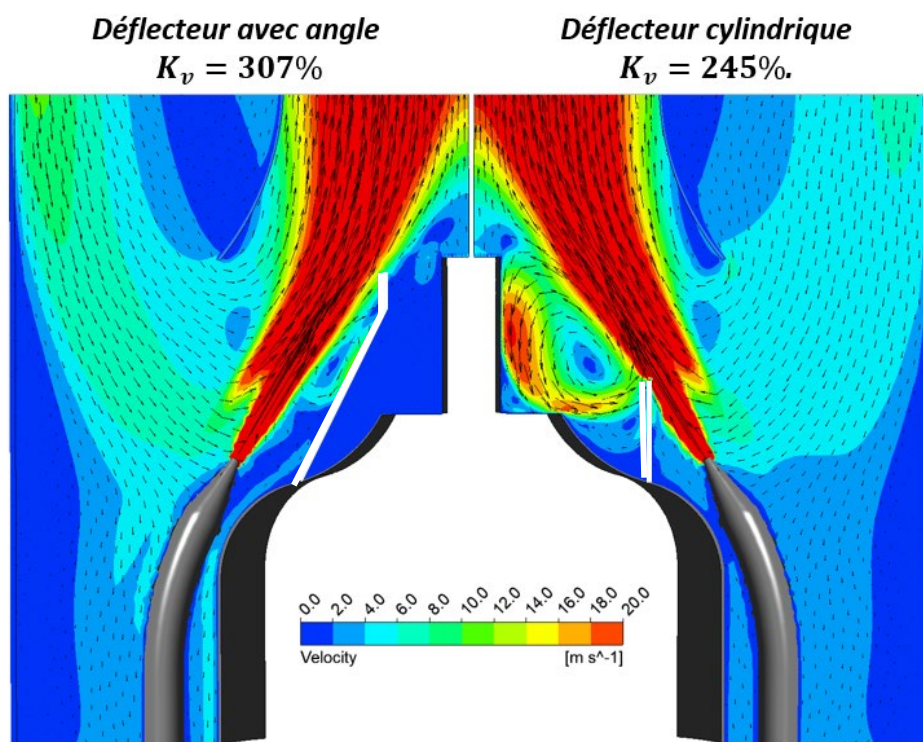


Figure 27: Effet de la forme du déflecteur sur le champ de vitesse et le taux de recirculation

4 Conclusions/recommandations

Des simulations de dynamique des fluides ont été réalisées pour comprendre l'écoulement au sein du brûleur FLOX utilisé par la société Rudolf Schmid SA pour son moteur Stirling. En préambule à ces simulations, une étude bibliographique concernant les brûleurs FLOX a été réalisée.

Cette étude bibliographique a permis de mettre en évidence l'un des paramètres clés influençant le fonctionnement de ce type de brûleur : le taux de recirculation. Celui-ci doit être suffisamment élevé pour permettre un fonctionnement en mode FLOX stable (>250%).

Cette étude bibliographique a également montré que ce sont les jets d'air frais, qui rentrent dans le brûleur avec une quantité de mouvement importante, qui sont responsables de l'entraînement des gaz de combustion. Plus la quantité de mouvement initiale du jet d'air est élevée, plus l'entraînement des gaz est élevé.

Il a également été montré que le design de l'écoulement côté gaz de combustion joue un rôle important sur l'efficacité globale de l'échangeur : un coefficient de convection élevé permet de transférer la même quantité de chaleur avec une différence de température plus faible.

Les simulations effectuées ont montré que dans les conditions simulées, l'écoulement dans le brûleur est instationnaire, avec des perturbations de l'écoulement, qui mènent à des asymétries de température dans le brûleur. Le taux de recirculation calculé dans la variante de base est de $K_v = 88\%$, ce qui est faible et ne permet pas d'atteindre une combustion FLOX stable (voir graphique de la Figure 2). Le corollaire de ce taux de recirculation faible est une température élevée dans la chambre de combustion, qui n'est pas compatible avec la résistance des matériaux.

L'introduction d'un mouvement de rotation dans le brûleur, par exemple en inclinant les amenées d'air diminue les asymétries de l'écoulement dans le brûleur, mais ne permet pas d'augmenter le taux de recirculation.

Le taux de recirculation est principalement affecté par la vitesse de sortie d'air des buses ainsi que de l'écoulement d'air autour des buses d'air. Le cas théorique ou l'échange de chaleur se ferait uniquement par les parois externes montre que des taux de recirculation supérieurs à 300% peuvent être atteints, et même 400% en diminuant la section des buses d'entrées d'air. Le design de l'échangeur de chaleur est donc primordial pour garantir un fonctionnement stable du brûleur.

Des simulations avec un échangeur de chaleur modifié, limitant les perturbations de l'écoulement ont montré **qu'il était possible d'augmenter significativement le taux de recirculation si l'on arrive à limiter les pertes de charge dans l'échangeur** et à réduire la vitesse des gaz à proximité des entrées d'air. En supprimant les chicanes d'écoulement de l'échangeur, le transfert de chaleur est diminué, ce qui risque de réduire les performances de l'ensemble. Les essais ont montré que 3 chicanes sont suffisantes et donnent de meilleurs résultats que 5 chicanes. Il s'avère qu'un compromis doit être recherché avec une solution avec écoulement moyennement stable (un taux de recirculation K_v intermédiaire) et une performance de l'échangeur de chaleur acceptable.

Les simulations effectuées confirment également que le taux de recirculation dépend fortement du diamètre de sortie des buses d'air : diminuer le diamètre à 1 mm permettrait d'augmenter le taux de recirculation de 50%. Cet effet n'a malheureusement pas pu être mis en évidence de manière significative lors des essais.

L'influence de la distance du cylindre du brûleur à la sortie du gaz naturel a également été étudiée. Celle-ci n'a que peu d'influence sur le taux de recirculation, car sa partie évasée est suffisamment large pour ne pas diminuer de manière significative la longueur utile des jets d'air.

La forme du déflecteur à la base du brûleur influence la quantité de gaz recirculés : un cylindre s'avère moins performant qu'un déflecteur conique.

La principale difficulté dans l'analyse des simulations effectuées est la difficulté de valider expérimentalement les résultats obtenus : en effet, les seules mesures expérimentales disponibles proviennent d'une sonde de température placée à un endroit de l'échangeur de chaleur. Il n'est donc pas possible de vérifier si les asymétries d'écoulement constatées sont réelles ou non. Il en va de même pour le contrôle du taux de recirculation calculé, qui ne peut pas être validé expérimentalement. Des essais ou un mouvement de rotation a été généré dans la chambre de combustion ont été faits, et **une amélioration de la stabilité a été constatée, ce qui semble converge avec les résultats des simulations.**

Pour améliorer les performances du brûleur, il semble primordial d'améliorer le taux de recirculation. L'amélioration de ce taux de recirculation passe par la modification de l'échangeur de chaleur : il faudrait qu'il perturbe le moins possible l'écoulement, tout en ayant une surface suffisante pour permettre un échange de chaleur adéquat. Pour améliorer le design de cet échangeur, des simulations plus poussées incluant l'écoulement de l'hélium seraient nécessaires. Ces simulations permettraient de comprendre et d'améliorer la géométrie de cet échangeur de chaleur.

5 Bibliographie

- Awbi, H.B., 2002. Ventilation of buildings. Routledge.
- Cheong, K.-P., Wang, G., Mi, J., Wang, B., Zhu, R., Ren, W., 2018. Premixed MILD Combustion of Propane in a Cylindrical Furnace with a Single Jet Burner: Combustion and Emission Characteristics. *Energy Fuels* 32, 8817–8829. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b01587>
- Heil, P., 2010. Untersuchung der flammlosen Verbrennung von Methan in einer Oxyfuel-Atmosphäre, 1. Aufl. ed. Sierke, Göttingen.
- Tu, Y., Su, K., Liu, H., Wang, Z., Xie, Y., Zheng, C., Li, W., 2017. MILD combustion of natural gas using low preheating temperature air in an industrial furnace. *Fuel Process. Technol.* 156, 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.024>
- Wünning, J.A., Wünning, J.G., 1997. Flameless oxidation to reduce thermal NO-formation. *Prog. Energy Combust. Sci.* 23, 81–94.
- Wünning, J.G., n.d. 5-Minute CFD of Flameless Oxidation 3.

Caractérisation d'un Stirling à résonance

Rapport de projet - AGP # 98914

Auteur

Tschumi Gabriel – Ing. HES Energie et Techniques Environnementales



Résumé

La production simultanée d'électricité et de chaleur (CCF) est la manière la plus efficace, d'un point de vue thermodynamique, d'exploiter l'exergie d'un combustible. La société Schmid AG a développé un groupe de cogénération basé sur un moteur Stirling d'un concept nouveau. Ce projet consiste à le caractériser en termes de puissances développées, efficacités, émission de bruit et gaz polluants.

Les essais réalisés en laboratoire ont permis d'établir une efficacité électrique, en sortie du Stirling, entre 25 et 27% et une efficacité globale comprise entre 81 et 94% en fonction des conditions de fonctionnement du réseau de chauffage. La mesure de la composition des effluents gazeux atteste de la conformité vis-à-vis de l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair).

Cette étude comporte également un volet projet pilote de test d'endurance du Stirling financé par le canton de Vaud et qui va permettre de suivre ses performances sur 2 ans.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. : +41 (0)24 557 76 00
Courriel : info@heig-vd.ch

Table des matières

1	Introduction	4
2	Banc d'essai et protocole de test	5
2.1	Banc d'essai et instrumentation	5
2.2	Variations paramétriques.....	6
2.2.1	Evaluation de la phase stationnaire.....	6
2.2.2	Conditions d'essais.....	7
2.3	Caractéristiques.....	8
2.4	Mesures des grandeurs électriques.....	9
2.5	Mesures des grandeurs thermiques.....	9
2.6	Pertes	11
2.6.1	Pertes par les fumées.....	11
2.6.2	Pertes par rayonnement et convection.....	12
2.7	Efficacités	12
2.7.1	Calculs des efficacités.....	12
2.8	Analyse des fumées de combustion.....	13
2.9	Mesures acoustiques	13
2.10	Pertes de charge	14
3	Résultats	15
3.1	Efficacités	15
3.1.1	Comparaison dans différentes conditions	15
3.1.2	Bilan complet.....	16
3.2	Puissances.....	17
3.3	Composition des fumées	18
3.3.1	Valeurs limites OPair.....	18
3.3.2	Résultats.....	18
3.4	Résultats des mesures acoustiques	19
3.5	Caractéristiques hydrauliques	19
4	Test d'endurance.....	20
4.1	Emplacement.....	20
4.2	Implantation.....	21
4.3	Instrumentations et suivi des performances.....	21
5	Conclusion.....	22
6	Annexes.....	23
6.1	Analyse du gaz naturel.....	23
6.2	Schéma de principe banc de test	25
6.3	Photo du banc de test.....	26
6.4	Pouvoir calorifique du gaz naturel	27
6.5	Efficacités sur la base du pouvoir calorifique supérieur	28

6.6	Compositions des fumées rapportées à 5% d'O ₂	28
6.7	Schéma de principe pour les tests d'endurance.....	29
6.8	Photos de l'implantation pour les tests d'endurance.....	30

Table des tableaux

Tableau 1	Conditions d'essai.....	7
Tableau 2	Grandeurs et symboles.....	8
Tableau 3	Valeurs limites de l'OPair pour le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azotes (NO _x)	18
Tableau 4	Pression et puissance acoustique du Stirling selon ISO 3746.....	19
Tableau 5	Caractéristiques hydraulique du circuit interne du Stirling.....	19
Tableau 6	Caractéristiques clés de la villa de la famille Wind.....	20

Table des illustrations/graphiques

Figure 1	Schéma de principe du banc de test en laboratoire.....	5
Figure 2	Evolution temporelle de l'efficacité électrique pour des températures d'eau de chauffage de 50°C/40°C.....	6
Figure 3	Mesure des condensats.....	11
Figure 4	Instrumentation du banc de test pour les mesures de puissance.....	12
Figure 5	Surface de référence et positions des microphones (ISO 3746, Figure C.3).....	13
Figure 6	Efficacités sur base du pouvoir calorifique inférieur et pour différentes conditions de fonctionnement.....	15
Figure 7	Pertes par chaleur sensible, latente et rayonnement/convection pour différentes conditions de fonctionnement.....	16
Figure 8	Comparaison d'un bilan complet à un bilan en phase stationnaire pour les conditions nominales.....	16
Figure 9	Puissances développées par le groupe de cogénération	17
Figure 10	Teneur en CO, NO _x et CH ₄ dans les fumées pour les différentes conditions d'essais	18
Figure 11	Emplacement du Stirling à Yverdon.....	20

1 Introduction

Produire simultanément de la chaleur et de l'électricité est la façon la plus efficace, au sens du 2^{ème} principe de la thermodynamique, d'exploiter le contenu énergétique d'un combustible. L'urgence climatique et la raréfaction de nos ressources imposent une utilisation efficiente de l'énergie. De plus, l'avènement des voitures électriques, la multiplication des pompes à chaleur, l'arrêt de l'électricité d'origine nucléaire et l'accroissement continue de la consommation électrique lié à l'informatique favorisent la production d'énergie électrique locale et si possible renouvelable.

En ce sens, la société Rudolf Schmid AG a développé un nouveau concept de moteur Stirling à résonnance, destiné au couplage chaleur-force (CCF). Le moteur est couplé à un brûleur FLOX® destiné à la combustion du gaz naturel. Leurs premiers essais montrent des performances nettement plus élevées que celles des moteurs Stirling à pistons libres connus, avec une efficacité électrique dépassant 25%.

Cette étude vise plusieurs objectifs :

- Evaluer les performances du CCF en termes d'efficacité électrique, thermique et globale dans différentes conditions de fonctionnement du réseau de chauffage ;
- Evaluer les émissions de gaz polluants (CO, NO_x, ...) et de bruit ;
- Mettre en place un essai d'endurance afin de suivre les performances sur une installation réelle pendant 2 saisons de chauffage.

2 Banc d'essai et protocole de test

2.1 Banc d'essai et instrumentation

La Figure 1 montre la configuration du banc de test. L'annexe 6.2 présente le schéma avec plus de détail. Il est constitué de :

- Un groupe hydraulique permettant de varier la température de retour vers le Stirling composé de :
 - o Un circulateur à variateur de fréquence (Grundfos Alpha2 25-60) et une vanne « STAD DN20 » permettant de contrôler précisément le débit ;
 - o Une vanne 3 voies (ESBE VRG130) permettant le mélange entre la température d'aller et de retour piloté par une sonde de température montée sur la conduite de retour ;
 - o Un compteur de chaleur GWF Multical 403 pour déterminer la puissance thermique effective fournie ;
 - o Deux piquages aux bornes du Stirling pour la mesure de la perte de charge du circuit interne.
- Un accumulateur de chaleur de 11'000L permettant de stocker la chaleur produite ;
- Pour le gaz naturel :
 - o Un cadre composé de 12 bouteilles à 200 bars avec certificat de composition (voir Annexe 6.1) ;
 - o Un détendeur double étage Air liquide HBS.V 200-1-2 pour la détente jusqu'à 50 mbar ;
 - o Un régulateur de pression Kromschroder GDJ15 pour stabiliser la pression aval à 20 mbar ;
 - o Un compteur de gaz à soufflet GWF E-BGZ BK-G4 V2 DN50 pour la détermination du débit volumique de gaz naturel ;
 - o Un manomètre Kromschroder KFM 60 RB 63 et un thermocouple type K fixé sur la conduite pour la correction du volume de gaz dans les conditions normales pression-température.
- Pour les fumées :
 - o Un analyseur de gaz MRU/Varioplus Industrial pour la mesure de la composition (NO_x , CO , CO_2 , CH_4 , O_2) et la température des gaz de fumées.
- Pour l'électricité :
 - o Les caractéristiques courant, tension et $\cos\phi$ à l'entrée et en sortie de l'armoire de commande sont mesurés par un EMU 1/40 ;
- Pour l'air ambiant :
 - o La température est mesurée par une sonde Pt1000 durant toute la durée d'essai ;
 - o L'humidité est mesurée 1 fois au début de l'essai.
- Les condensats en sortie du Stirling sont récoltés dans un récipient fermé posé sur une balance afin de déterminer la masse d'eau produite pour le calcul des pertes par chaleur latente.

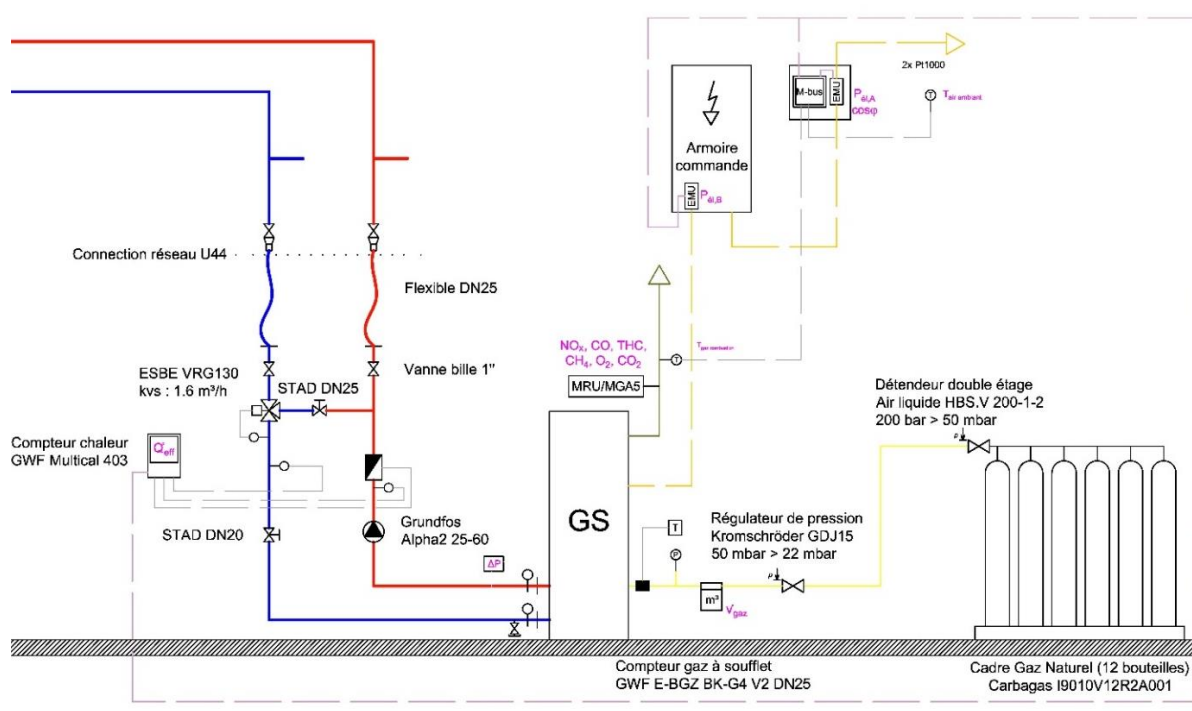


Figure 1 Schéma de principe du banc de test en laboratoire

2.2 Variations paramétriques

2.2.1 Evaluation de la phase stationnaire

La Figure 2 montre l'évolution temporelle de l'efficacité électrique. On observe qu'après trois heures de fonctionnement du moteur, l'efficacité électrique atteint 99% de sa valeur maximale. La machine est considérée stable après 3h de fonctionnement.

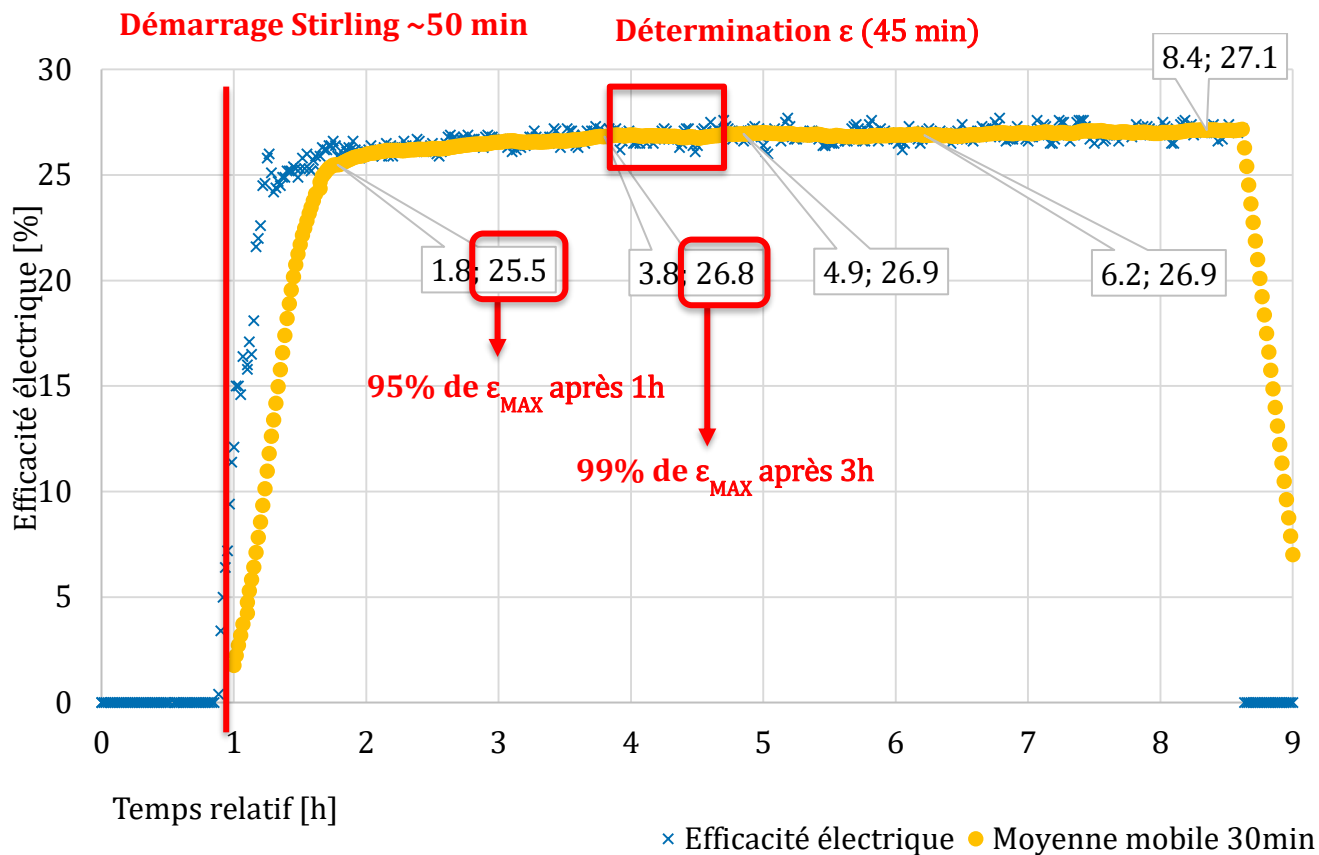


Figure 2 Evolution temporelle de l'efficacité électrique pour des températures d'eau de chauffage de 50°C/40°C

Les résultats sont donc donnés sur la base d'une moyenne sur 45 min après trois heures de fonctionnement.

Un bilan sur une plus longue période (8h) est aussi prévu pour les conditions nominales (50°C, aller/40°C, retour) dans le but déterminer les performances du Stirling avec les phases de démarrage et d'arrêt.

2.2.2 Conditions d'essais

Les grandeurs caractérisées dans le §2.3 sont quantifiées après stabilisation de la machine, c'est-à-dire, lorsque les températures internes sont suffisamment élevées, soit après au moins 2h de fonctionnement du brûleur (voir §2.2.1). Pour les conditions nominales, un bilan global est réalisé sur une période de 8h en incluant les phases de démarrage et d'arrêt.

Seules les températures d'aller et de retour aux bornes de la machine sont variées. Elles le sont selon le Tableau 1.

Tableau 1 Conditions d'essai

N° de l'essai	Niveau de puissance	Températures aller/retour	Durée essai	Durée plage mesure
1	Pleine charge	50°C/40°C (conditions nominales)	8h & 45 min *	8h
2	Pleine charge	40°C/30°C	3h	45 min
3	Pleine charge	60°C/50°C	3h	45 min
4	Pleine charge	65°C/50°C	3h	45 min
5	Charge partielle (60% pleine charge)	50°C/40°C	3h	45 min
6	Pleine charge	65°C/50°C **	3h	45 min

* : Durant l'essai de 8h, durant la dernière heure de fonctionnement stationnaire, un relevé de type essai stationnaire est réalisé.

** : Le réseau hydraulique interne est modifié pour que l'eau de retour (50°C) passe en premier lieu dans l'échangeur avec les gaz de fumées.

Les essais en régime stationnaire sont réalisés sur une période d'au minimum 45 min, et relevés de manière identique pour tous les tests stationnaires.

2.3 Caractéristiques

Tableau 2 Grandeurs et symboles

Grandeur caractérisée	Symbole et unité
Température des fumées	T_{gc} [$^{\circ}\text{C}$]
Enthalpie massique des fumées	h_{gc} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
Température de l'air ambiant	T_{atm} [$^{\circ}\text{C}$]
Pression atmosphérique	p_{atm} [Pa]
Enthalpie massique de l'air ambiant	h_{atm} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
Humidité relative de l'air ambiant	w_{atm} [%]
Masse des condensats en sortie de Stirling	M_c [kg]
Tension électrique après l'armoire de commande	$U_{\text{él},A}$ [V]
Courant électrique après l'armoire de commande	$I_{\text{él},A}$ [A]
Puissance électrique après l'armoire de commande	$P_{\text{él},A}$ [kW]
Déphasage courant-tension après l'armoire de commande	$\cos\varphi_A$ [—]
Tension électrique avant l'armoire de commande	$U_{\text{él},B}$ [V]
Courant électrique avant l'armoire de commande	$I_{\text{él},B}$ [A]
Puissance électrique active avant l'armoire de commande	$P_{\text{él},B}$ [kW]
Déphasage courant-tension avant l'armoire de commande	$\cos\varphi_B$ [—]
Puissance thermique effective fournie	\dot{Q}_{eff} [kW]
Puissance thermique absorbée sur la base du pouvoir énergétique inférieur	\dot{Q}_{H_i} [kW]
Puissance thermique absorbée sur la base du pouvoir énergétique supérieur	\dot{Q}_{H_s} [kW]
Pertes par chaleur sensible dans les fumées	$\dot{Q}_{G,S}$ [kW]
Pertes par chaleur latente dans les fumées	$\dot{Q}_{G,L}$ [kW]
Pertes par rayonnement, convection	$\dot{Q}_{ray,cv}$ [kW]
Efficacité électrique après armoire de commande, sur base H_i	$\varepsilon_{\text{él},A,H_i}$ [—]
Efficacité électrique après armoire de commande, sur base H_s	$\varepsilon_{\text{él},A,H_s}$ [—]
Efficacité électrique avant armoire de commande, sur base H_i	$\varepsilon_{\text{él},B,H_i}$ [—]
Efficacité électrique avant armoire de commande, sur base H_s	$\varepsilon_{\text{él},B,H_s}$ [—]
Efficacité thermique, sur base H_i	ε_{th,H_i} [—]
Efficacité thermique, sur base H_s	ε_{th,H_s} [—]
Efficacité globale, sur base H_i	ε_{H_i} [—]
Efficacité globale, sur base H_s	ε_{H_s} [—]
Pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel utilisé	H_i [$\text{kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$]
Pouvoir calorifique supérieur du gaz naturel utilisé	H_s [$\text{kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$]
Débit de gaz naturel	\dot{v}_{gaz} [$\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
Niveau de puissance acoustique	L_{WA} [dB]
Niveau de pression acoustique	L_p [$\text{dB}(A)$]
Caractéristique du circuit hydraulique interne	kvs [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]
Pertes de charge du circuit hydraulique au débit nominal	ΔP [kPa]
Composition des fumées	$\text{NO}_x, \text{CO}, \text{CH}_4$ [$\text{mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ à 5% O_2]

Les symboles des grandeurs mesurées sont indiqués à l'endroit de la mesure sur le schéma en annexe 6.2. Celles non reportées sont déterminées par calcul.

Nm^3 fait référence à un mètre cube de gaz dans les conditions normales de pression/température (0°C, 101'325 Pa).

2.4 Mesures des grandeurs électriques

Plusieurs puissances électriques sont mesurées et enregistrées. La valeur en sortie de tableau électrique $P_{él,A}$ correspond à la puissance produite après les appareils électroniques nécessaires au fonctionnement du Stirling. Il s'agit de la puissance introduite sur le réseau du client. Elle est mesurée par le compteur EMU 1/40 M-BUS. Les données sont enregistrées par intervalle de 10 secondes sur une centrale M-Bus.

La valeur en entrée de tableau électrique $P_{él,B}$ correspond à la puissance produite avant les appareils nécessaires au fonctionnement du Stirling. Elle permet d'établir la consommation électrique de ceux-ci. Elle est mesurée de la même manière que $P_{él,A}$.

Le déphasage courant-tension est mesuré par l'appareil EMU 1/40. Les données sont enregistrées par l'intermédiaire de la centrale M-Bus.

Le compteur offre une précision de classe B selon la norme EN50470-3, soit $\pm 1\%$ sur les caractéristiques courant-tension.

2.5 Mesures des grandeurs thermiques

La puissance thermique effective fournie \dot{Q}_{eff} est mesurée par un compteur de chaleur GWF Multical 403. Il est composé d'un débitmètre à ultrason et de 2 sondes de températures Pt500 qui permettent d'établir une puissance thermique. Le débit, les températures aller et retour, la puissance instantanée ainsi que la chaleur totalisée sont enregistrées par l'intermédiaire de la centrale M-Bus cité plus haut.

La précision de mesure sur la puissance thermique est d'environ $\pm 2\%$ (pour un débit de 0,4 m³/h et une différence de température de 10 K).

Les puissances thermiques absorbées \dot{Q}_{Hi} et \dot{Q}_{Hs} sont déterminées sur la base du pouvoir calorifique inférieur et supérieur et du débit de gaz naturel selon, respectivement, l'Équation 1 et l'Équation 2.

Équation 1

$$\dot{Q}_{Hi} = H_i \cdot \dot{v}_{gaz}$$

Équation 2

$$\dot{Q}_{Hs} = H_s \cdot \dot{v}_{gaz}$$

Avec \dot{v}_{gaz} = Débit du gaz naturel rapporté à 0°C, 101'325 Pa

Le débit de gaz est mesuré dans les conditions du laboratoire par l'intermédiaire d'un compteur de gaz à soufflet GWF E-BGZ BK-G4 V2 DN25 (erreur <1% avec une correction de la pression et de la température). Le volume de gaz est relevé toutes les 10 secondes par la centrale M-Bus. La température du gaz est mesurée sur toute la durée d'essai par un thermocouple de type K fixé sur la conduite. La pression relative du gaz naturel est mesurée en sortie du compteur à l'aide d'un manomètre Kromschroder KFM 60 RB 63. La pression absolue est déterminée selon l'Équation 3 sur la base des données météorologiques du jour. Le volume de gaz est ensuite rapporté dans les conditions normales selon l'Équation 4.

Équation 3

$$p_{a,1} = p_{relative} + p_{atmosphérique}$$

Équation 4

$$\dot{v}_{gaz} = \dot{v}_{gaz,mesure} \cdot \frac{T_N \cdot p_{a,1}}{p_N \cdot T_{gaz}}$$

Avec, $\dot{v}_{gaz,mesure}$, T_{gaz} : débit et température du gaz mesuré dans les conditions du test

T_N , p_N : Température et pression dans les conditions normales (273,15 K et 101'325 Pa)

Le gaz naturel utilisé pour les essais provient d'un rack composé de 12 bouteilles à 200 bar fourni par l'entreprise Carbagas. Les pouvoirs calorifiques inférieur et supérieur sont établis sur la base du certificat de composition mesurée par le fournisseur (annexe 6.1) selon l'Équation 5 et Équation 6. Ils sont donnés dans l'annexe 6.4.

Équation 5

$$H_i = \sum_j [C_{C_nH_m,j} \cdot H_{i,j}]$$

Équation 6

$$H_s = \sum_j [C_{C_nH_m,j} \cdot H_{s,j}]$$

Avec $C_{C_nH_m,j}$ = Concentration en Vol.-% de l'hydrocarbure considéré, $H_{i,j}$ = Pouvoir calorifique inférieur en kWh/Nm³ de l'hydrocarbure considéré, $H_{s,j}$ = Pouvoir calorifique supérieur en kWh/Nm³ de l'hydrocarbure considéré.

2.6 Pertes

2.6.1 Pertes par les fumées

Les pertes par les fumées sont établies selon les recommandations de l'office fédéral de l'environnement (OFEV). Elles sont données par l'Équation 7

Équation 7

$$\dot{Q}_G = \left[(T_{gc} - T_{atm}) \cdot \left(\frac{0,66}{21 - O_2} + 0,009 \right) + \frac{H_s - H_i}{H_i} \cdot \frac{\dot{m}_{cond,th} - \dot{m}_{cond,effectif}}{\dot{m}_{cond,th}} \right] \cdot \dot{Q}_{H_i}$$

Avec O_2 : concentration en oxygène dans les fumées en %, $\dot{m}_{cond,th}$: quantité maximale de condensats pour le combustible considéré, $\dot{m}_{cond,effectif}$: quantité de condensats mesurée à la sortie du dispositif considéré et rapporté à la quantité de combustible brûlé.

Le terme de gauche correspond aux pertes par chaleur sensible et celui de droite aux pertes par chaleur latente.

En partant du principe, par exemple, qu'une mole de méthane donne, après oxydation complète, deux moles d'eau. Il est possible, avec la composition du gaz connue (cf. annexe 6.1), de déterminer la quantité théorique maximale de condensat. En tenant compte des hydrocarbures donnés en annexe 6.1 il est possible de condenser 1,63 kg par Nm³ de combustible.

La quantité d'eau effectivement condensée est mesurée comme indiqué dans la Figure 3. Une partie de l'eau formée lors de la combustion ($\dot{m}_{H_2O,cond,1}$) condense dans le Stirling. Il s'agit de la part récupérable de chaleur latente. Elle est mesurée à l'aide d'une balance. L'autre partie ($\dot{m}_{H_2O,cond,2}$) est considérée comme une perte. La masse d'eau, relevée au cours du temps, permet d'établir un débit massique d'eau qui est rapporté à la quantité de combustible brûlé selon l'Équation 8.

Équation 8

$$\dot{m}_{cond,effectif} = \frac{\dot{m}_{H_2O,cond,1}}{v_{gaz}}$$

Avec v_{gaz} : volume effectif de gaz en Nm³ relevé par le compteur dans le laps de temps de la mesure des condensats.

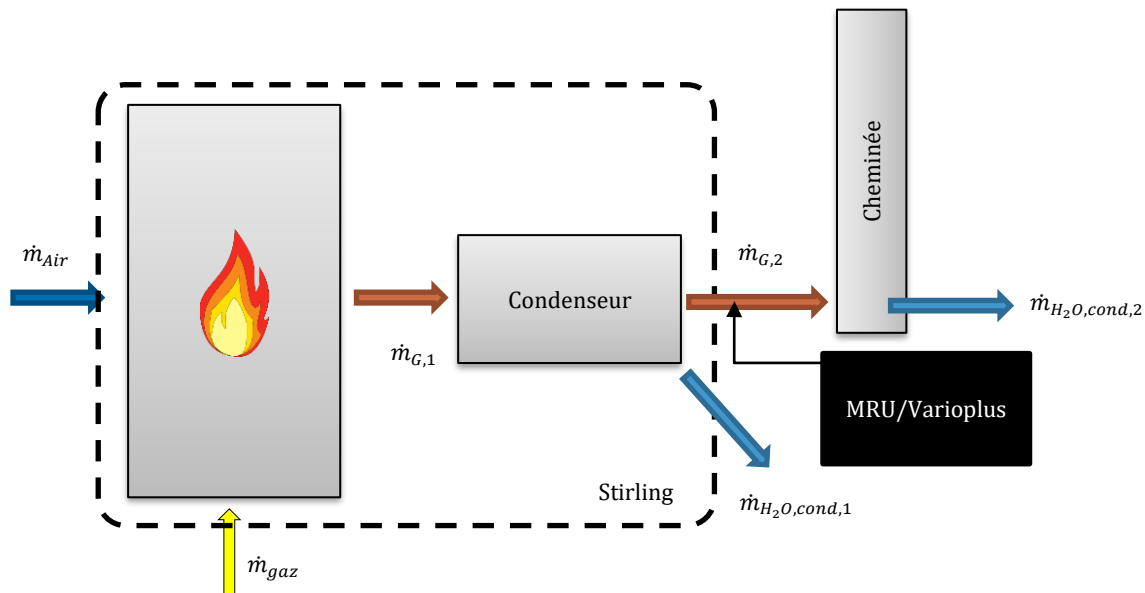


Figure 3 Mesure des condensats

2.8 Analyse des fumées de combustion

Le Vario plus Industrial, calibré le 16 juin 2021 (certificat 107734.2 – Kull Instruments) permet de mesurer les gaz suivants :

- O₂ 0...21,0 ± 0,2 %
- CO₂ 0... 30% ± 0,5%
- CO 0... 2000 ± 20 ppm
- HC 0... 10'000 ± 40 ppm (HC = hydrocarbure, exprimé en éq. CH₄)
- NO 0... 1'000 ± 5 ppm
- NO₂ 0... 200 ± 5 ppm
- SO₂ 0... 2'000 ± 10 ppm
- H₂S 0... 50 ± 5 ppm.

Il mesure également la température des gaz et le tirage.

2.9 Mesures acoustiques

En raison de la configuration du banc d'essai, les mesures sont effectuées selon la norme ISO 3746. Elle permet d'obtenir des résultats de classe de précision 3 (classe de contrôle) selon l'ISO 12001.

Le banc de test est caractérisé par un niveau sonore de bruit de fond proche du niveau de bruit du Stirling et d'une halle ne permettant pas l'absorption des ondes sonores. Sont déterminés ici, selon la méthode de mesure de l'intensité acoustique (EN 15036-1, Annexe C) :

- Le niveau de puissance acoustique pondéré A L_{WA} accompagné de son incertitude de mesure déterminée selon la norme ISO 3746;
- Le niveau de pression acoustique temporelle moyen $\overline{L_{pA}}$ rapporté sur une surface de référence.

La Figure 5 présente la surface de référence, un parallélépipède rectangle situé à une distance de 80 cm par rapport aux bords du Stirling. Les points 1 à 9 représentent les positions du microphone.

L'appareil CESVA SC310 (Sonomètre de Classe 1 selon la norme IEC 61672-1:2002) est employé pour les mesures.

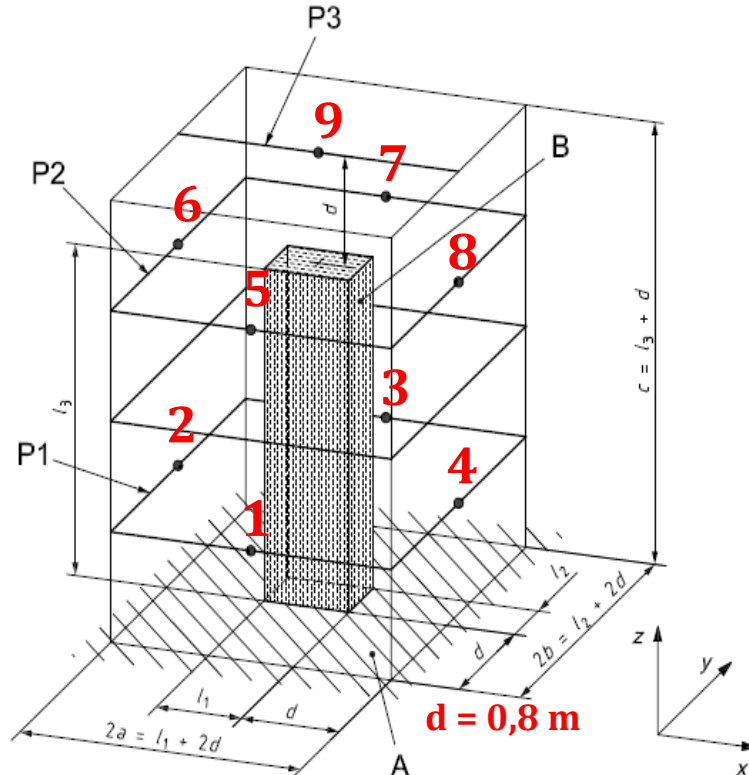


Figure 5 Surface de référence et positions des microphones (ISO 3746, Figure C.3)

2.10 Pertes de charge

Les pertes de charge du circuit hydraulique interne du Stirling sont mesurées par l'intermédiaire d'une valise TA-SCOPE de IMI-Hydronic (précision de mesure de $\pm 0,1$ kPa pour la plage considérée) branchée sur deux piquages aux bornes de la machine. Le débit mesuré par le compteur de chaleur permet de rapporter les pertes de charges au débit nominal et de déterminer la caractéristique kvs du circuit interne. Cette dernière correspond au débit volumique passant dans la machine pour un différentiel de pression à ses bornes de 1 bar. Elle est calculée selon l'Équation 13.

Équation 13

$$kvs = \frac{\dot{v}_n}{\sqrt{\Delta P}}$$

Avec \dot{v}_n = Débit nominal en m³/h, ΔP = Perte de charge mesurée aux bornes de la machine en bar
Les mesures sont effectuées avec le réseau hydraulique à température ambiante (26°C).

3 Résultats

3.1 Efficacités

3.1.1 Comparaison dans différentes conditions

La Figure 6 présente les différentes efficacités calculées sur la base du pouvoir calorifique inférieur. Celles calculées sur la base du pouvoir calorifique supérieur sont présentées en annexe 6.5.

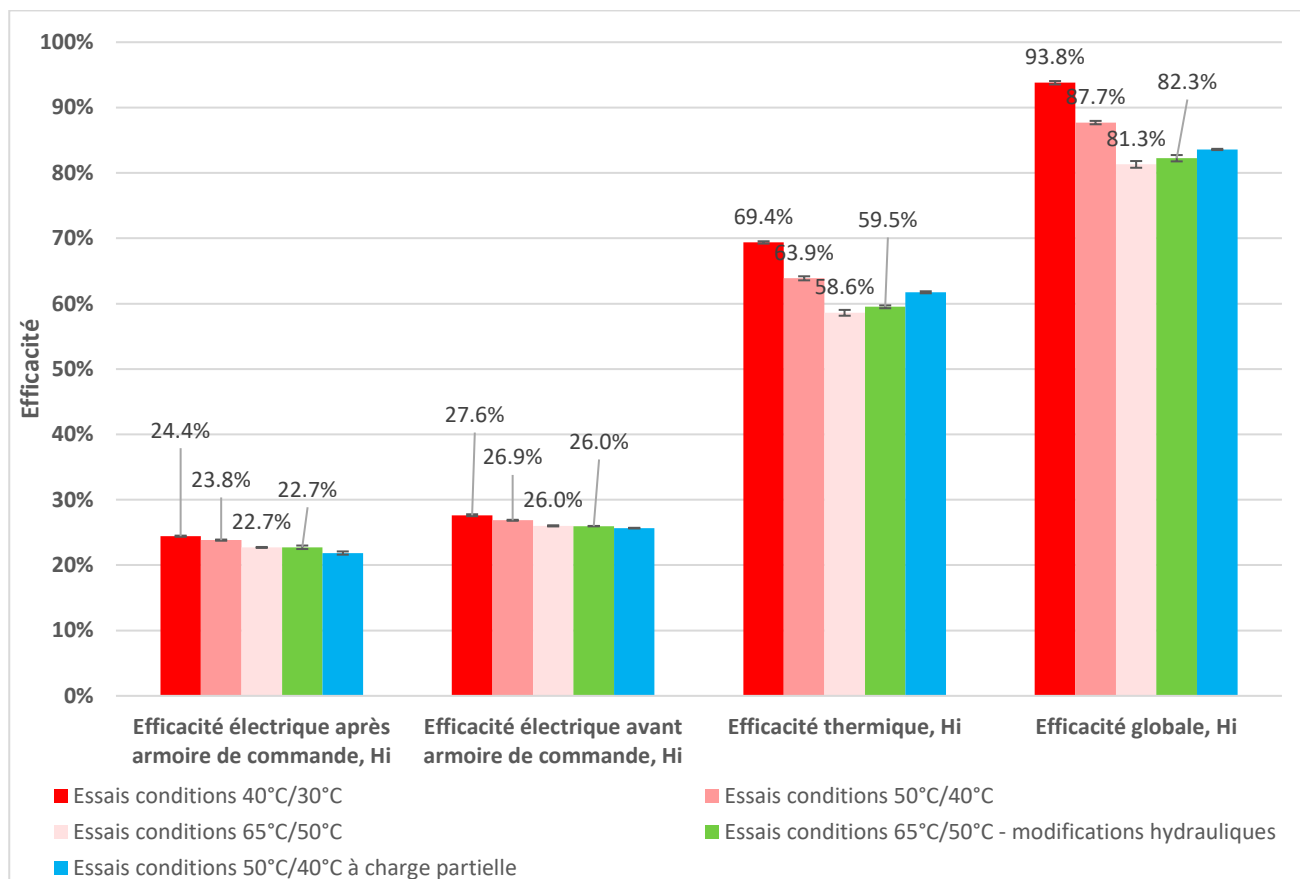


Figure 6 Efficacités sur base du pouvoir calorifique inférieur et pour différentes conditions de fonctionnement

On observe que l'efficacité électrique, thermique et globale diminue avec l'augmentation de la température de retour (entre 0,6 et 1,1% pour l'efficacité électrique et ~5.4% pour l'efficacité thermique pour une augmentation de 10°C), principalement en raison d'une quantité d'eau condensée plus faible à mesure que la température du réseau de chauffage augmente (pertes par chaleur latente) (voir aussi Figure 7). L'autre source de pertes dépend de la température des fumées, plus élevée pour des températures du réseau de chauffage haute (pertes par chaleur sensible).

Une modification hydraulique a été effectuée sur la machine pour diriger l'eau de retour directement dans l'échangeur sur les fumées, ceci, pour maximiser la condensation. A parité de température du réseau de chauffage (en vert et en rose pâle dans la Figure 6 et Figure 7), il en ressort une efficacité thermique et donc globale plus élevée.

L'efficacité électrique est, comme annoncée par Schmid AG, supérieure à 25% en sortie du Stirling (en entrée de l'armoire de commande). L'armoire de commande du Stirling consomme une puissance d'environ 210 W. Selon Schmid AG, elle offre encore un substantiel potentiel d'optimisation.

L'utilisation du Stirling en charge partielle n'est pas optimale d'un point de vue efficacité. D'autant plus que la puissance réduite d'environ 70% pour nos essais, ne servirait qu'à prolonger le temps de fonctionnement du groupe. Ce qui pourrait être utile pour des habitations neuves et très bien isolées.

Il serait, en revanche, intéressant de pouvoir changer les conditions de température du réseau de chauffage sans intervention d'un technicien. Il serait possible alors de produire de l'eau chaude sanitaire (condition 65°C-50°C) avec une efficacité moindre pendant 2 heures et basculer sur des conditions plus favorables pour du chauffage au sol (40°C-30°C).

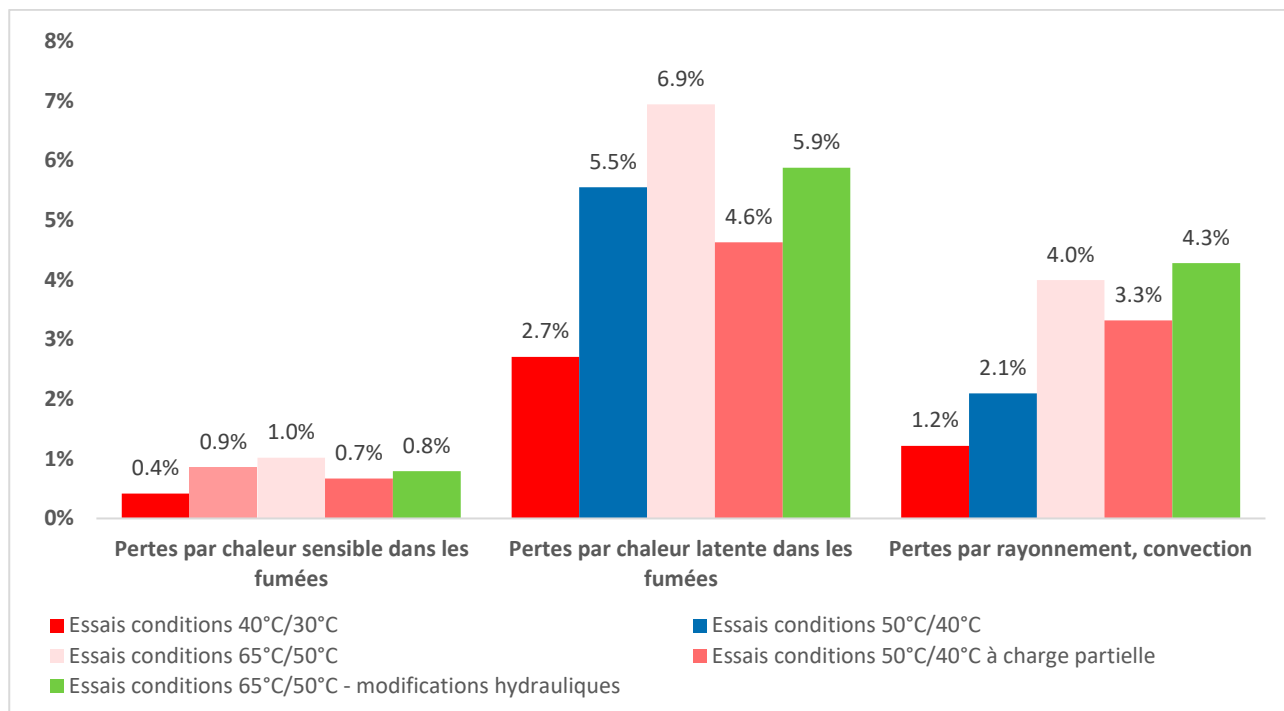


Figure 7 Pertes par chaleur sensible, latente et rayonnement/convection pour différentes conditions de fonctionnement

3.1.2 Bilan complet

La Figure 8 présente les efficacités calculées sur la base d'un bilan complet réalisé sur 8 heures comprenant une phase de démarrage de la machine (~45 min), une phase stationnaire (~7h) et un arrêt (mesure 15 min après l'arrêt de la machine). Ils sont comparés aux efficacités calculées en phase stationnaire comme présentées dans le §3.

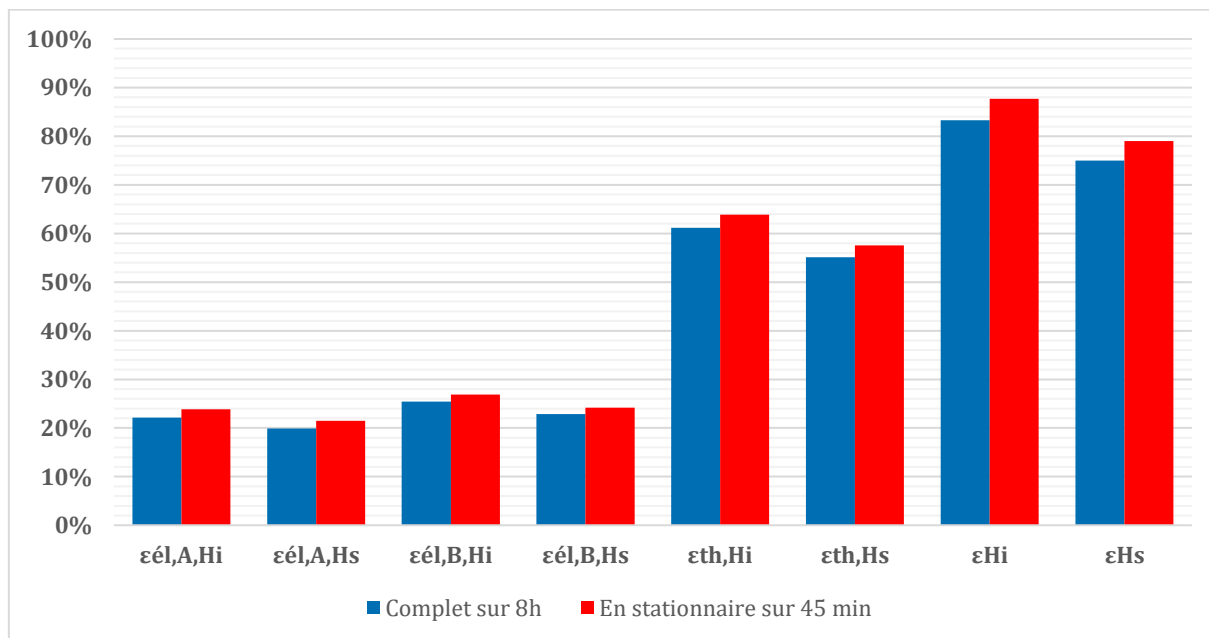


Figure 8 Comparaison d'un bilan complet à un bilan en phase stationnaire pour les conditions nominales

Le bilan complet sur 8 heures fait état d'une efficacité moindre, comparativement au bilan en phase stationnaire sur 45 minutes (diminution entre 1,5 et 4,5%). La raison est la prise en compte de la phase de démarrage qui demande l'utilisation d'une partie de l'énergie apportée au système pour le chauffage de toute la masse froide de la machine. La différence n'est cependant pas très élevée et peut être diminué en augmentant le temps de fonctionnement du Stirling à l'aide d'un stock thermique important.

3.2 Puissances

La puissance thermique absorbée par le groupe de cogénération diminue à mesure que la température de retour augmente (Figure 9). Ce qui est probablement dû aux adaptations de réglages lors du changement de conditions ou peut-être à la régulation du brûleur.

Les puissances thermiques fournies au réseau de chauffage et électrique fournie au réseau électrique s'en retrouvent également diminuées. La réduction de puissance électrique est probablement due aux pertes thermodynamiques, liées au rendement de Carnot qui dépend de la différence de température entre sources chaude et froide. Quant à la puissance fournie au réseau de chauffage, cette diminution provient principalement des pertes par chaleur latente.

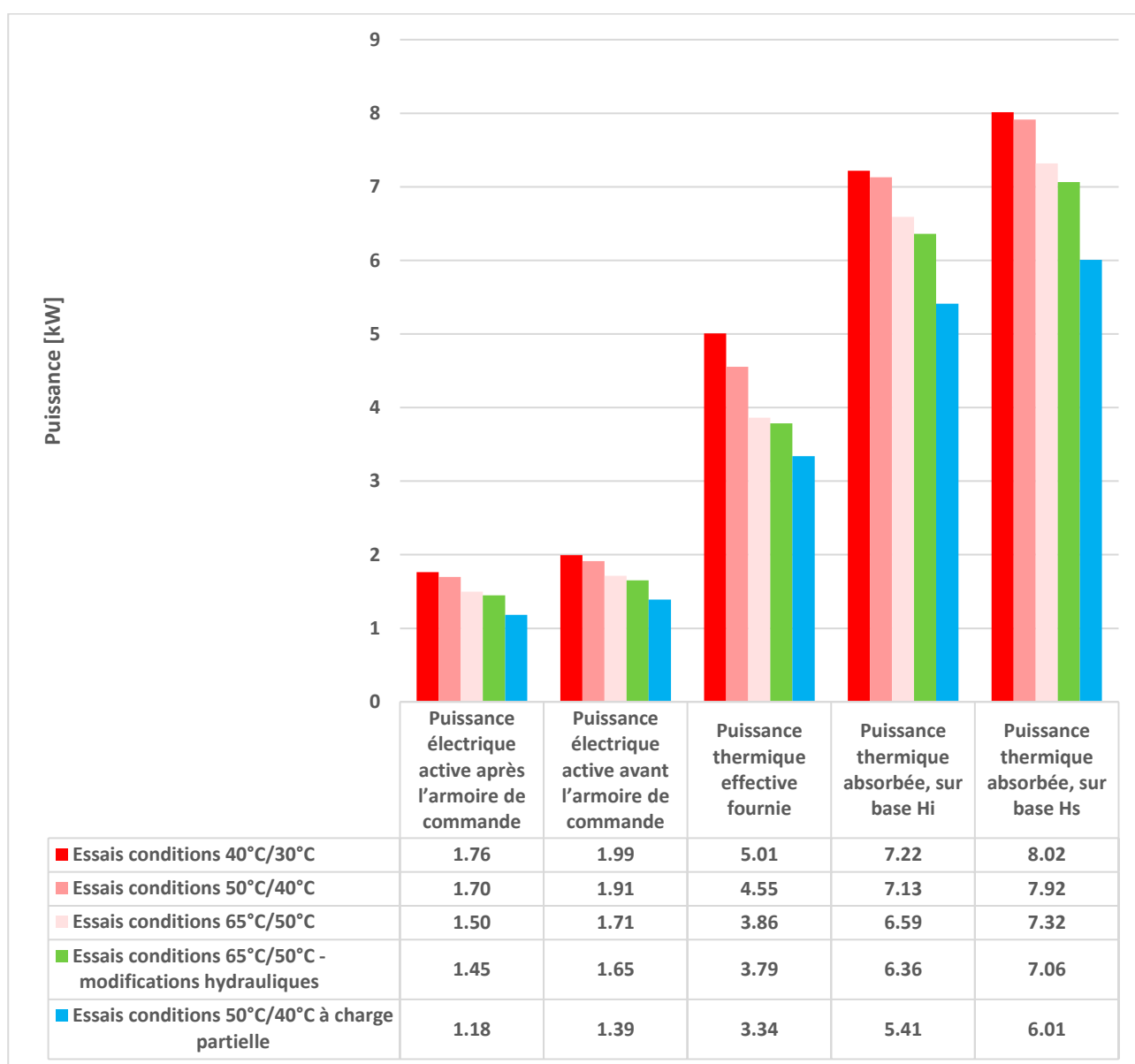


Figure 9 Puissances développées par le groupe de cogénération

3.3 Composition des fumées

3.3.1 Valeurs limites OPair

Les valeurs limites (VL) fixés par l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair) ne sont pas identiques selon si l'on considère le Stirling comme un moteur à combustion stationnaire (Annexe 2, Chapitre 82) ou une installation de combustion alimentées au gaz (Annexe 3, Chapitre 6). Le Tableau 3 présente les valeurs limites pour le monoxyde de carbone et les oxydes d'azotes pour ces 2 catégories. Par la suite, les résultats seront donnés pour la catégorie de l'annexe 2, chapitre 82 (installations de combustion) car il constitue le cas le plus défavorable. Les données pour l'autre catégorie sont disponibles en annexe 6.5.

Tableau 3 Valeurs limites de l'OPair pour le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azotes (NO_x)

Catégorie de machine	VL CO [mg/Nm ³]	VL NO _x [mg/Nm ³]
Installations de combustion alimentées au gaz	100 rapporté à 3% d'O ₂	80 rapporté à 3% d'O ₂
Moteurs à combustion stationnaire	650 rapporté à 5% d'O ₂	250 rapporté à 5% d'O ₂

3.3.2 Résultats

Les émissions de polluants (CO, NO_x, CH₄) ont été relevées pour chaque condition donné dans le Tableau 1. Les concentrations sont relevées toutes les secondes et moyennées sur une période de 45 min en phase stationnaire. Trois essais sont réalisés pour chaque conditions. La Figure 10 présente la moyenne sur trois essais, les lignes verticales représentent les écarts-types.

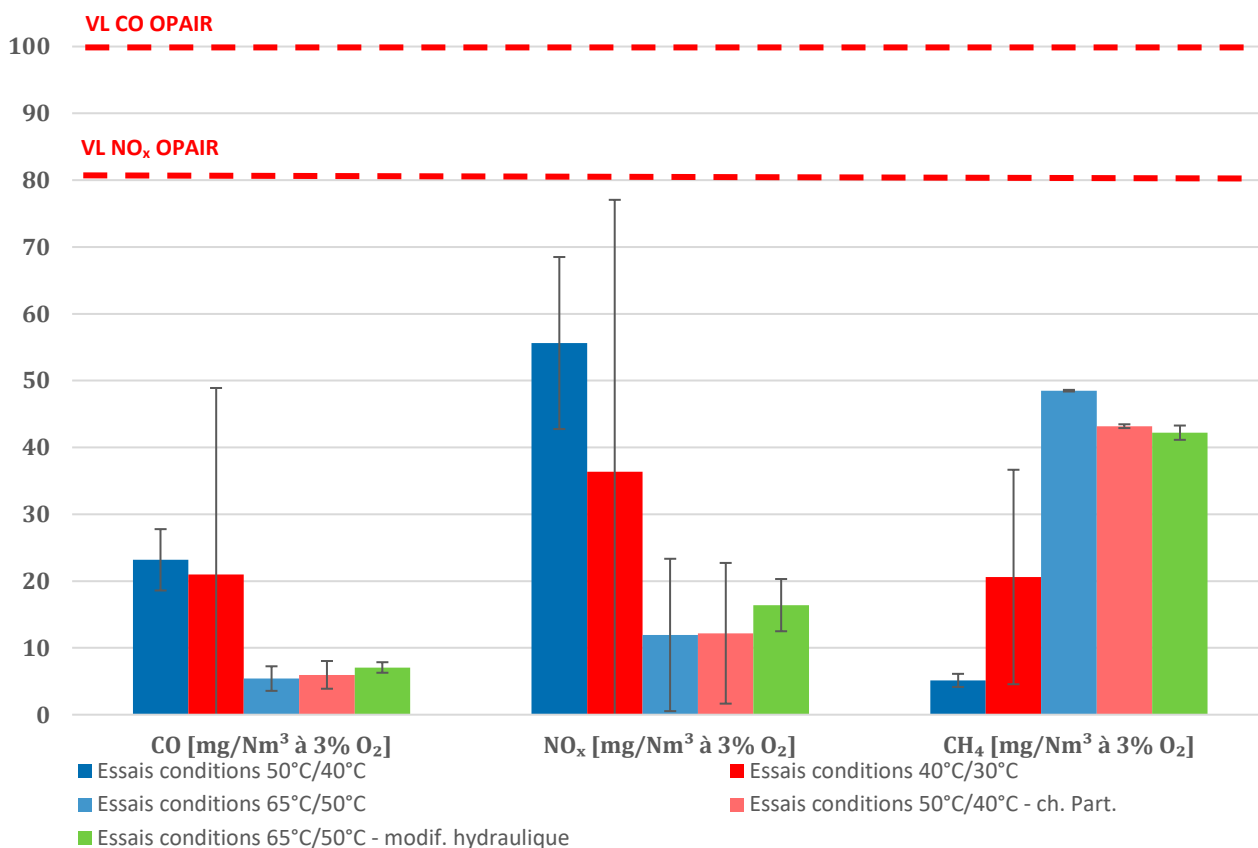


Figure 10 Teneur en CO, NO_x et CH₄ dans les fumées pour les différentes conditions d'essais

Les essais ont été réalisés dans l'ordre de lecture (gauche-droite) qui apparaît sur la Figure 10. L'écart-type pour les essais dans les conditions 40°C/30°C est plus important que les autres. De plus, à partir de cette condition, les concentrations en CO et NO_x diminuent alors que celle des hydrocarbures (équivalent-CH₄) augmente. Ceci s'explique par un réglage différent opéré par Schmid AG sur le brûleur au milieu des essais dans les conditions 40°C/30°C.

Il est important de noter que les émissions de CO et NO_x sont dans tous les cas, inférieures aux valeurs limites prescrites par l'OPair pour une « installation de combustion alimentée au gaz ». Elles sont également bien inférieures aux valeurs limites pour la catégorie « Moteurs à combustion stationnaire » (voir annexe 6.6).

3.4 Résultats des mesures acoustiques

Les résultats sont présentés dans le Tableau 4. Ils sont basés sur 3 essais indépendants, réalisés à des moments différents. L'incertitude de mesure est établie pour un intervalle de confiance de 95%.

Tableau 4 Pression et puissance acoustique du Stirling selon ISO 3746

Niveau de pression acoustique surfacique temporel moyen, pondéré A $\overline{L_{pA}}$ [dB]	49.4
Niveau de puissance acoustique, pondéré A, basé sur 3 essais L_{WA} [dB] <i>Pour un intervalle de confiance de 95%</i>	64.0 ± 5.5

Le niveau de pression acoustique reste plutôt faible et acceptable pour une machine de ce type. Ce qui conviendra bien pour un placement dans une chaufferie.

Le châssis amorti bien les vibrations du Stirling, qui ne se transmettent pas au sol. Le réseau hydraulique interne étant réalisé uniquement en tube rigide, un flexible anti-vibration est préconisé pour en atténuer la transmission au réseau de chauffage.

3.5 Caractéristiques hydrauliques

Les mesures des pertes de charges du circuit interne du Stirling sont données dans le Tableau 5.

Tableau 5 Caractéristiques hydraulique du circuit interne du Stirling

ΔP pour 358 l/h pour une température d'eau de 26°C [kPa]	6.75
kvs [m ³ /h]	1.38

4 Test d'endurance

4.1 Emplacement

Des essais d'endurance d'au moins deux saisons de chauffage vont débuter dans une villa individuelle à Yverdon-les-Bains. La Figure 11 montre l'emplacement de la villa test, proche de la HEIG-VD. Le Tableau 6 détaille quelques caractéristiques clés de la maison de la famille Wind.



Figure 11 Emplacement du Stirling à Yverdon

Tableau 6 Caractéristiques clés de la villa de la famille Wind

Année de construction/rénovation	1925/fenêtres changées en 2000, injection de laine de pierre entre 2 murs en 2009
Production de chaleur	Chaudière mazout 17kW, solaire thermique 6 m ² (ECS)
Emission de chaleur	Radiateur et appoint poêle à bûches
Production d'électricité	12 panneaux photovoltaïque pour 3,9 kW _c

4.2 Implantation

L'installation prévu va remplacer le producteur de chaleur actuelle (chaudière mazout) mais conserver les panneaux solaires thermiques et permettre leur exploitation pour le chauffage également.

Elle sera constituée de :

- Un Stirling comme principale producteur de chaleur ;
- 2 accumulateurs de chaleur (~1800 L d'accumulation), couplés en parallèle pour stocker, à minima, 4 heures d'énergie thermique produit par le CCF ;
- Un groupe hydraulique permettant la préparation de l'eau de chauffage à la bonne température ;
- Un système permettant de préparer l'eau chaude sanitaire en instantanée ;
- Un groupe hydraulique pour la chaleur produite par les panneaux solaires thermiques ;
- Un vase d'expansion ;
- Une résistance électrique en cas de panne du Stirling ;
- Une armoire mesure-commande-régulation (MCR) avec toutes les sondes nécessaires au fonctionnement optimale des producteurs de chaleur (Stirling et solaire thermique) et des consommateurs de chaleur (radiateur et ECS).

Voir également en annexe §6.7 et 6.8 pour le schéma de principe et quelques photos de l'installation.

Ces tests d'endurance sont réalisés dans le cadre d'un projet pilote financé par le service des énergies du canton de Vaud à hauteur de 50'000 CHF.

4.3 Instrumentations et suivi des performances

L'instrumentation en place pour les tests d'endurance est quasiment identique à celle en laboratoire. La puissance électrique à l'entrée de l'armoire de commande du Stirling n'est plus relevée, seule celle à la sortie l'est avec le même appareil. Pour le gaz naturel, l'installation comporte 2 compteurs identiques, le premier appartient aux services des énergies pour la facturation au client et le second (celui du laboratoire) est relevé automatiquement. Un piquage sur la conduite de gaz permet de réaliser des prélèvements ponctuels. Des analyses semi-quantitatives par chromatographie en phase gazeuse (GC), réalisés dans notre laboratoire, sont prévues afin d'apprécier le pouvoir calorifique.

Le même compteur de chaleur est installé et relevé automatiquement. Deux sondes Pt1000 permettent de relever la température du local et la température extérieure.

Les données sont enregistrées localement sur carte SD et collectées en même temps qu'un échantillon de gaz naturel. Une visite hebdomadaire est prévue le premier mois qui suit la mise en service. A partir du 2^{ème} mois, la fréquence des visites sera plus espacée mais évolutive en fonction du comportement du système.

Le producteur de chaleur donne un accès à distance d'un certain nombre de paramètres (puissances instantanées, températures, pressions, ...). Ces données serviront pour un suivi à distance plus régulier et pour détecter une éventuelle dérive.

5 Conclusion

La caractérisation du Stirling de la société Schmid AG montre des performances très bonnes pour la catégorie de produit (efficacité électrique comprise entre 25 et 27%, efficacité globale entre 81 et 94%). Les pertes par chaleur latente dans les fumées sont plus élevées pour des hautes températures du réseau de chauffage et pourraient être grandement diminuées avec la suppression du groupe de relevage de température de retour. Un gain jusqu'à 10 points de pourcent a été relevé entre la température la plus basse et la plus haute. L'énergie récupérée de la condensation serait plus élevée de même que la puissance restituée au réseau de chauffage.

De plus, une adaptation automatique des températures du réseau de chauffage pour une production différenciée du chauffage et d'eau chaude sanitaire permettrait d'améliorer grandement l'efficacité annuelle.

L'armoire de commande consomme environ 210 W et offre encore un potentiel d'optimisation.

La puissance absorbée par le groupe de cogénération semble diminuer avec l'augmentation de la température du réseau hydraulique (diminution de la puissance jusqu'à 7,5% pour 15°C de différence de température). Un approfondissement du côté de Schmid AG est préconisé pour comprendre le phénomène.

Les mesures des effluents gazeux montrent la conformité du CCF vis-à-vis des exigences fixées par l'OPair. Le niveau de pression acoustique moyen selon ISO 3746 ($\overline{L_{pA}}$) reste approprié pour une installation en chaufferie (49,4 dB).

Finalement, le suivi des performances du groupe de cogénération sur deux saisons de chauffage permettra de confirmer sa fiabilité et suggérera potentiellement d'éventuelles adaptations qui pourront être effectuées. L'instrumentation dans le terrain est identique à celle employée en laboratoire et des prélèvements de gaz naturel sur site permettront d'estimer, au mieux, le pouvoir calorifique du combustible.

Actuellement, le Stirling fonctionne grâce à un brûleur à gaz naturel. Le développement, envisagé à terme, d'un brûleur à granulés de bois dédié au moteur Stirling devrait être plus en accord avec la politique énergétique suisse. Cette étape ne pourra toutefois se concrétiser qu'une fois la partie moteur du Stirling validée dans le terrain.

6 Annexes

6.1 Analyse du gaz naturel

CARBAGAS AG | Laboratoire de Services
Rte d'Avenches 89 CH - 1564 Domdidier
Tél : +41 (0)26 676 64 46 Fax : +41 (0)26 676 64 10
www.carbagas.ch - info@carbagas.ch

Carbagas
gaz sur mesure

RAPPORT D'ANALYSE RA_LS_21092	
Client	HEIG-VD
Date	27.05.2021
Type d'analyse	Gaz naturel

Route d'Avenches - CH-1564 Domdidier

HEIG-VD
Julien Ropp
Av. des Sports 20
CH-1401 Yverdon-les-Bains

Informations

Région de vente : Berne
Conseiller client : -
Offre : -
Produit(s) reçu(s) le : 25.05.2021
Contrôle (Pression + Doc) : ☒ OK ☐ Défaut
Remarques : -
Réception effectuée par : Grégory Corminboeuf
Analyses débutées le : 25.05.2021
Analyses finies le : 26.05.2021
Réalisées par : Grégory Corminboeuf
Analyses réalisées sur : Phase gazeuse
Laboratoires externes : ---

N° client : -
N° commande : 98914/1512/ROJ
N° article : S4053 & S4054
N° facture : -
Date du rapport : 27.05.2021
Réalisé par : David Degonda
Distribution : -
Pour information : -

Revu le : -
Raison de la revu : -
Echantillons envoyés le : -
Résultats reçus le : -

Analyses

Les analyses sont réalisées par le laboratoire (LSERV) de CARBAGAS.

Les analyses sont réalisées en conformités selon les spécifications produits de Carbagas.

Méthodes d'analyse

CH4	MA031	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à conductibilité thermique
C2H6	MA031	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à conductibilité thermique
N2	MA031	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à conductibilité thermique
CO2	MA031	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à conductibilité thermique
C3H8	MA113	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
O2	MA107	Analyse par cellule électrochimique
i-C4H10	MA113	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
n-C4H10	MA113	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
neo-C5H12	MA113	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
i-C5H12	MA113	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
n-C5H12	MA113	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
n-C6H14	MA113	Analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur à ionisation de flamme
H2S	MA059	Analyse par spectrométrie de masse à faible énergie d'ionisation
THT	MA059	Analyse par spectrométrie de masse à faible énergie d'ionisation
H2O	MA019	Analyse par cellule capacitive

Les résultats de ce rapport se réfèrent exclusivement aux échantillons étant à la base de ces analyses.
La reproduction de ce document n'est autorisée que dans sa forme intégrale.

Carbagas ist ein Unternehmen der AIR LIQUIDE-Gruppe

AIR LIQUIDE

Carbagas est une entreprise du groupe AIR LIQUIDE

DE-26.203f Rev6 23.04.2013

RA_LS_21092 Analyse Gaz Nat - HEIG-VD

1 / 2

CARBAGAS AG | Laboratoire de Services
Rte d'Avenches 89 CH - 1564 Domdidier
Tél : +41 (0)26 676 64 46 Fax : +41 (0)26 676 64 10
www.carbagas.ch - info@carbagas.ch

Carbagas
gaz sur mesure

RAPPORT D'ANALYSE RA_LS_21092

Client HEIG-VD / 27.05.21

Résultats d'analyse

N° d'emballage : A19HGK4
Type d'emballage : 600 Litres
Raccord de l'emballage : W21.8 x 1/8" gauche
Pression de l'emballage : 200 bar

	Méthodes	Seuil de détection	Spécification : ProdSpec CG	Résultats	Incertitudes d'analyses relatives*
CH4	MA031	0.1 %	n/a %	92.39 %	± 1% rel.
C2H6	MA031	0.1 %	n/a %	5.08 %	± 5% rel.
N2	MA031	0.1 %	n/a %	0.97 %	± 5% rel.
CO2	MA031	0.1 %	n/a %	1.31 %	± 5% rel.
C3H8	MA113	0.1 %	n/a %	0.91 %	± 5% rel.
O2	MA107	1.0 ppm	n/a ppm	1.1 ppm	± 10% rel.
i-C4H10	MA113	0.1 ppm	n/a ppm	2.3 ppm	± 10% rel.
n-C4H10	MA113	0.1 ppm	n/a ppm	2.1 ppm	± 10% rel.
neo-C5H12	MA113	0.1 ppm	n/a ppm	< 0.1 ppm	-
i-C5H12	MA113	0.1 ppm	n/a ppm	< 0.1 ppm	-
n-C5H12	MA113	0.1 ppm	n/a ppm	< 0.1 ppm	-
n-C6H14	MA113	0.1 ppm	n/a ppm	< 0.1 ppm	-
H2S	MA059	0.1 ppm	n/a ppm	< 0.1 ppm	-
THT	MA059	0.1 ppm	n/a ppm	6.52 ppm	± 5% rel.
H2O	MA019	0.5 ppm	n/a ppm	2.5 ppm	± 20% rel.

* L'incertitude élargie est basée sur l'incertitude de type multipliée par un facteur d'élargissement $k = 2$, pour un niveau de confiance d'environ 95%.

Légende : na : requis, mais non analysé
nr : non réalisé

Pour toutes questions ou consultations, veuillez vous adresser à :

CARBAGAS AG
Grégory Corminboeuf, Laboratoire de Services
CH-1564 Domdidier
Tel. +41 26 676 64 46 | E-Mail gregory.corminboeuf@carbagas.ch

Domdidier, le 27. mai 2021

CARBAGAS AG



David Degonda
Laboratoire de Services

Annexes : -

Les résultats de ce rapport se réfèrent exclusivement aux échantillons étant à la base de ces analyses.
La reproduction de ce document n'est autorisée que dans sa forme intégrale.

Carbagas ist ein Unternehmen der AIR LIQUIDE-Gruppe



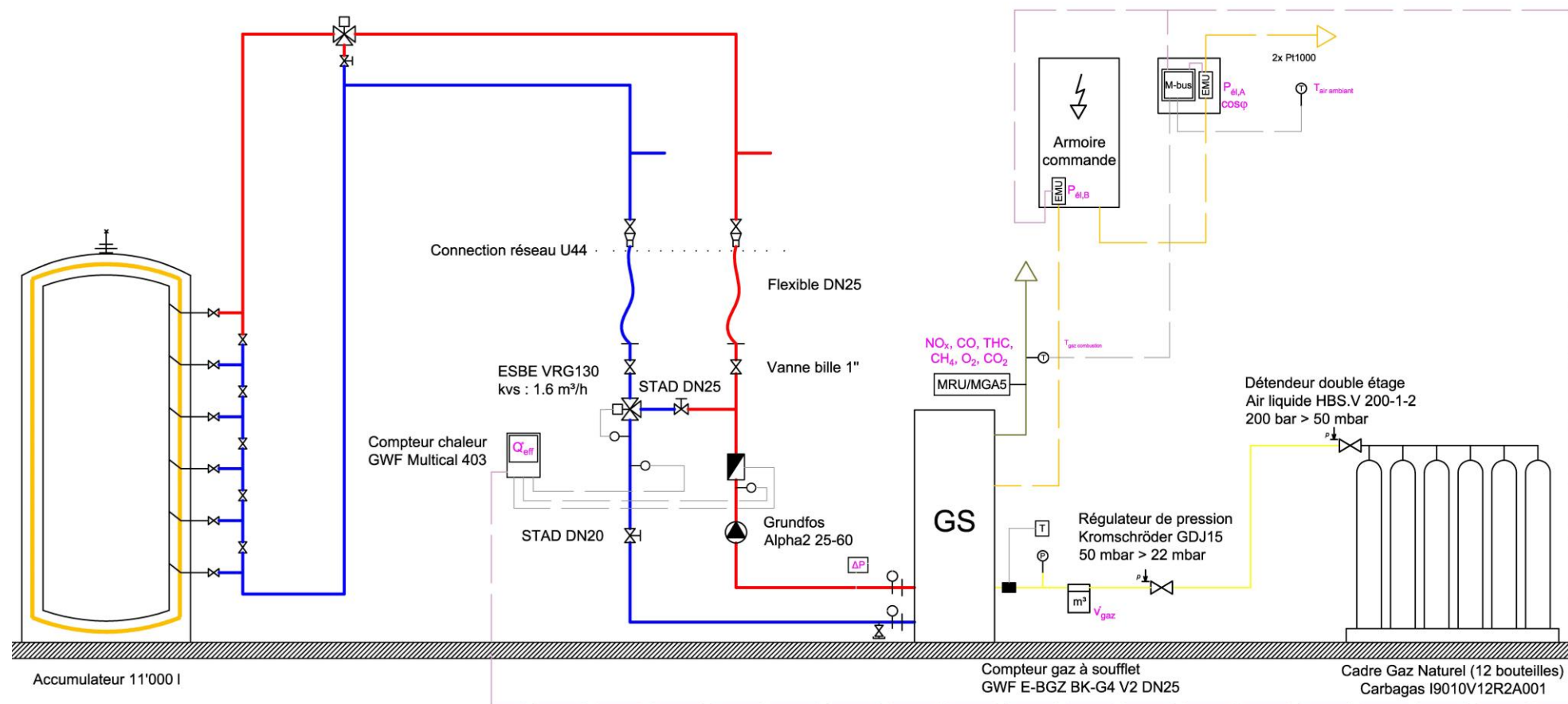
Carbagas est une entreprise du groupe AIR LIQUIDE

DE-26.203f, Rev6 23.04.2013

RA_LS_21092 (Analyse Gaz Nat - HEIGVD)

2 / 2

6.2 Schéma de principe banc de test



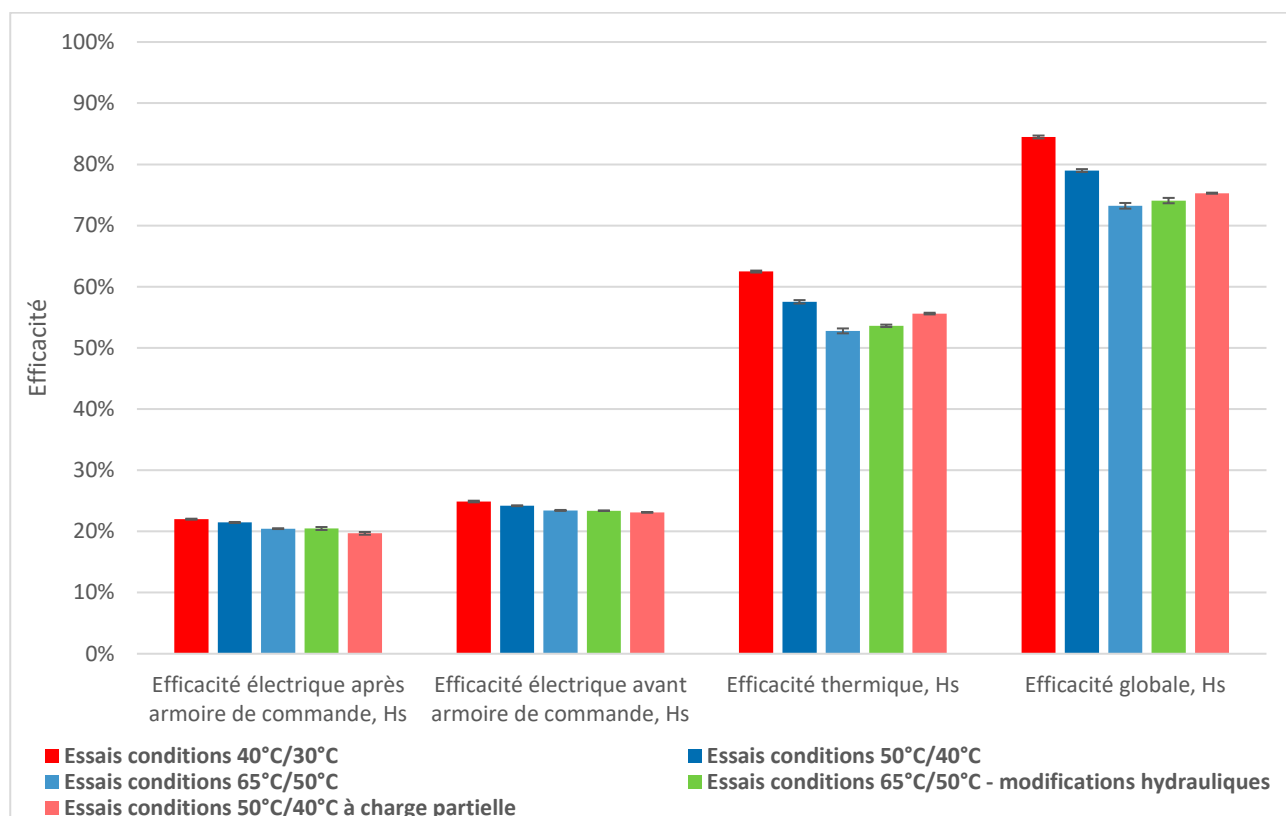
6.3 Photo du banc de test



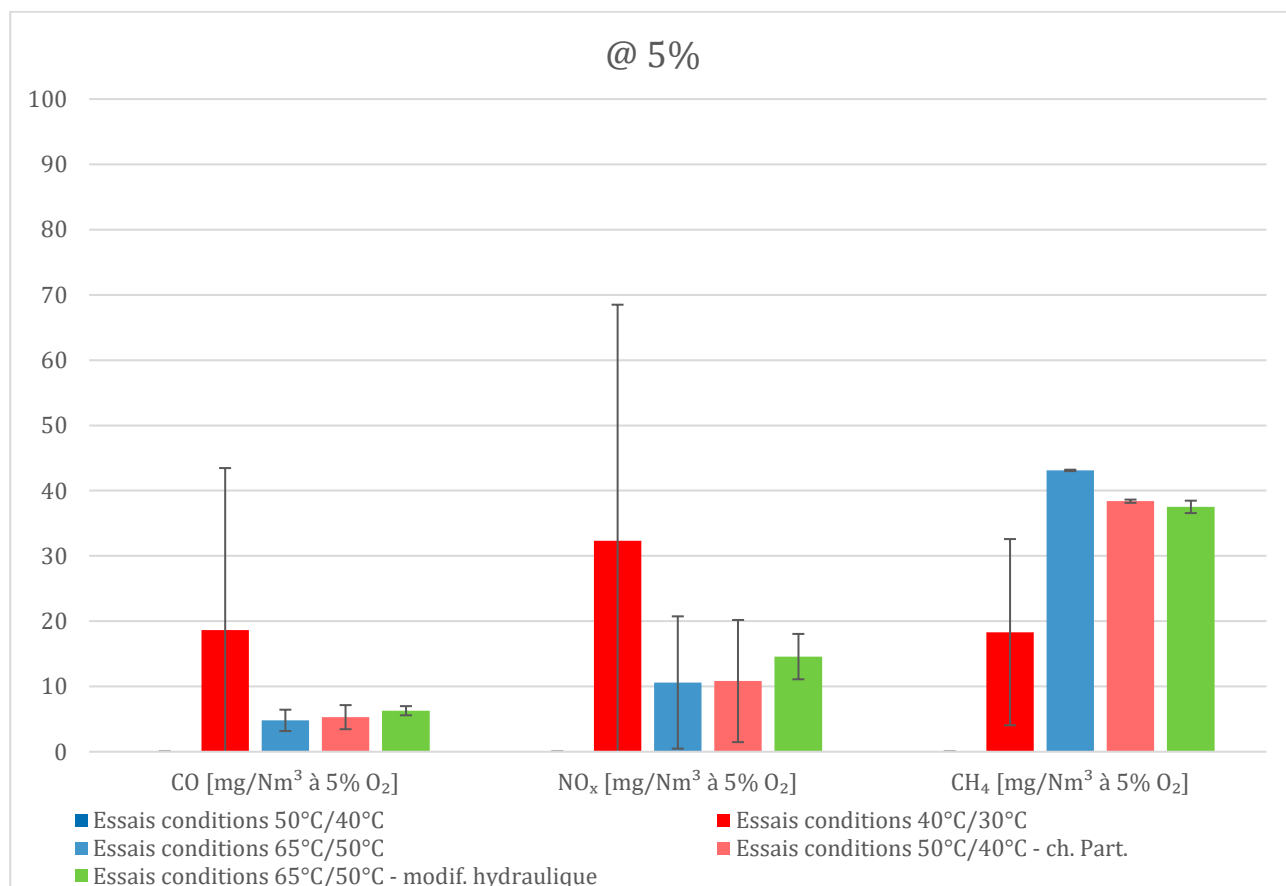
6.4 Pouvoir calorifique du gaz naturel

Gaz	Concentration	Pouvoir calorifique inférieur [kWh/Nm ³]	Pouvoir calorifique supérieur [kWh/Nm ³]
CH ₄	92.39%	9.9	11.0
C ₂ H ₆	5.08%	17.8	19.4
N ₂	0.97%		
CO ₂	1.31%		
C ₃ H ₈	0.91%	25.3	27.6
O ₂	0.00011%		
i-C ₄ H ₁₀	0.00023%	32.9	35.7
n-C ₄ H ₁₀	0.00021%		
THT	0.00065%		
H ₂ O	0.00025%		
TOTAL		10.31	11.45

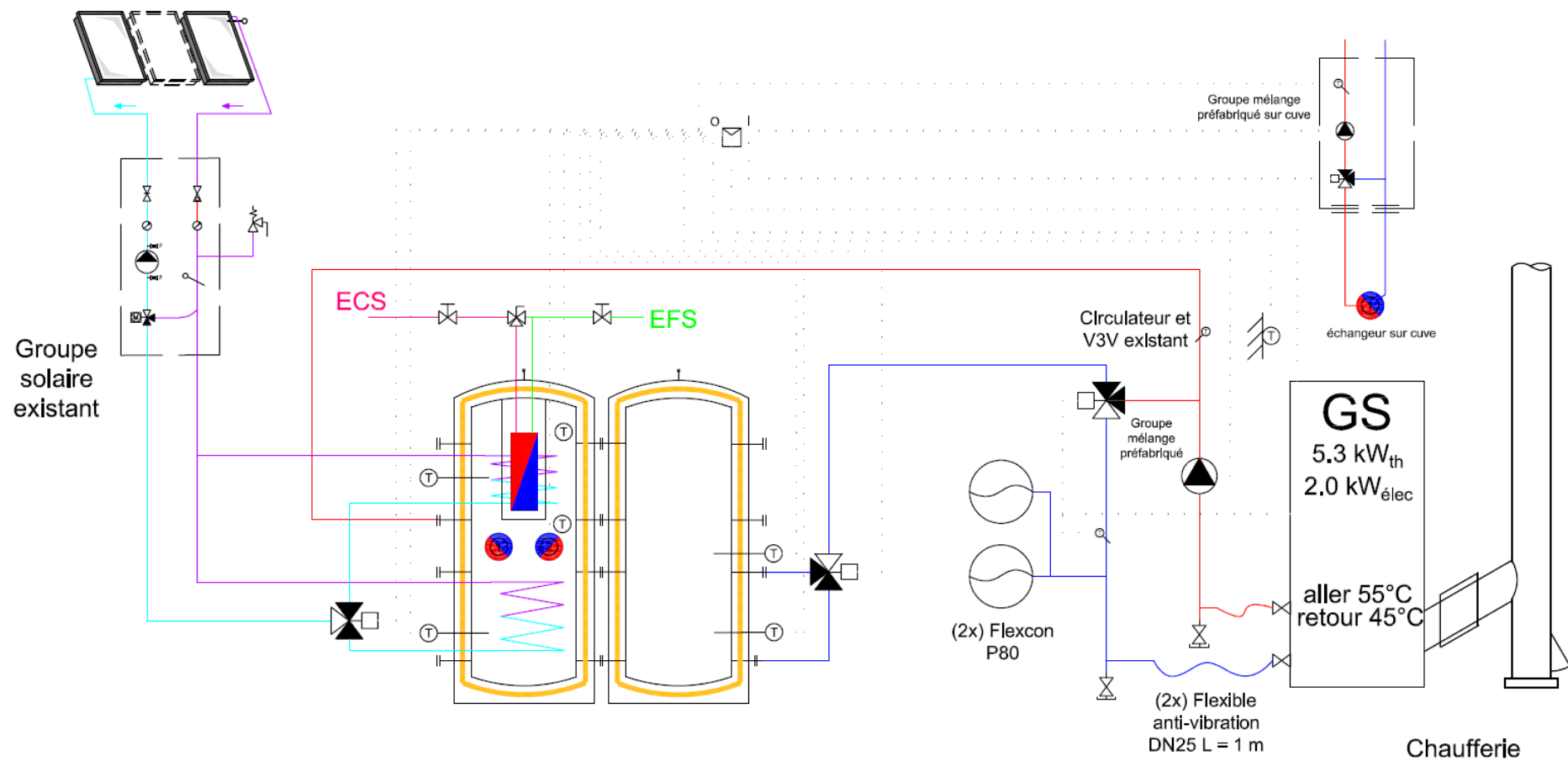
6.5 Efficacités sur la base du pouvoir calorifique supérieur



6.6 Compositions des fumées rapportées à 5% d'O₂



6.7 Schéma de principe pour les tests d'endurance



6.8 Photos de l'implantation pour les tests d'endurance



Essais d'endurance

Système de couplage chaleur-force (CCF) avec piston libre

Rapport de projet - AGP # 98914

Auteur

Tschumi Gabriel – Ing. HES Energie et Techniques Environnementales



Résumé

Cette étude a permis d'évaluer les performances énergétiques de 7 installations de couplage chaleur-force basée sur un moteur Stirling développées par l'entreprise Schmid Stirling GmbH. Développant des puissances moyennes électrique de 1,7 kW et thermique de 4,6 kW, les machines sont adaptées à la micro-cogénération. Elles présentent des efficacités globales de 84,5% (62% thermique et 22,5% électrique).

Une baisse générale de la puissance électrique et des efficacités, légèrement moins élevée par rapport à des essais datant de 2021, ont mis en évidence l'influence d'instabilités de fonctionnement du brûleur sur ces paramètres. Elles génèrent également des émissions de NO_x supérieures (en moyenne 85 mg·m⁻³ à 3% d'O₂) aux valeurs limites prescrites par l'OPair (80 mg·m⁻³). Par contre, les émissions de CO respectent les valeurs légales.

Une analyse de l'hydraulique des différentes installations montre que les quelques problèmes constatés n'ont pas d'influence significative sur le bilan d'une saison de chauffage.

Les performances prometteuses de l'installation Stirling Schmid, la pression croissante sur la décarbonisation de notre société et le nombre croissant de publications scientifiques sur le sujet justifie la poursuite du développement d'un tel système de micro-cogénération, mais cependant basé sur un vecteur énergétique renouvelable comme le bois.

Secrétariat

Avenue des Sports 20
Case postale 521
1401 Yverdon-les-Bains

Tél. : +41 (0)24 557 76 00
Courriel : info@heig-vd.ch

Table des matières

1	Introduction	4
2	Démarche et conditions de mesures.....	5
2.1	Machines testées	5
2.2	Détermination du pouvoir calorifique du gaz naturel.....	6
2.2.1	Analyse en laboratoire	6
2.2.2	Données Swissgas.....	7
2.2.3	Impact du pouvoir calorifique sur l'efficacité	7
2.2.4	Evaluation de l'instrumentation du terrain par rapport à celle du laboratoire	8
3	Résultats	10
3.1	Traitement des données et conditions d'analyses	10
3.2	Mesure de la puissance apportée par le gaz combustible.....	10
3.3	Efficacités	10
3.3.1	Définitions	10
3.3.2	Résultats et discussions	11
3.3.3	Efficacité exergetique	14
3.4	Puissances.....	15
3.4.1	Traitement des données et conditions d'analyses.....	15
3.4.2	Résultats et discussion	15
3.5	Composition des fumées	16
3.5.1	Valeurs limites OPair.....	16
3.5.2	Méthodologie de mesure.....	17
3.5.3	Comparaisons	17
3.6	Intégration hydraulique	19
3.6.1	Impact sur le Stirling.....	20
3.6.2	Volume de stockage idéal.....	21
4	Etat de l'art de la micro-cogénération avec moteur Stirling et brûleur à bois depuis 2018.....	23
5	Conclusion.....	24
6	Annexes.....	25
6.1	Concentrations minimales, moyennes et maximales en polluants	25
6.2	Emissions de polluants mesurés en laboratoire	27
6.3	Schéma de principe pour les tests d'endurance.....	28
6.3.1	SFM3-1	28
6.3.2	SFM3-2	29
6.3.3	SFM3-3	30
6.3.4	SFM3-4	31
6.3.5	SFM3-5 et SFM3-6	32
6.3.6	SFM3-7	33
	Bibliographie.....	34

Table des tableaux

Tableau 1 : Dénomination des différents Stirling installés sur le terrain avec leur emplacement et le type de combustible utilisé	5
Tableau 2 : Variabilité du pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel mesurée sur les stations de Zuzgen et Ruswil pour les années 2020 à 2022 (consulté le 05.05.2023 sur swissgas.ch/fr/informations/telechargements)	7
Tableau 3 : Valeurs limites de l'OPair pour le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azotes (NO _x)	16
Tableau 4 : Calibration de l'appareil de mesure des gaz de combustion	17

Table des illustrations/graphiques

Figure 1 : Schéma du réseau suisse de gaz naturel, avec, indiqué par les flèches rouges, les 2 points de mesures continues aux postes frontières de Zuzgen et Ruswil (source : swissgas.ch)	6
Figure 2 : Comparaison de l'efficacité totale pour différents pouvoir calorifique	8
Figure 3 : Comparaison des écarts entre l'instrumentation de laboratoire avec celle intégrée au Stirling.....	9
Figure 4 : Efficacités totale, thermique et électrique moyennées sur la période considérée pour chaque Stirling.....	11
Figure 5 : Comparaison entre les mesures laboratoire corrigées et les mesures terrain	12
Figure 6 : Evolution de l'efficacité électrique pour toutes les machines sur la période considérée avec, en rouge, la régression linéaire de l'efficacité électrique	13
Figure 7 : Comparaison de l'efficacité exergétique des Stirling avec une chaudière à gaz typique	15
Figure 8 : Comparaison des puissances fournies par le gaz et restituées sous forme thermique et électrique.....	16
Figure 9 : Concentration moyenne en monoxyde de carbone pour toutes les machines avec la valeur limite OPair	17
Figure 10 : Concentration moyenne en oxyde d'azote pour toutes les machines avec la valeur limite OPair	18
Figure 11 : Evolutions des températures de départ et de retour ainsi que la différence de température entre celles-ci pour toutes les installations suivies	20
Figure 12 : Schéma typique d'un système de chauffage.....	21
Figure 13 : Volume de stockage minimal pour un fonctionnement continu du Stirling pendant 3h en fonction de la température extérieure	22

1 Introduction

Produire simultanément de la chaleur et de l'électricité est la façon la plus efficace, au sens du 2^{ème} principe de la thermodynamique, d'exploiter le contenu énergétique d'un combustible. L'urgence climatique et la raréfaction de nos ressources imposent une utilisation efficiente de l'énergie. De plus, l'avènement des voitures électriques, la multiplication des pompes à chaleur, l'arrêt de la production d'électricité d'origine nucléaire et l'accroissement continu de la consommation électrique lié à l'informatique favorisent la production d'énergie électrique locale et si possible renouvelable. C'est en ce sens qu'il apparaît opportun de développer des solutions permettant la couverture des besoins à la fois thermique et électrique, et en particulier les couplages chaleur-force (CCF).

Ce rapport fait suite à une précédente étude caractérisant le groupe de cogénération basé sur un Stirling à résonance fabriqué par Schmid Stirling GmbH. Après les essais réalisés dans un cadre connu et contrôlé (laboratoire de l'Institut de Génie Thermique (IGT) de la HEIG-VD) sur un exemplaire du Stirling, il s'agissait de réaliser des tests d'endurance en conditions réelles. Pour ce faire, la société Schmid Stirling GmbH a installé et exploité 7 machines identiques sur 6 sites différents pendant environ 2 ans.

La présente étude a pour vocation d'évaluer, d'un point de vue énergétique, les différences rencontrées lors des tests sur le terrain.

Quatre objectifs principaux en ressortent :

- Dans le but de valider la méthodologie de mesure, il s'agit dans un premier temps **de comparer l'instrumentation intégrée aux Stirling à celle employée lors des essais en laboratoire** ;
- Les essais sur le terrain impliquent un environnement non contrôlé, notamment en ce qui concerne la composition du gaz naturel. Celle-ci n'est pas connue et a un impact indéterminé sur le calcul des efficacités des différentes machines. Il s'agit d'**évaluer l'impact de la composition du gaz naturel sur les différentes grandeurs évaluées** ;
- Il s'agit d'autre part d'évaluer et comparer les données des 7 Stirling installés basé sur 3 paramètres :
 - Evolution des **puissances absorbée (gaz) et fournies** (électricité + chaleur) par les groupes de cogénération ;
 - Evolution des **efficacités électrique, thermique et globale** ;
 - **Emissions des gaz polluants** (essentiellement CO et NO_x).
- Finalement, il s'agit d'**évaluer les différentes intégrations hydrauliques et d'établir leurs potentielles influences sur les puissances et/ou les efficacités**.

En marge du suivi des machines, une courte étude de la littérature scientifique permettra de mettre à jour l'étude sur le potentiel des technologies de brûleur à bois utilisées en association avec un moteur Stirling pour la micro-cogénération [1] réalisé en 2018.

2 Démarche et conditions de mesures

2.1 Machines testées

Ce sont 7 Stirling identiques qui ont été installés et exploités sur 6 sites différents. Toutes les machines sont équipées d'une instrumentation de mesure permettant de suivre à distance leur performance. La SFM3-2 bénéficie en outre d'une instrumentation complémentaire externe, à savoir, celle employée pour la mesure des performances dans le laboratoire de l'institut de Génie thermique (IGT).

Les machines sont toutes installées sur des réseaux hydrauliques avec leurs propres spécificités et des températures de réseau de chauffage différentes et adaptées aux besoins du client.

Tableau 1 : Dénomination des différents Stirling installés sur le terrain avec leur emplacement et le type de combustible utilisé

Dénomination du Stirling	Combustible	Emplacement
SFM3-1	Gaz naturel	Grenchen (SO)
SFM3-2	Gaz naturel	Yverdon-les-Bains (VD)
SFM3-3	Gaz naturel	Bienne (BE)
SFM3-4	Gaz naturel	Genève (GE)
SFM3-5	Propane	Thörishaus (BE)
SFM3-6	Propane	Thörishaus (BE)
SFM3-7	Gaz naturel	Saint-Gall (SG)

2.2 Détermination du pouvoir calorifique du gaz naturel

La principale différence entre les essais réalisés en laboratoire et le suivi sur le terrain se situe au niveau de la composition du gaz naturel. Alors qu'elle était connue en laboratoire, elle peut être soumise à une variabilité inconnue lorsque le gaz naturel est extrait du réseau suisse, en raison de ses origines diverses (Russie, Moyen Orient, Afrique du Nord, ...).

En Suisse, il existe 2 postes frontières au niveau desquels une mesure continue du gaz naturel est réalisée (cf. Figure 1). Les données sont mises à disposition par Swissgas sous forme de valeurs annuelles agrégées. Il est possible de retrouver, entre autres, la moyenne annuelle du pouvoir calorifique inférieur ainsi que les valeurs minimales et maximales. Le Tableau 2 synthétise ces données.

Les mesures effectuées aux deux postes frontières concernent principalement le gaz venant du Sud (Italie) et du Nord (Allemagne) mais d'autres interconnexions notamment à l'Ouest (France) augmente la mixité du gaz présent dans le réseau.

Outre une variabilité géographique, une variabilité temporelle est également possible, avec, une composition qui n'est pas nécessairement identique tout au long de l'année.

En raison de cette grande diversité, des mesures locales de la composition du gaz naturel sont prévues.



Figure 1 : Schéma du réseau suisse de gaz naturel, avec, indiqué par les flèches rouges, les 2 points de mesures continues aux postes frontières de Zuzgen et Ruswil (source : swissgas.ch)

2.2.1 Analyse en laboratoire

C'est en ce sens que plusieurs prélèvements de gaz naturel ont été réalisés sur le site d'Yverdon-les-Bains (Stirling SFM3-2) en 2021 avec comme objectif, l'analyse dans le laboratoire de l'IGT de sa composition au moyen de l'instrumentation disponible. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide de poche en plastique spécifiquement dédié à l'échantillonnage de gaz.

Les analyses réalisées sont semi-quantitatives et basées sur un chromatographe en phase gazeuse (GC) avec, comme seul gaz de calibration, un échantillon du gaz naturel utilisé précédemment sur le Stirling et dont la composition était connue.

Ces mesures n'ont pas donné de résultat concluant avec des différences de plus de 10% sur la teneur en méthane pour le même échantillon mesuré en triplicata. Et pour cause, la méthode de mesure et de calibration des principaux composants sont insuffisants pour la précision voulue. La méthode et les standards de calibration disponibles dans le laboratoire de l'IGT n'étant pas suffisant pour déterminer le pouvoir calorifique du gaz naturel avec précision, il a été décidé d'utiliser et d'étudier la variabilité des données disponibles mise à disposition par Swissgas.

2.2.2 Données Swissgas

Le Tableau 2 montre la variabilité du pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel mesurée dans les postes frontières de Zuzgen et Ruswil. Pour la période qui intéresse le projet (2022), les moyennes mesurées dans les 2 stations sont très proches. Les valeurs minimales et maximales le sont également. Il est possible d'observer des écarts relatifs maximum et minimum de, respectivement, 1,1% et -0,58%. Cela reste relativement réduit et acceptable pour l'étude menée ici. Le chapitre suivant traite de l'impact de cette variabilité sur l'efficacité mesurée.

Tableau 2 : Variabilité du pouvoir calorifique inférieur du gaz naturel mesurée sur les stations de Zuzgen et Ruswil pour les années 2020 à 2022 (consulté le 05.05.2023 sur [swissgas.ch/fr/informations/telechargements](https://www.swissgas.ch/fr/informations/telechargements))

Lieu de mesure	Zuzgen			Ruswil		
	PCi [kWh·m ⁻³]	Δabs.	Δrel.	PCi [kWh·m ⁻³]	Δabs.	Δrel.
2020						
Moyenne	10.30			10.33		
Min	10.26	-0.04	-0.39%	10.26	-0.07	-0.68%
Max	10.36	0.06	0.58%	10.33	0	0.00%
2021						
Moyenne	10.24			10.24		
Min	10.17	-0.07	-0.68%	10.17	-0.07	-0.68%
Max	10.37	0.13	1.27%	10.34	0.1	0.98%
2022						
Moyenne	10.37			10.36		
Min	10.31	-0.06	-0.58%	10.32	-0.04	-0.39%
Max	10.46	0.09	0.87%	10.47	0.11	1.06%

2.2.3 Impact du pouvoir calorifique sur l'efficacité

Il est possible de calculer des efficacités globales avec des pouvoirs calorifiques différents. En considérant l'année 2022, la valeur la plus basse mesurée est de 10,31 kWh/m³, celle la plus élevée 10,47 kWh/m³ et la moyenne des 2 stations 10,37 kWh/m³.

La Figure 2 donne l'efficacité globale calculée à partir des 3 valeurs précitées pour toutes les machines fonctionnant au gaz naturel. Les SFM3-5 et 6 fonctionnent au propane et ne sont donc pas prises en considération.

Les écarts absolus affichés sur la Figure 2 sont à chaque fois inférieurs à 1 point de % et les écarts relatifs (-0,5% et +1,0%) restent très contenus. Même si des valeurs instantanées comprises hors de cette plage sont possibles, ces écarts sont considérés acceptables pour les analyses ultérieures. Un pouvoir calorifique inférieur de **10,365 kWh/m³** sera utilisé pour les chapitres suivants, sauf mention contraire.

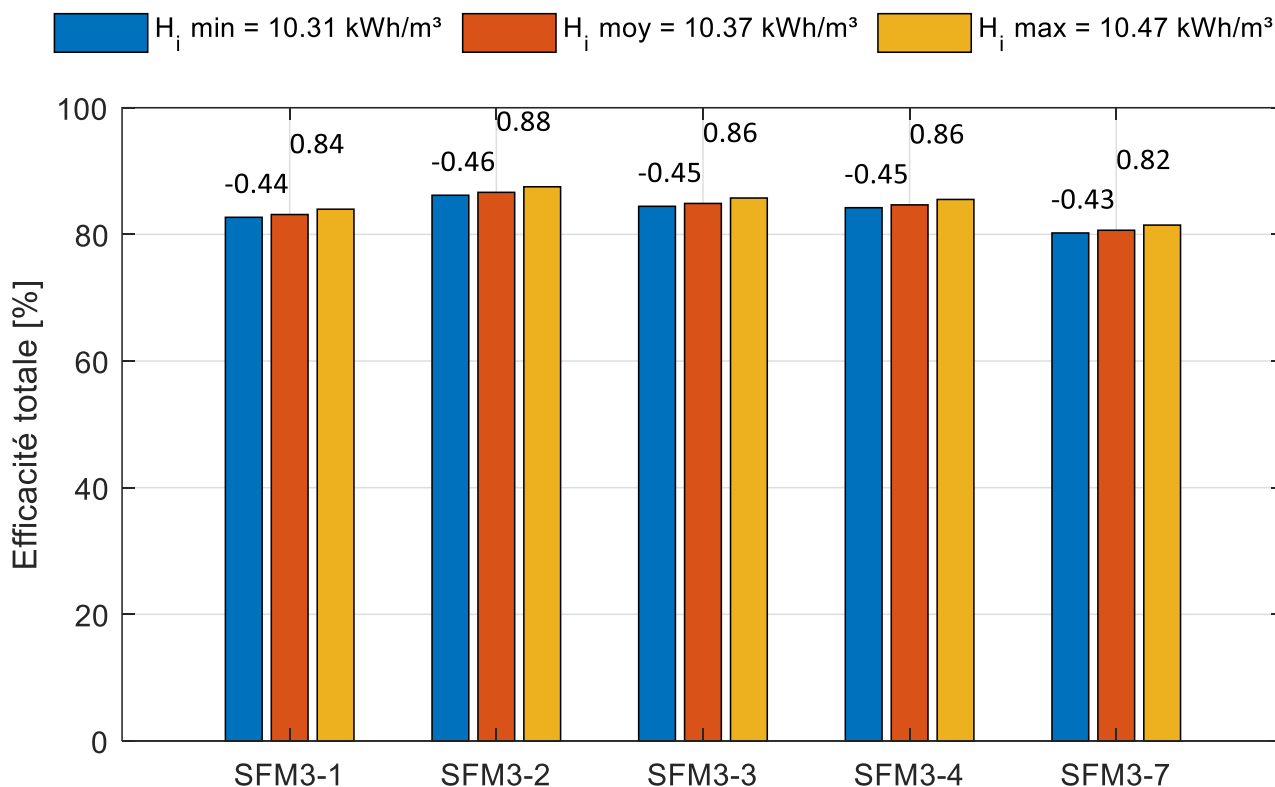


Figure 2 : Comparaison de l'efficacité totale pour différents pouvoir calorifique

2.2.4 Evaluation de l'instrumentation du terrain par rapport à celle du laboratoire

Une des sept machines (SFM3-2) a déjà été testée en laboratoire sur une installation dédiée dans des conditions contrôlées (pouvoir calorifique du gaz naturel connu). Les tests ont déjà été consignés dans un rapport séparé¹. La machine SFM3-2 a ensuite été installée chez un particulier avec la même instrumentation que celle en laboratoire. La seule différence réside dans l'indétermination de la composition exacte du gaz naturel pour les essais sur le terrain. La présente section traite de l'écart entre l'instrumentation de laboratoire et celle intégrée au Stirling. Les autres machines étant dépourvues d'une instrumentation externe, l'objectif est de valider l'instrumentation interne et, le cas échéant, de quantifier un éventuel écart.

L'instrumentation de laboratoire est composée d'éléments certifiés pour le comptage de la grandeur mesurée.

La comparaison se base sur les grandeurs mesurées caractéristiques permettant d'établir un bilan énergétique à savoir :

- Le débit de gaz entrant dans la machine ;
- La puissance électrique en sortie de l'armoire électrique ;
- La puissance thermique fournie.

Un écart relatif entre l'instrumentation du laboratoire et celle intégrée a été calculé pour chacune de ces grandeurs. Un écart relatif sur l'efficacité totale est également calculé sur la période considérée pour voir l'impact global des différences de mesures (voir La Figure 3).

¹ Gabriel Tschumi, « Caractérisation d'un Stirling à résonance », Rapport de projet AGP #98914, 2021, disponible en annexe du rapport principal du projet OFEN SI/501934 « Der Freikolben-Resonanzstirling »

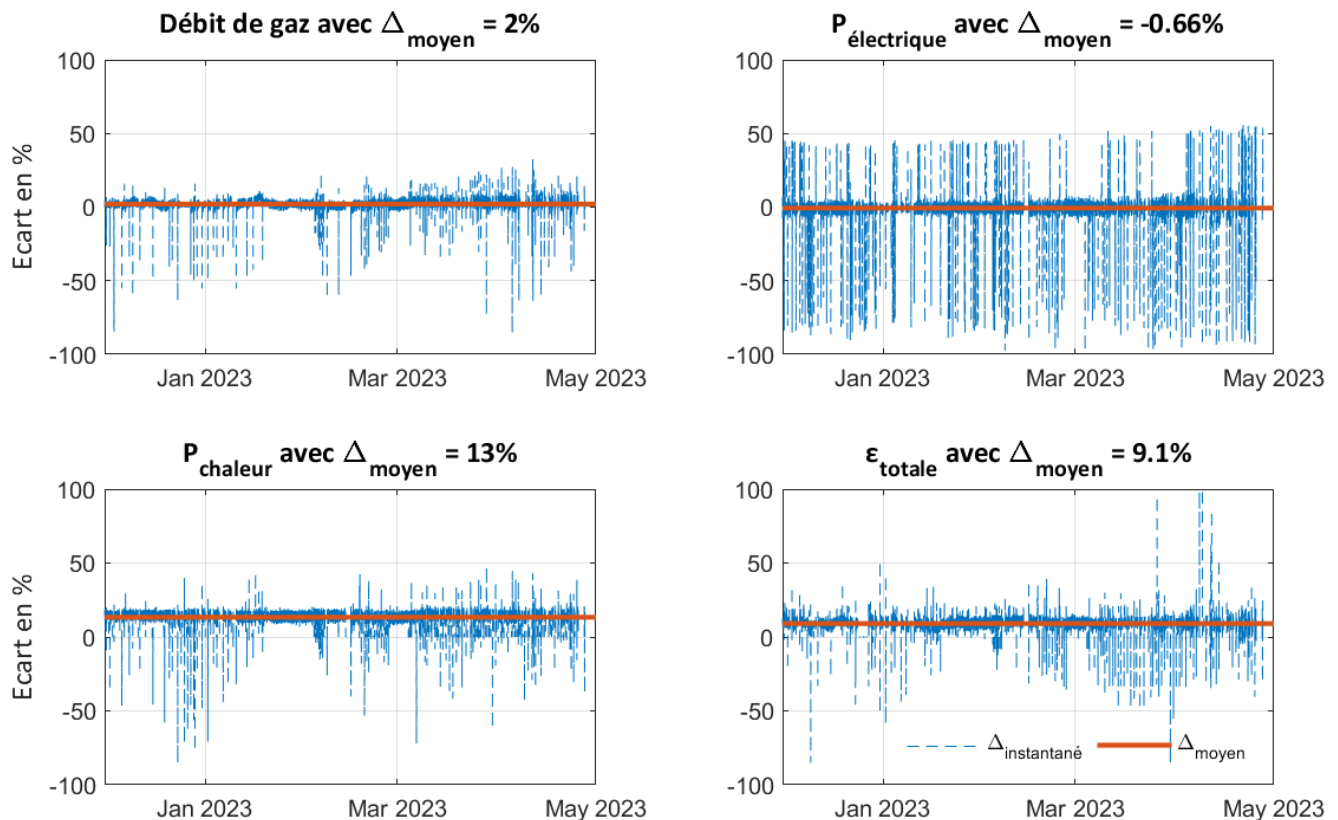


Figure 3 : Comparaison des écarts entre l'instrumentation de laboratoire avec celle intégrée au Stirling

Sur chaque courbe, il est possible de constater ponctuellement des pics sur les écarts. Ils apparaissent dans les phases instationnaires lors des démarrages et arrêts de la machine, notamment, en raison d'une synchronisation imparfaite des mesures.

Le calcul des écarts moyens sur toute la période montre cependant que ces pics ponctuels n'ont pas beaucoup d'impact. C'est pour la puissance électrique que la différence est la plus faible (<1%). Ceci grâce à une bonne précision des instruments mesurant la tension et le courant électrique.

C'est n'est pas le cas de la puissance thermique (écart >10%) pour laquelle il est nécessaire d'avoir une instrumentation calibrée. La chaleur se mesure à l'aide d'un débitmètre et de deux sondes de températures. Si ces dernières offrent une précision de $\pm 1^\circ\text{C}$ et la différence de température mesurée s'élève à 10 K, l'écart relatif maximal peut atteindre 20%.

L'écart de mesure sur le débit de gaz (2%) est tout à fait acceptable, ce qui est moins le cas pour l'efficacité globale (écart d'environ 9%) qui est péjorée par la précision de mesure de la puissance thermique. Pour diminuer l'écart, il serait nécessaire de calibrer les sondes de températures intégrées au Stirling.

3 Résultats

3.1 Traitement des données et conditions d'analyses

D'entente avec Schmid Stirling GmbH, la période d'observation considérée pour l'analyse des données s'étend du 01.12.2022 au 31.04.2023.

Les essais d'endurance des 7 machines sont conduits en conditions réelles avec, comme corollaire, des arrêts et démarrages dépendant, la plupart du temps, des besoins en chaleur. Ces phases instationnaires ont une proportion limitée par rapport au fonctionnement stationnaire. Les données doivent ainsi être triées pour tenir compte uniquement de mode de fonctionnement.

Le statut de la machine (« Maschinenstatus ») est un paramètre calculé par la régulation interne au Stirling. Seules les données correspondant au mode de fonctionnement « Laufenderbetrieb » sont utilisées.

3.2 Mesure de la puissance apportée par le gaz combustible

Sur les 7 machines, 5 fonctionnent au gaz naturel et 2 au propane (SFM3-5 et SFM3-6). Le débitmètre installé sur les Stirling est calibré pour du gaz naturel.

Pour les machines fonctionnant au propane, des mesures comparatives ont été réalisées à l'aide d'un débitmètre massique calibré pour le propane. Un modèle permet d'obtenir une courbe de calibration pour le propane.

Pour les machines fonctionnant au gaz naturel, le débitmètre mesure et corrige directement le débit dans les conditions normales. Le pouvoir calorifique employé pour la suite est une moyenne des pouvoirs calorifiques inférieurs moyens mesurés dans les stations de Zuzgen et Ruswil en 2022 (cf. §2.2.2) à savoir 10,365 kWh/m³.

3.3 Efficacités

3.3.1 Définitions

L'efficacité électrique est définie par le rapport entre la puissance électrique produite par le Stirling et la puissance apportée par le gaz combustible basé sur le pouvoir calorifique inférieur (voir Équation 1).

Équation 1

$$\varepsilon_{\text{électrique}} = \frac{P_{\text{électrique}}}{\dot{v}_{\text{gaz}} \cdot H_i}$$

Avec :

$P_{\text{électrique}}$: Puissance électrique moyenne à l'entrée de l'armoire électrique du Stirling [kW]

\dot{v}_{gaz} : Débit de gaz dans les conditions normales de pression et température [m³_N/h]

H_i : Pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible [kWh/m³_N]

L'efficacité thermique est définie par le rapport entre la puissance thermique produite par le Stirling et la puissance apportée par le gaz combustible (voir Équation 2).

Équation 2

$$\varepsilon_{\text{thermique}} = \frac{P_{\text{thermique}}}{\dot{v}_{\text{gaz}} \cdot H_i}$$

Avec :

$P_{\text{thermique}}$: Puissance thermique moyenne produite par le Stirling [kW]

\dot{v}_{gaz} : Débit de gaz dans les conditions normales de pression et température [m³_N/h]

H_i : Pouvoir calorifique inférieur du gaz combustible [kWh/m³_N]

L'efficacité totale est définie par la somme des efficacités thermique et électrique (voir Équation 3).

Équation 3

$$\varepsilon_{\text{totale}} = \varepsilon_{\text{thermique}} + \varepsilon_{\text{électrique}}$$

3.3.2 Résultats et discussions

La Figure 4 montre les efficacités électrique, thermique et totale moyennées sur la période considérée pour chaque Stirling. La courbe bleue correspond à l'efficacité thermique moyenne des 7 machines. La courbe bleue claire en trait discontinu montre l'écart entre l'instrumentation de référence et celle intégrée au Stirling. Il s'agit, en quelque sorte, d'une incertitude de mesure non pas liée aux caractéristiques des appareils mais par rapport à un appareil de référence.

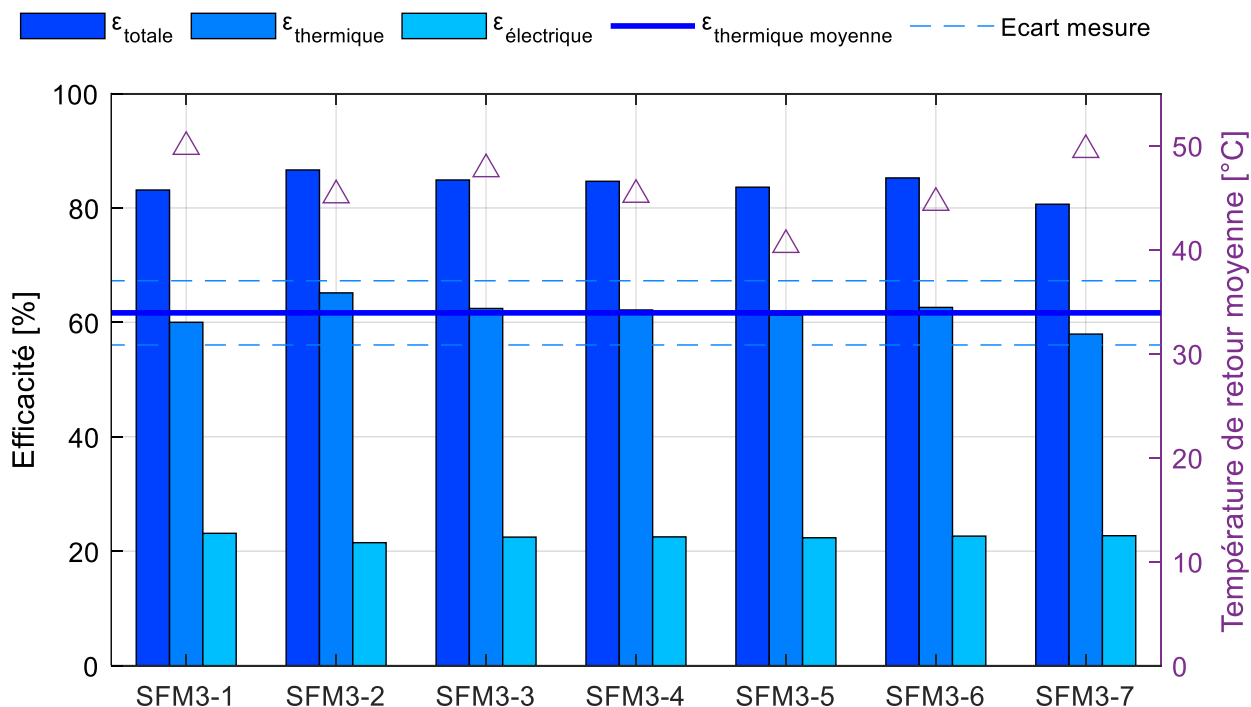


Figure 4 : Efficacités totale, thermique et électrique moyennées sur la période considérée pour chaque Stirling

Il est possible de constater que les efficacités thermiques des différentes machines sont comprises dans cette « incertitude de mesure ». Cela signifie que les écarts d'efficacités des 7 machines ne sont pas statistiquement différenciables. Il faut comprendre par-là que l'incertitude de mesure peut, à elle seule, expliquer des valeurs non identiques.

Deux paramètres devraient avoir une influence significative sur l'efficacité thermique. Il n'est toutefois pas possible de le prouver avec les mesures à disposition. Il s'agit de :

- La température de retour du réseau de chauffage : comme montré dans le premier rapport, elle a une influence directe sur l'efficacité thermique puisque plus elle est basse, plus la condensation de vapeur d'eau dans les gaz de fumées est importante. Il faudrait toujours privilégier des températures de retour les plus basses possible. Une légère tendance se dégage de la Figure 4 avec des efficacités thermiques plus faible pour les températures de retour plus élevée (machines SFM3-1 et SFM3-7).
- La configuration du réseau hydraulique : l'interaction hydraulique avec les autres producteurs de chaleur, la taille d'accumulation de chaleur en rapport avec la demande en puissance pour le chauffage sont des facteurs pouvant entraîner des arrêts et démarrages nombreux. Plus ceux-ci sont récurrents, plus l'efficacité diminue. Le sujet est traité plus en détail dans le §3.6 *Intégration hydraulique*.

Les écarts d'efficacité électrique entre les différentes machines ne sont pas très importants et peuvent être expliqués par les températures du réseau de chauffage différentes. En revanche, il existe une différence d'efficacité électrique importante entre les mesures terrain et celles réalisées dans une étude préalable en 2021. Avec une moyenne pour toutes les machines de 22,5% contre ~26% mesuré en laboratoire, c'est près de 13% d'écart relatif.

L'écart entre mesures terrain et mesures laboratoire est plus contenu pour la puissance globale. Et les différences entre les machines s'expliquent par les efficacités thermiques qui varient en fonction des paramètres discutés ci-dessus.

Comme évoqué lors de la précédente étude, une partie des pertes thermiques sont employées pour chauffer le bâtiment si le local technique se trouve dans l'enveloppe chauffée. Celles-ci se présentent essentiellement sous la forme de rayonnement et de convection au niveau des parois de la machine. Elles sont comprises entre 2% et 4%.

La Figure 5 offre une comparaison entre les mesures effectuées dans le laboratoire de l'institut de Génie thermique en 2021 et les mesures du terrain plus détaillées. Les graphiques sur la gauche présentent les différences absolues et ceux sur la droite, les différences relatives. Pour correspondre aux données du terrain, une régression linéaire des valeurs du laboratoire (efficacités en fonction de la température de retour) a été effectuée dans le but de les corriger avec les mesures de températures de retour du terrain.

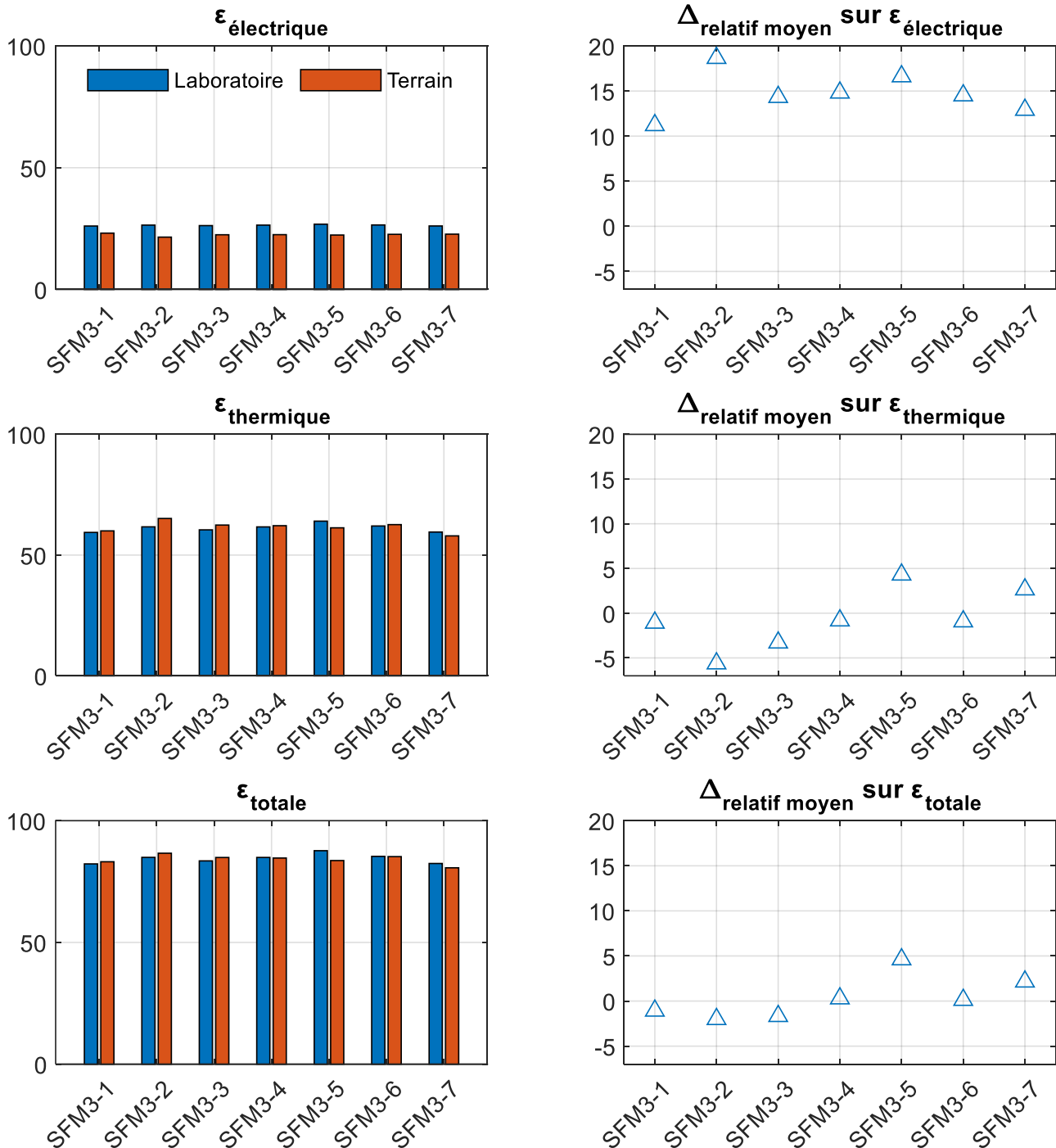


Figure 5 : Comparaison entre les mesures laboratoire corrigées et les mesures terrain

Les écarts relatifs restent acceptables (<5%) pour les efficacités totale et thermique. Ils restent dans l'ordre de grandeur des disparités liées aux erreurs de mesure. Ils sont, en revanche, plus importants pour l'efficacité électrique. Le graphique montre une perte d'efficacité électrique de l'ordre de 14,7% en moyenne.

La Figure 6 montre l'évolution de l'efficacité électrique pour tous les Stirling sur la période de décembre 2022 à avril 2023. La courbe rouge est une régression linéaire des valeurs instantanées d'efficacité électrique. Le chiffre, dans la légende, indique la différence absolue d'efficacité entre le premier et le dernier point (espacés d'environ 5 mois). Un chiffre négatif indique une baisse d'efficacité.

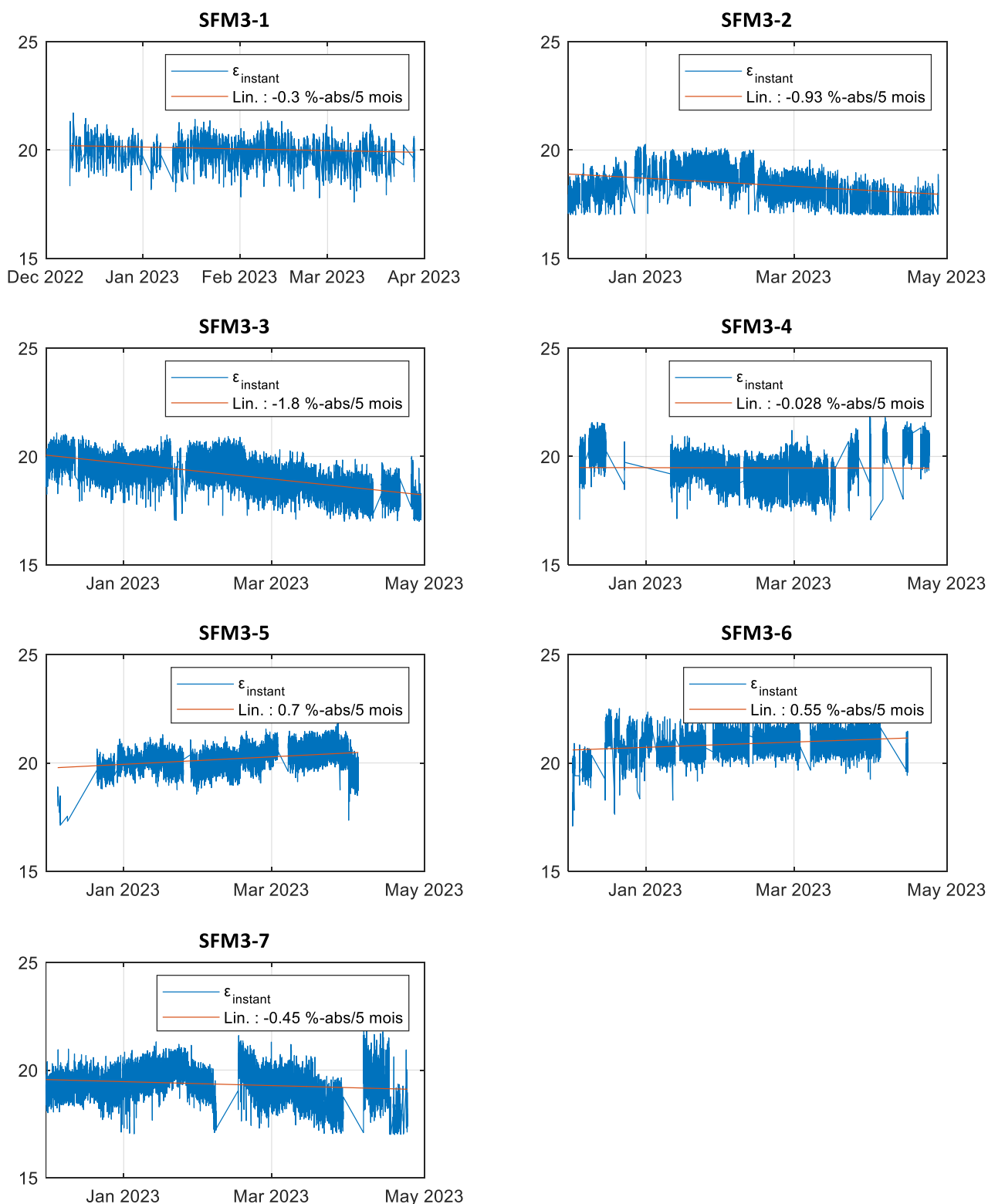


Figure 6 : Evolution de l'efficacité électrique pour toutes les machines sur la période considérée avec, en rouge, la régression linéaire de l'efficacité électrique

On observe une baisse d'efficacité électrique pour toutes les machines sauf celles installées dans les locaux de Schmid AG (SFM3-5 et SFM3-6) qui fonctionne au propane et bénéficient d'une augmentation. Une évolution progressive de la composition du gaz naturel n'est pas à exclure alors que celle du propane reste stable.

Cette baisse d'efficacité explique peut-être, en partie tout du moins, l'écart important entre les mesures effectuées en laboratoire en 2021 et les mesures terrain durant la période d'observation de décembre 2022 à avril 2023.

Schmid Stirling a été confrontés à beaucoup d'instabilités au niveau du fonctionnement du brûleur qui n'ont pas pu être résolues dans le cadre de ces essais. Un rapport réalisé dans le cadre d'un chèque d'innovation INNOSUISSE par M. Baillifard² consigne ces problèmes. Ils semblent qu'ils aient des répercussions directes sur les efficacités mais également sur les émissions de polluants.

3.3.3 Efficacité exergetique

En toute rigueur, thermodynamiquement parlant, l'addition de puissance thermique et électrique ne fait pas sens puisqu'elles n'ont pas la même « valeur » énergétique. Une pondération, appelé, facteur de Carnot (voir Équation 4) permet une comparaison correcte d'un point de vue thermodynamique. Celui-ci dépend de la température ambiante et de la température du fluide du procédé considéré.

Dans notre cas, et pour simplifier les comparaisons, une température ambiante moyenne de 0°C est fixé. La température du procédé est la température moyenne de l'eau en sortie de la machine.

Équation 4

$$\eta_{\text{exergetique}} = \frac{\dot{Q}_{th} \cdot \left(1 - \frac{T_a}{T_i}\right) + \dot{E}_{el}}{\dot{Q}_{gaz}}$$

Avec :

\dot{Q}_{th} = Puissance thermique moyenne [kW]

T_a = Température ambiante moyenne [K]

T_i = Température de production de la prestation [K]

\dot{E}_{el} = Puissance électrique moyenne [kW]

\dot{Q}_{gaz} = Puissance moyenne apportée par le gaz [kW]

Un couplage chaleur-force comme le Stirling étudié fournit de l'énergie sous forme de chaleur et d'électricité à partir de gaz naturel. Une chaudière à gaz fournit, quant à elle, uniquement de l'énergie sous forme de chaleur à partir du même vecteur énergétique.

Une comparaison des deux types de machines sans facteur de Carnot dévalue le couplage chaleur-force au profit de la chaudière ($\varepsilon_{\text{Stirling}} = \sim 90\%$ vs $\varepsilon_{\text{chaudière}} = \sim 100\%$).

La Figure 7 montre une comparaison de l'efficacité **exergetique** des différentes machines avec une chaudière à gaz à condensation typique. Pour cette dernière, une efficacité de 100% (sur base du pouvoir calorifique inférieur) a été considérée.

Avec 16,4% de différence absolue en moyenne, il s'agit de près de la moitié du potentiel perdue lorsqu'aucune production d'électricité n'est prévu.

² M.-A Baillifard, InnoFloxStirling – 55880.1 INNO-ENG, 2022

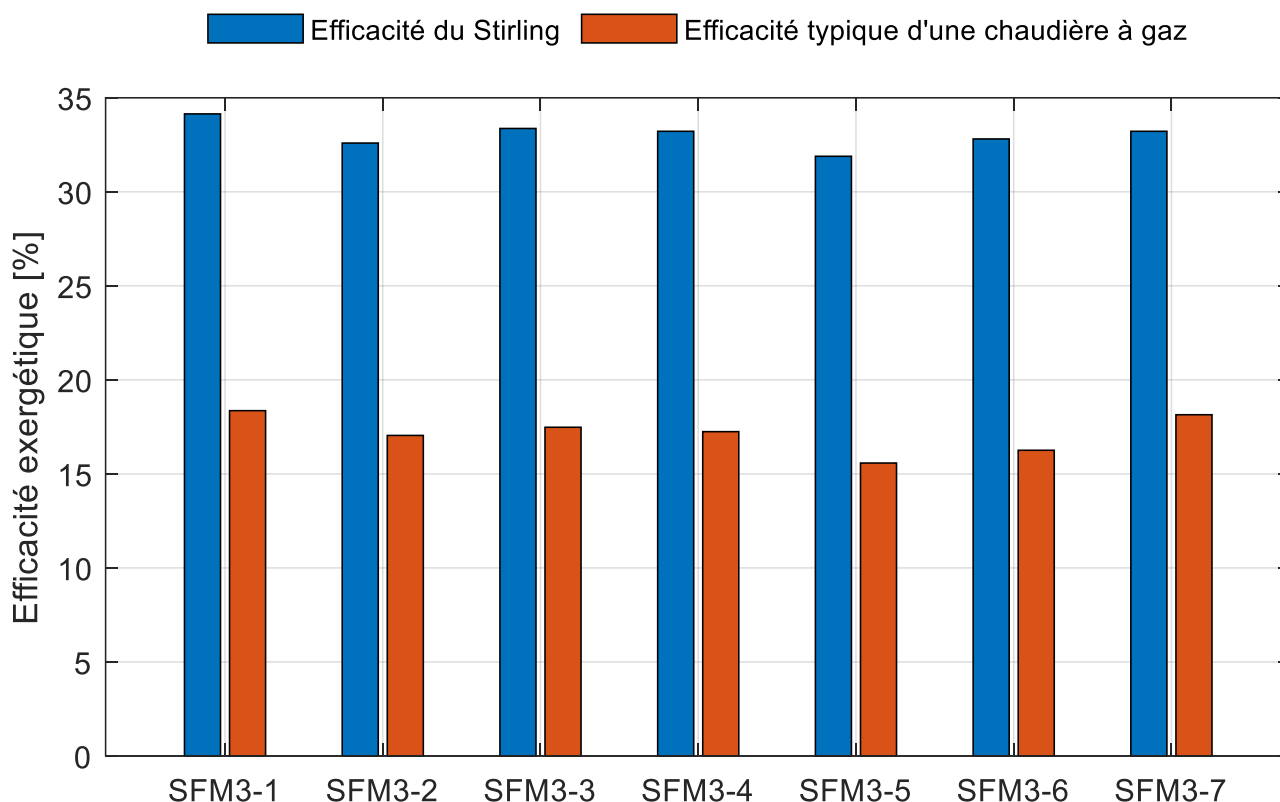


Figure 7 : Comparaison de l'efficacité exergetique des Stirling avec une chaudière à gaz typique

3.4 Puissances

3.4.1 Traitement des données et conditions d'analyses

Les puissances présentées dans ce chapitre sont utilisées pour le calcul des efficacités du §3.3. Une moyenne est calculée sur toute la période de référence (01.12.22 – 30.04.23). Les barres d'erreur représentent un intervalle de confiance comprenant 95% de la valeur moyenne. Elles donnent une idée de la dispersion des mesures.

Une puissance gaz est fournie par l'instrumentation intégrée. Elle est calculée sur la base des données brutes d'un débitmètre calibré pour le gaz naturel. Pour les machines fonctionnant au gaz naturel (SFM3-1, 2, 3, 4 et 7), le débit est obtenu par calcul à partir de la puissance gaz, puis multiplié par le pouvoir calorifique de référence (10,365 kWh/m³). Pour celles fonctionnant au propane (SFM3-5 et 6), des mesures comparatives ont été effectuées par Schmid Stirling GmbH à l'aide d'un débitmètre de référence pour le propane. Un modèle a été implémenté, basé sur ces mesures. Le pouvoir calorifique inférieur utilisé pour le propane est de 12,87 kWh/kg.

Les valeurs brutes des puissances thermique et électrique sont utilisées. Seules les données en entrée de l'armoire électrique sont analysées dans ce chapitre. La consommation électrique des auxiliaires et de la régulation n'est pas prise en compte.

3.4.2 Résultats et discussion

La Figure 8 apporte un aperçu global des puissances en jeu pour chaque machine. On retrouve, en bleu, la puissance apportée par le gaz (gaz naturel ou propane), en rouge la puissance thermique restituée au réseau de chauffage et en jaune la puissance électrique produite par le moteur.

Concernant la puissance gaz, il existe une disparité assez importante entre les Stirling. On observe une différence de 16% entre la plus petite puissance (6,7 kW) et celle la plus élevée (8 kW). Cet écart aura, dans une moindre mesure, un impact sur les autres puissances en jeu puisqu'elles en sont la résultante. Cette disparité est essentiellement due aux réglages effectués par Schmid Stirling GmbH.

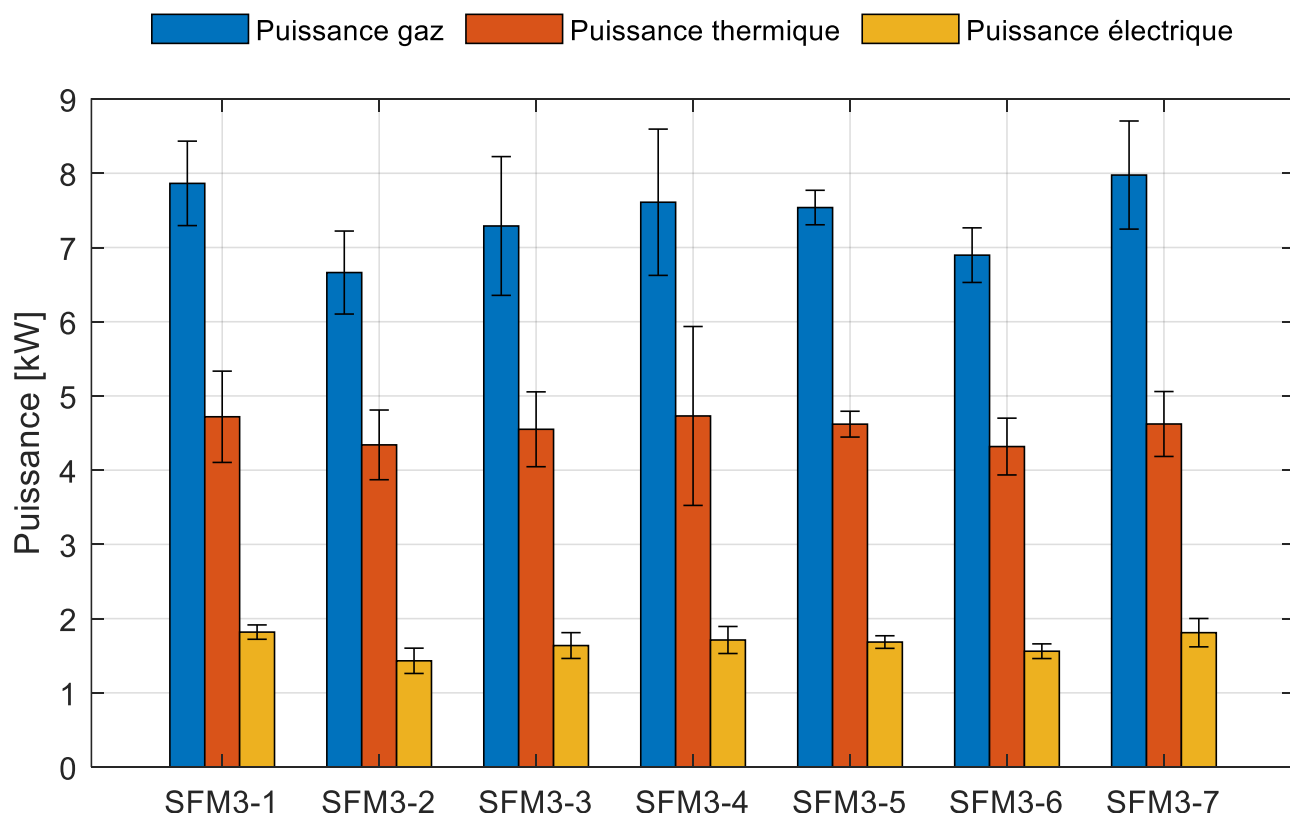


Figure 8 : Comparaison des puissances fournies par le gaz et restituées sous forme thermique et électrique

Pour la puissance thermique, l'écart entre la valeur minimale (4,3 kW) et maximale (4,7 kW) est un peu plus faible (~8,7%) par rapport à celui observé sur la puissance gaz. Elle se situe dans l'ordre de grandeur des essais réalisés en laboratoire (~4,5 kW). Comme expliqué dans le §3.3.2, il est difficile d'évaluer l'impact d'un paramètre sur la puissance thermique en raison de l'instrumentation qui n'est pas suffisamment précise.

Les puissances électriques suivent la même tendance que la puissance gaz mais de manière atténuée. La différence relative entre la valeur minimale (1,4 kW) et maximale (1,8 kW) est plutôt élevée (~21%). Une faible variation absolue rapportée à de petits chiffres engendre un écart relatif élevé. Les puissances électriques relevées sur le terrain (~1,66 kW en moyenne) sont un peu plus faibles que celles constatées en laboratoire (~1,78 kW en moyenne). Le §3.3.2 a mis en évidence une petite dérive de l'efficacité électrique dans le temps qui explique probablement cette différence. L'origine de cette dernière est, comme indiqué dans le §3.3.2, probablement due aux instabilités rencontrées au niveau du brûleur.

3.5 Composition des fumées

3.5.1 Valeurs limites OPair

Les valeurs limites (VL) fixées par l'Ordonnance fédérale sur la protection de l'air (OPair) diffèrent si l'on considère le Stirling comme un moteur à combustion stationnaire (Annexe 2, Chapitre 82) ou une installation de combustion alimentée au gaz (Annexe 3, Chapitre 6). Le Tableau 3 présente les valeurs limites pour le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote pour ces 2 catégories. Après confirmation auprès de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), ce sont les valeurs limites des installations de combustion alimentées au gaz qui sont pertinentes dans notre cas puisque la source de chaleur du moteur est externe et qu'il s'agit d'un brûleur à gaz.

Tableau 3 : Valeurs limites de l'OPair pour le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azotes (NO_x)

Catégorie de machine	VL CO [mg/Nm ³]	VL NO _x [mg/Nm ³]
Installations de combustion alimentées au gaz	100 rapporté à 3% d'O ₂	80 rapporté à 3% d'O ₂
Moteurs à combustion stationnaire	650 rapporté à 5% d'O ₂	250 rapporté à 5% d'O ₂

3.5.2 Méthodologie de mesure

Les mesures sur le terrain ont été réalisées par M. Anderegg de la société Schmid Stirling GmbH. L'appareil employé, un Anapol EU-5000-O, est approprié pour le contrôle des installations de ce type et a été contrôlé la dernière fois par le fabricant le 27.09.2021.

Un contrôle a été réalisé le 23.02.2023 dans notre laboratoire à partir de gaz de calibration Carbagas avec certificat de composition.

Le Tableau 4 résume les résultats de calibration qui sont considérés comme conformes et acceptables pour le contrôle des installations. Les mesures restent d'ailleurs dans les tolérances de précision des capteurs annoncés par le fabricant.

Tableau 4 : Calibration de l'appareil de mesure des gaz de combustion

Gaz	Mesure Anapol	Précision capteurs Anapol	Gaz de calibration
O ₂	12.2 %	±0,4%	12.5 %
CO	993 ppm	± 10%, min. ± 12 ppm	994 ppm
NO _x	406 ppm	± 10%, min. ± 10 ppm	394 ppm

3.5.3 Comparaisons

La Figure 9 donne la concentration moyenne de CO pour les 7 machines installées. Les barres d'erreurs correspondent à un intervalle de confiance comprenant 95% de la valeur moyenne. Elles donnent une idée de la dispersion des mesures. L'annexe 6.1 montre également les valeurs extrêmes pour le monoxyde de carbone et les oxydes d'azote.

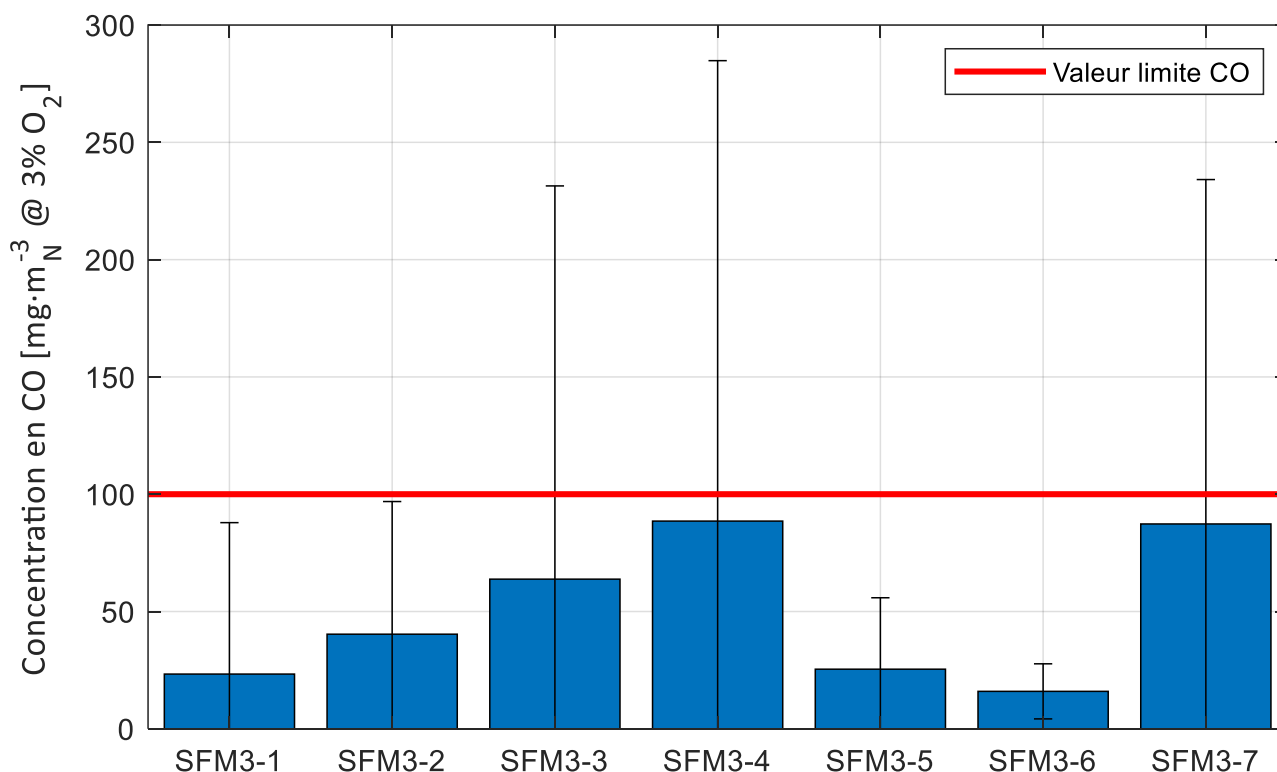


Figure 9 : Concentration moyenne en monoxyde de carbone pour toutes les machines avec la valeur limite OPair

Toutes les moyennes se trouvent en dessous de la valeur limite fixée par l'OPair. Certaines mesures peuvent, ponctuellement, dépasser la limite notamment pour les machines SFM3-3, 3-4 et 3-7, peut-être lors de régime transitoire ou en raison de réglage différents.

Ces chiffres montrent cependant qu'avec les bons réglages, le brûleur a le potentiel d'émettre du CO en dessous de la valeur limite OPair.

Les oxydes d'azote sont, eux, plus élevés et dépassent la valeur limite pour la majorité des machines (SFM3-1, 3-2, 3-3 et 3-4). Si une partie de la formation des NO_x peut venir du combustible, la majeure partie provient probablement d'origine thermique. Plus la température dans la chambre de combustion est élevée, plus il y a formation de NO_x dit « thermique ».

Une température plutôt élevée est cependant souhaitable thermodynamiquement parlant pour augmenter l'efficacité globale du cycle moteur. Des problèmes d'instabilité du brûleur ont également été relevés (cf. §3.3.2) entraînant des émissions de CO et NO_x plus élevées qu'attendues. Le manque de recirculation au niveau du brûleur FLOX peut entraîner une augmentation de la formation de NO_x.

Il est important de noter que lors des essais réalisés en laboratoire (cf. Annexe 6.2), aucune mesure ne dépassait les valeurs limites. Cependant, l'influence des réglages du brûleur sur les émissions avait déjà été remarquée. L'instrumentation était différente et les capteurs utilisés en laboratoire offrent une meilleure précision.

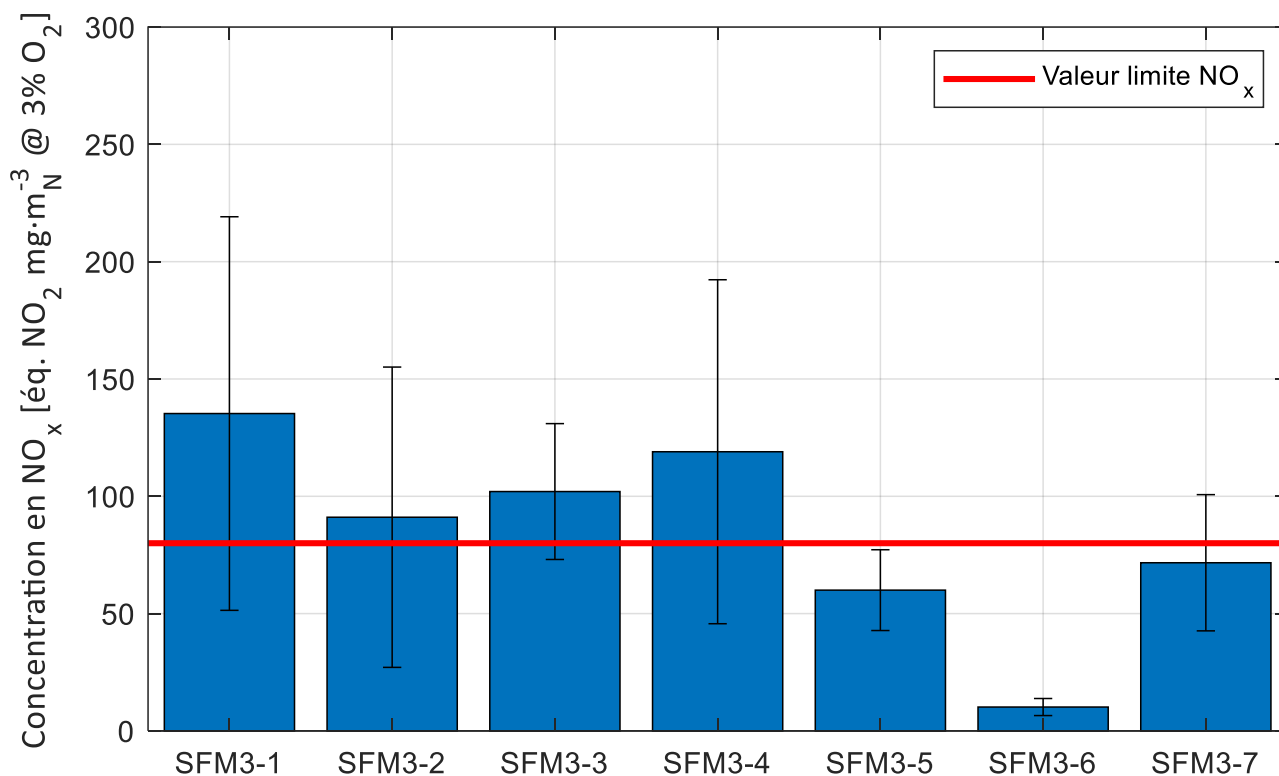


Figure 10 : Concentration moyenne en oxyde d'azote pour toutes les machines avec la valeur limite OPair

Après l'analyse de la conformité des émissions, il apparaît important de préciser quelques points. En effet, ces valeurs sont à relativiser puisque l'on exige des limites d'émissions identiques pour un dispositif produisant uniquement de la chaleur (chaudière) et un autre produisant chaleur et électricité (couplage chaleur-force). Les deux types d'appareils doivent émettre la même quantité de polluants tout en ne produisant pas la même prestation (cf. §3.3.3). La réglementation n'est donc pas en faveur du moteur Stirling. Pour être équitable et cohérent scientifiquement parlant, il serait nécessaire de rapporter les valeurs limites à un kWh produit en tenant compte de la nature de l'énergie produite (électricité et chaleur). Pour ce faire, il faudrait établir une pondération cohérente nécessaire à la discrimination des deux énergies. Le facteur de Carnot, à l'image de ce qui a été fait pour l'efficacité exergétique dans le §3.3.3, pourrait servir de base.

3.6 Intégration hydraulique

Ce chapitre vise à analyser l'hydraulique des différentes installations sur la base de leur schéma de principe (disponible en annexe 6.3) dans le but de déceler d'éventuelles interactions hydrauliques qui viendraient parasiter le fonctionnement du Stirling.

Après la lecture des schémas, 3 installations pourraient être problématiques pour le fonctionnement du Stirling pour les deux principales raisons suivantes :

- L'interaction hydraulique avec un autre producteur de chaleur ;
- Une erreur de conception (bypass problématique).

L'interaction hydraulique intervient lorsqu'on retrouve deux producteurs de chaleur sur le même réseau, sans découplage hydraulique (c'est-à-dire sans point de pression neutre). L'allumage de la pompe du 2^{ème} producteur engendre une modification du débit dans le 1^{er} producteur. Cet effet est d'autant plus important si la résistance commune des deux appareils est grande.

Il est possible d'observer ce problème sur les schémas des installations SFM3-1 et SFM3-5,-6. La Figure 11 compare les températures de départ, de retour ainsi que la différence entre les deux. On observe, pour la première machine, de grands écarts entre la température de départ et de retour.

Il existe une autre explication pouvant conduire à des évolutions de température aussi instables. Toutes les machines sont équipées d'un circuit de relevage de la température de retour permettant, à l'aide d'une vanne 3 voies, de mélanger de l'eau de départ chaude avec l'eau revenant du circuit de chauffage (froide) pour obtenir de l'eau tiède à une température de consigne imposée. Si la vanne de régulation n'est pas correctement dimensionnée, (c'est-à-dire que sa caractéristique de levée d'obturateur en fonction de la température de retour n'est pas suffisamment linéaire) on peut observer un phénomène où la valeur réglée pendule autour de la valeur de consigne.

Le problème n'intervient pas pour les Stirling SFM3-5 et 6 qui sont en parallèle sur le même réseau. Trois explications sont possibles :

1. Leur résistance hydraulique commune n'est pas très élevée ;
2. La régulation de la température de retour est bien maîtrisée ;
3. Les deux machines fonctionnent pendant de longues périodes. Les phases problématiques (démarrage ou arrêt d'un producteur) sont donc réduites.

La SFM3-3 subit également quelques perturbations, mais dans une moindre mesure pour deux causes probables. La première est l'utilisation présumée d'une vanne 3 voies mécanique actionnée par un bilame qui est moins réactive que celles actionnées électriquement. La machine est également branchée en parallèle, non pas à un producteur de chaleur, mais aux groupes chauffage de sol et radiateurs. Si les conduites communes sont longues et d'un diamètre trop petit, l'hypothèse d'une interaction hydraulique est plausible.

La SFM3-4 est la machine dont les températures subissent le plus de perturbations (cf. Figure 11). Une des causes probables est le bypass après le circulateur du Stirling. Celui-ci est non seulement inutile mais il perturbe le fonctionnement de la vanne 3 voies et probablement celui du Stirling puisqu'il génère un débit variable. La seule action du bypass à cet endroit est de mélanger de l'eau du retour avec celle du départ de manière incontrôlée avec comme effet un refroidissement de la température de l'eau en direction du stock de chaleur et entraîne donc sa dégradation dans le sens thermodynamique du terme. La suppression de ce bypass permettrait en toute vraisemblance un fonctionnement plus stable.

L'accouplement de la PAC et du CCF sur l'accumulateur est très compliqué pour peu d'effet positif. Il y a visiblement eu une volonté d'utiliser les 4 piquages du stockage de chaleur avec la possibilité pour les 2 producteurs de chaleur de charger l'énergie soit dans la partie haute soit dans la partie basse. Avec comme objectif présumé de choisir où mettre l'eau en fonction des températures de production et de la stratification de la chaleur dans l'accumulateur.

Cela demande une connaissance précise de la stratification de la chaleur, un accumulateur d'une capacité suffisante et une régulation dédiée qui règle l'arrêt ou le démarrage du Stirling ou de la PAC en fonction des températures dans l'accumulateur. Dans le cas contraire, on peut observer des perturbations sur les producteurs en raison des températures de retour pouvant varier fortement dans le temps.

Il s'agit, ici, d'une installation particulière qui vise à étudier l'emploi direct de l'électricité produite par Stirling à destination de la PAC. La complexité de l'hydraulique est probablement utile dans le cadre de cette étude et n'interviendrait pas dans un montage réel. Une simplification serait nécessaire, par exemple, en produisant la chaleur au même niveau de température pour le stockage dans un accumulateur sans stratification.

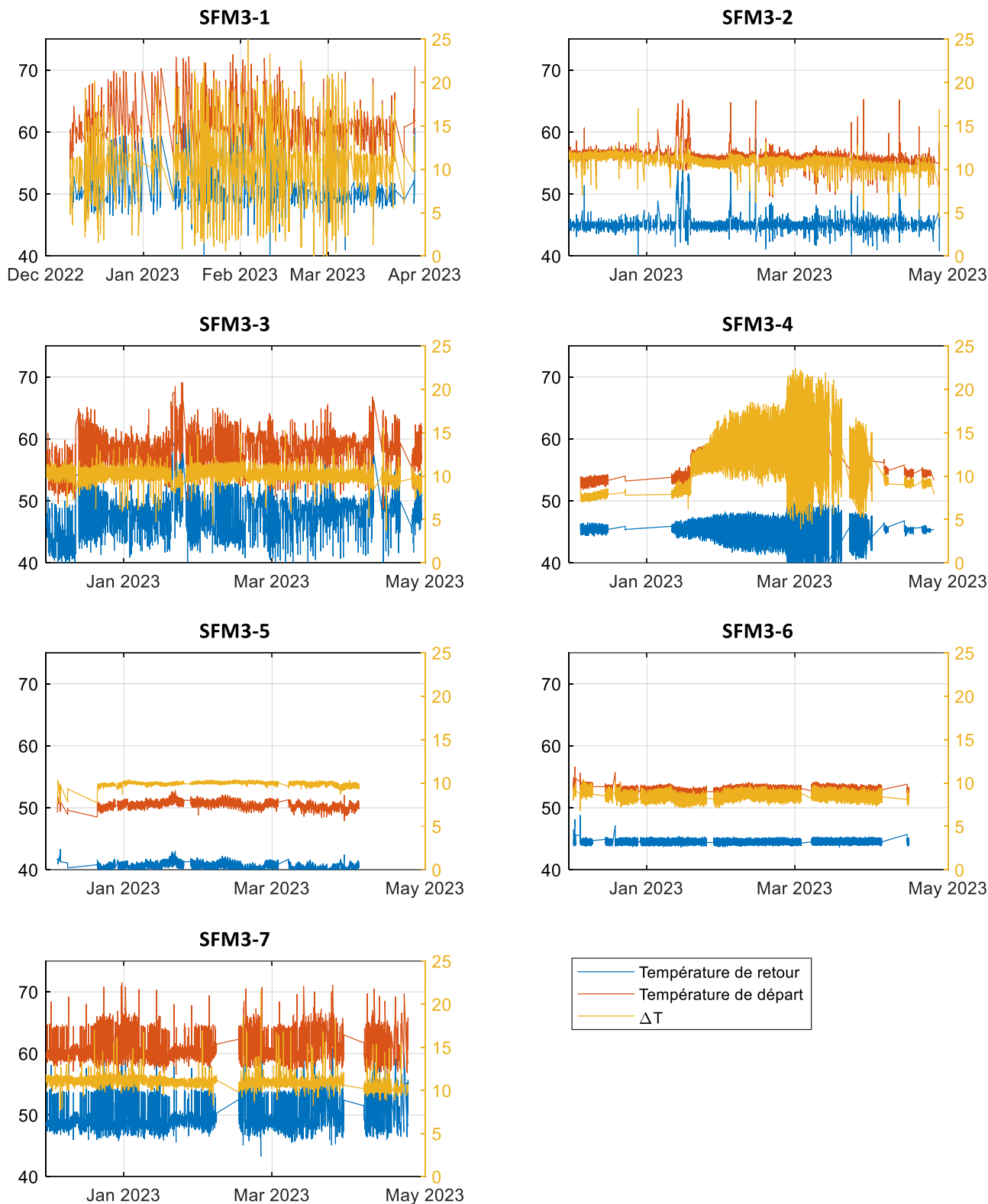


Figure 11 : Evolutions des températures de départ et de retour ainsi que la différence de température entre celles-ci pour toutes les installations suivies

3.6.1 Impact sur le Stirling

Malgré les quelques problèmes d'intégration hydraulique relevés, ils ne semblent pas avoir d'impact important sur les puissances et efficacités des machines. Aucune différence notable n'apparaît sur un bilan de presque une saison de chauffage (décembre à avril).

3.6.2 Volume de stockage idéal

L'accumulateur de chaleur est un réservoir rempli d'eau à température variable permettant le stockage d'énergie thermique. Il est nécessaire dans le cadre d'un réseau de chauffage avec un CCF puisqu'il lui permet de garantir un temps de fonctionnement minimal. Le volume de stockage idéal dépend de plusieurs facteurs :

- Puissance du(des) producteur(s) de chaleur ;
- Le besoin en puissance de chauffage ;
- Les températures et les débits des différents groupes de chauffage ;
- Le temps de fonctionnement minimal désiré pour le CCF ;
- Les pertes de chaleur de l'accumulateur et des conduites.

Les pertes de chaleur sont négligées dans les équations qui suivent. Elles peuvent, dans certain cas, ne pas être considérés comme perte si la chaufferie se situe dans l'enveloppe chauffée.

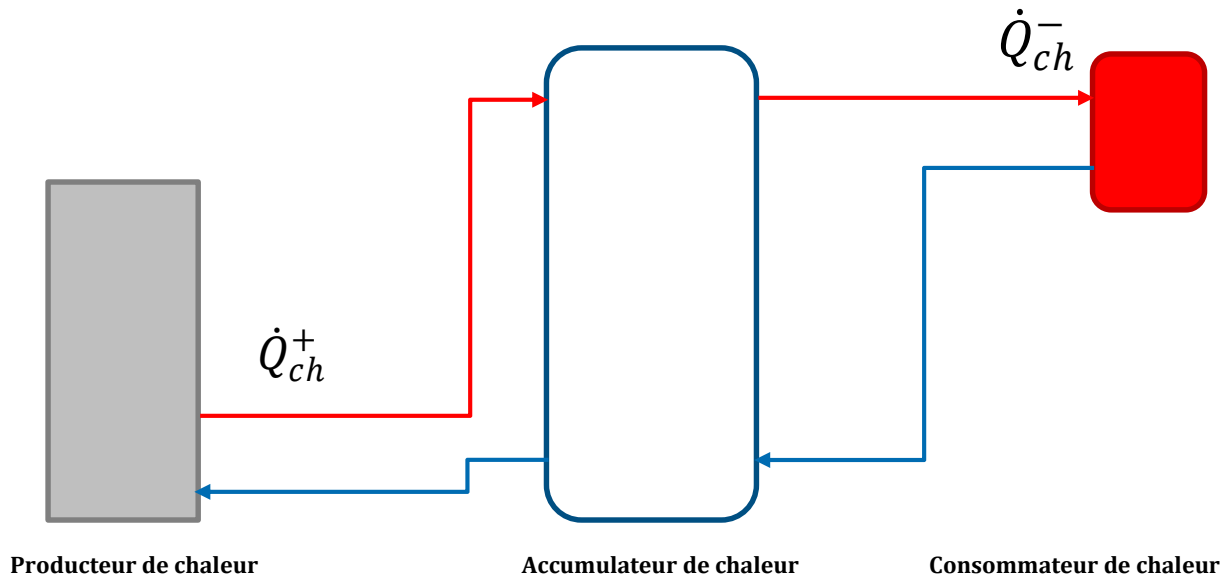


Figure 12 : Schéma typique d'un système de chauffage

L'Équation 5 présente un bilan d'énergie sommaire du système représenté dans la Figure 12. L'Équation 7 donne le volume de stockage après développement de l'Équation 5.

Équation 5

$$Q_{stock} = [\dot{Q}_{ch}^+ - \dot{Q}_{ch}^-] \cdot t_{fonctionnement}$$

Avec : Q_{stock} = énergie stockée dans l'accumulateur de chaleur

\dot{Q}_{ch}^+ = puissance générée par le producteur de chaleur

\dot{Q}_{ch}^- = besoins en puissance de chauffage

Équation 6

$$\rho_{eau} V_{stock} c_{eau} (T_{stock, consigne} - T_{stock, t=0}) = [\dot{Q}_{ch}^+ - \dot{Q}_{ch}^-] \cdot t_{fonctionnement}$$

Avec : V_{stock} = volume de stockage

$T_{stock, consigne}$ = température de consigne du stock

$T_{stock, t=0}$ = température du stock avant le démarrage du producteur de chaleur

c_{eau} = chaleur massique de l'eau

Équation 7

$$V_{stock} = \frac{[\dot{Q}_{ch}^+ - \dot{Q}_{ch}^-] \cdot t_{fonctionnement}}{\rho_{eau} c_{eau} (T_{stock, consigne} - T_{stock, t=0})}$$

La température de consigne de stockage est généralement fixée par celle du départ des consommateurs de chaleur (typiquement 50°C pour des radiateurs). La température du stock au temps t_0 est, dans le cas le plus défavorable, la température de retour arrivant à l'accumulateur de chaleur (typiquement 40°C pour des radiateurs).

Si le producteur de chaleur est bien dimensionné, le besoin en puissance de chauffage est de l'ordre de 90% de la puissance du producteur.

Il reste à déterminer le temps de fonctionnement minimal. Après démarrage du brûleur, environ 45 minutes sont nécessaires au moteur pour se mettre en route et 3h après son démarrage, il atteint 99% de sa valeur maximale. Pour que le Stirling ait un réel intérêt (c'est-à-dire qu'il puisse produire de l'électricité), il faudrait qu'il puisse fonctionner à peu près pendant 3h.

Si l'on néglige les apports de chaleur passifs, les besoins de chauffage sont essentiellement dépendant de la température extérieure. Il est donc possible de tracer un graphique du volume de stockage nécessaire à un fonctionnement minimal de 3h en fonction de la température extérieure (cf. Figure 13).

Il faudrait ensuite déterminer le nombre d'heures correspondant à chaque température sur le site d'installation pour évaluer le meilleur compromis.

Un volume de stockage entre 800 et 1000 litres devrait convenir pour la plupart des applications. Un volume plus faible est à étudier au cas par cas.

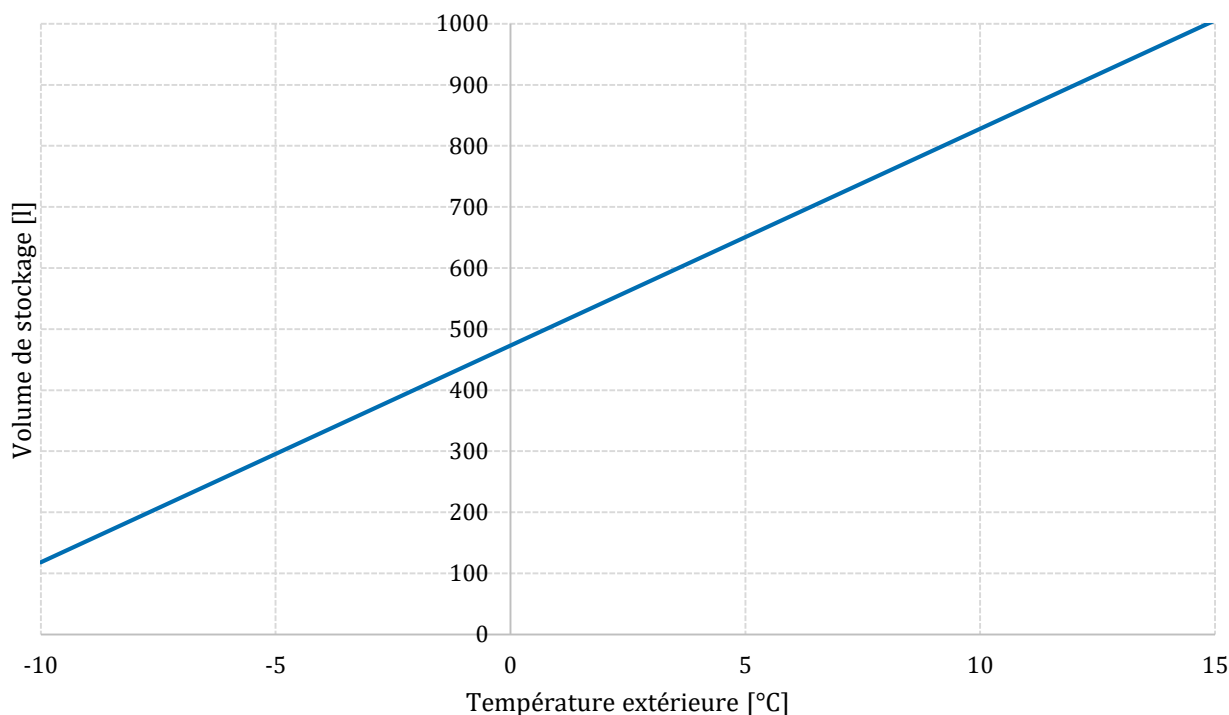


Figure 13 : Volume de stockage minimal pour un fonctionnement continu du Stirling pendant 3h en fonction de la température extérieure

4 Etat de l'art de la micro-cogénération avec moteur Stirling et brûleur à bois depuis 2018

En 2018, l'étude préliminaire commandée par l'OFEN concernant les brûleurs à bois utilisés en association avec un moteur Stirling pour de la micro-cogénération avait dressé un état de l'art du domaine [1]. L'objectif des paragraphes suivants est de compléter l'état des lieux établi en résumant les avancées constatées de 2018 à 2023.

Ces 20 dernières années, le nombre de publications scientifiques dans le domaine de la cogénération de chaleur et d'électricité à partir de sources renouvelables a augmenté très significativement, témoignant de l'intérêt soutenu pour le domaine, notamment en Asie, au Moyen-Orient, et dans une moindre mesure, en Europe : De 2018 à 2022, le nombre de publications est resté stable à près de 2 fois le nombre de publications annuel des années 2011-2013, mais à près de 10 fois le nombre de publications annuel des années 2000.

Des nombreux développements répertoriés sur la période, l'on peut retenir notamment, Borisov et al. [3] proposent des résultats expérimentaux d'un moteur Stirling Gamma atteignant un rendement électrique de 14,8%, alimenté par une combustion de bois dans une chambre de combustion bi-étagée à injection vortex, et muni d'un échangeur de chaleur développé pour cet usage. Cette conception a permis d'atteindre des températures de combustion supérieures à 1100°C, et des températures à la surface de l'échangeur de chaleur supérieures à 800°C, facilitant ainsi l'atteinte de rendements forts respectables au niveau du moteur Stirling lui-même. D'autres auteurs, tels que Zhu et al., couplent des systèmes de cogénération avec des systèmes photovoltaïques et/ou thermiques, dans une logique de réduction des émissions et de l'impact carbone, pour un niveau de service électrique et thermique similaire [4]. Voronca et al [5] étudient les régimes transitoires lors des fonctionnements des moteurs Stirling alimentés par une combustion de biomasse. Garcia et al. [6] se concentrent sur de nouvelles formes d'échangeurs de chaleur (non tubulaires) pour la transmission de l'énergie chaleur de combustion au fluide de travail de manière efficace. Schneider et al. [7] étudient les performances d'un moteur Stirling alimenté par une combustion sur lit fluidisé de pellets ; contrairement à Borisov et al., l'échangeur du moteur Stirling est placé dans le lit de bois plutôt que sur le trajet des gaz de combustion. Paradoxalement, aucune avancée notable n'a pu être répertoriée sur la période dans le monde industriel ou de la propriété intellectuelle du domaine.

Ma et al. [8], Montazerinejad et Eicker [9], Wolowicz et al [10], Kallio et Siroux [11], Zhu et al. [12], Mahian et al. [13], Schneider et al. [14], Sirsath et al. [15], Singh et Kumar [16], Wegener et al. [17], et Filho et al. [18] ont tous proposé ces 5 dernières années des revues des systèmes de cogénération, notamment alimentés par des énergies renouvelables et en particulier par des combustions de bois pour partie de ces études, témoignant du dynamisme de ce domaine de recherche et développement. Salih et al. [19], Ahmed et al. [20], Hachem et al. [21] ou Kramens et al. [22], [23] proposent des études des facteurs affectant les performances thermodynamiques des moteurs Stirling alors que Tezer et al. [24] se concentrent sur une revue des processus de gazéification de biomasse, processus souvent nécessaires à une production d'électricité efficace dans un système de cogénération. En effet, l'intégration complète de la production d'électricité au cœur de la production de chaleur, plutôt que sous la forme d'un module additionnel, permet d'obtenir de bien meilleurs rendements [1]. Zare et al. [25] concentrent leur revue sur la conception et l'optimisation des moteurs Stirling afin de maximiser leur efficacité électrique, leur intégration au système de production de chaleur, et leur robustesse.

5 Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer les performances énergétiques d'installations de cogénération basée sur un moteur Stirling en conditions réelles et sur une longue période. Premièrement, un écart important entre l'instrumentation de référence et celle intégrée aux machines a été relevé pour la puissance thermique (écart > 10%). Cela a un impact sur l'analyse puisque les petites variations peuvent être expliquées uniquement par l'erreur de mesure. La température de retour du réseau de chauffage ainsi que les intégrations hydrauliques devraient avoir des impacts qui ne sont pas observables. Les autres grandeurs (débit de gaz et puissance électrique) restent proche des valeurs mesurées en laboratoires (écart relatif d'environ 2% sur le débit et de moins de 1% sur la puissance électrique).

Il a été montré que la variabilité de composition du gaz naturel n'a pas d'influence significative sur l'efficacité globale (écart relatif < 1%). Une valeur moyenne de 10,365 kWh/m³ a donc été considérée pour toutes les machines.

Des variations importantes sur la puissance gaz (16%-relatif) ont été relevées entre la machine présentant la puissance la plus modeste comparé à celle ayant la plus élevée. Celles-ci s'expliquent par les réglages adaptatifs à chaque réseau effectué par Schmid Stirling.

La puissance électrique suit la même tendance mais présente un écart important (-7% en moyenne) par rapport aux mesures effectuées en laboratoire en 2021. L'analyse de l'évolution de l'efficacité électrique sur la période considérée (01.12.22 – 30.04.23) montre une faible perte d'efficacité pour pratiquement toutes les machines sauf celles installées dans les locaux de Schmid Stirling. Les problèmes d'instabilité de fonctionnement au niveau du brûleur FLOX et de l'échangeur de chaleur du Stirling semblent influencer les efficacités.

En moyenne, il ressort les caractéristiques suivantes :

- Puissance apportée par le gaz : 7,4 kW ;
- Puissance électrique fournie : 1,7 kW ;
- Puissance thermique fournie : 4,6 kW ;
- Efficacité globale : 84,5% ;
- Efficacité thermique : 62% ;
- Efficacité électrique : 22,5% ;
- Efficacité globale Carnot 33% ;

Les émissions de monoxyde de carbone respectent les valeurs limites fixées par l'OPair dans la majorité des cas. Pour les oxydes d'azote, quelques mesures montrent qu'il est possible d'atteindre les valeurs limites. Les autres mesures attestent d'émissions supérieures au seuil admissible principalement en raison du manque de recirculation au niveau du brûleur FLOX. Une amélioration de cette dernière permettra de diminuer les NO_x, d'augmenter la stabilité générale et d'améliorer les efficacités.

L'analyse des schémas de principe de 6 installations a permis d'expliquer certains sauts de température aux bornes des installations. Quelques cas d'interactions hydrauliques ont été relevées ainsi qu'un bypass inutile, causant des perturbations. Ces configurations hydrauliques non-optimales ne semblent pas avoir d'impact sur les puissances et efficacités, du moins sur un bilan réalisé sur presque une saison de chauffage. Une conception correcte du réseau hydraulique permet tout de même d'augmenter la stabilité de fonctionnement des installations.

Une notice de calcul a permis de déterminer le volume d'accumulation idéal pour l'exploitation des avantages d'un groupe de couplage chaleur-force. Il est compris entre 800 et 1000 litres.

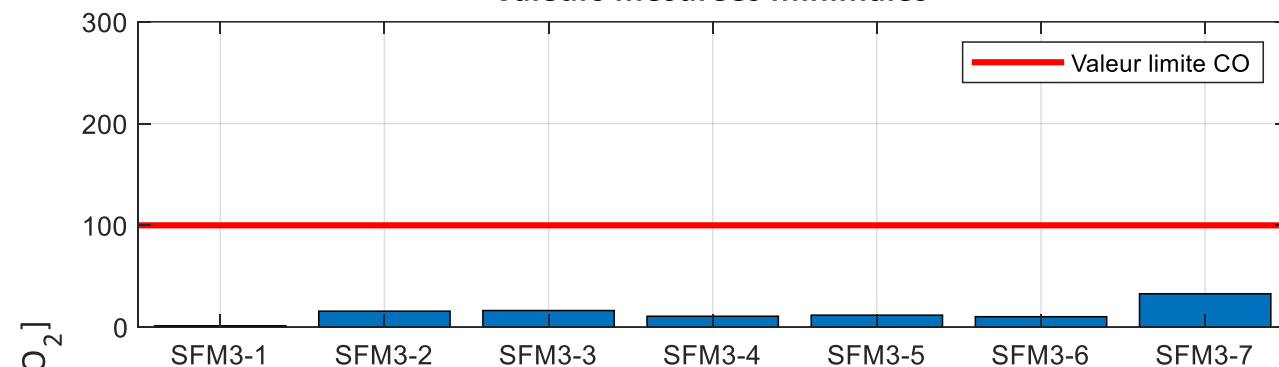
Pour finir, un résumé succinct a été établi sur les avancées de 2018 à 2023 à propos de la micro-cogénération avec moteur Stirling alimentée par la combustion de bois.

On observe une augmentation significative des articles scientifiques et des revues dans le domaine au cours de 20 dernières années. Une étude expérimentale [3] atteint notamment un rendement électrique de près de 15% pour un Stirling intégré à une combustion de bois. L'abondance de la littérature dans le domaine avec des résultats expérimentaux encourageants combinés à un Stirling Schmid présentant de bonnes performances mettent tous les signaux aux verts pour le développement d'un brûleur à bois adapté à la cogénération.

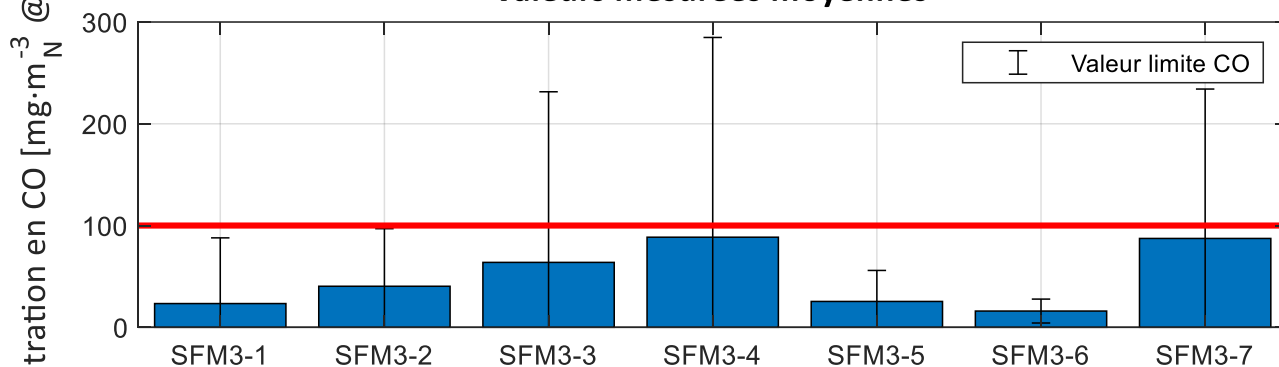
6 Annexes

6.1 Concentrations minimales, moyennes et maximales en polluants

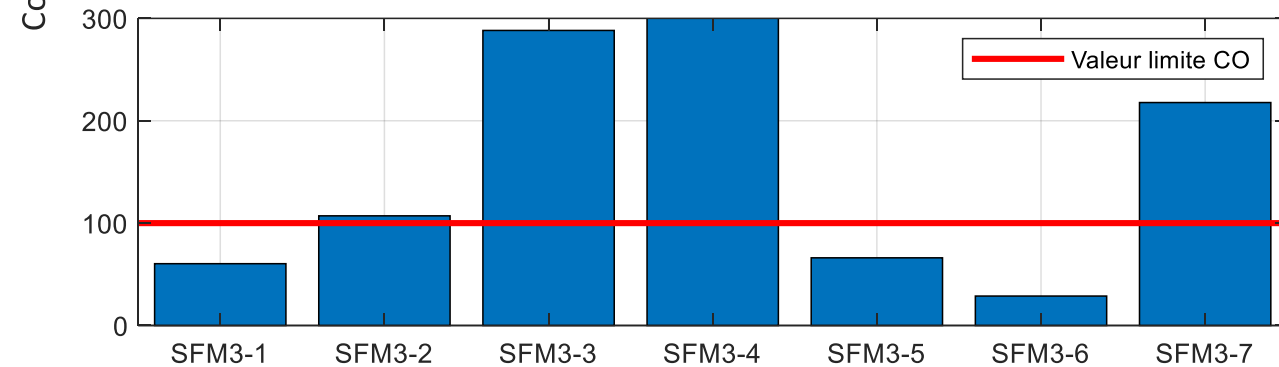
Valeurs mesurées minimales

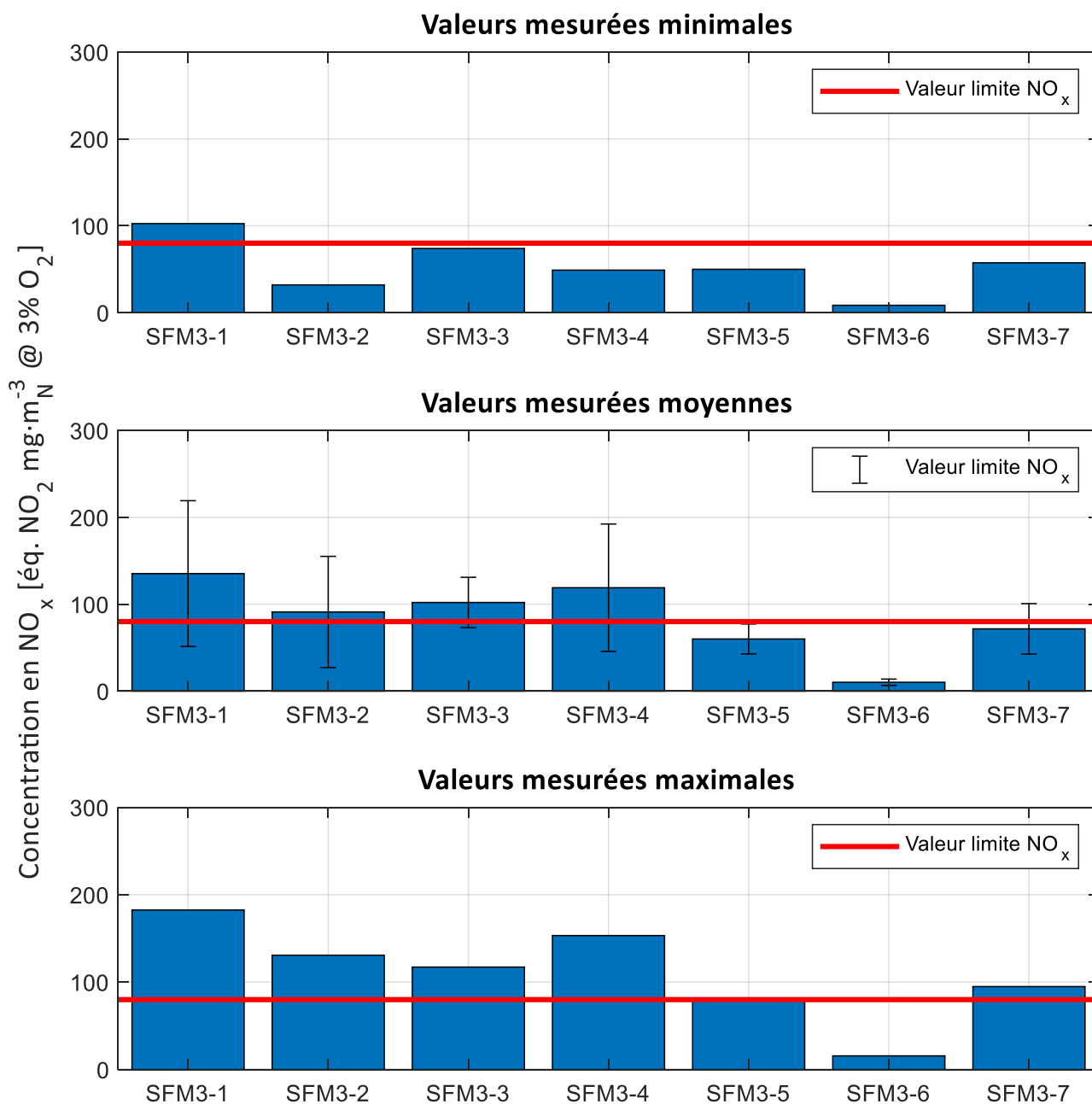


Valeurs mesurées moyennes

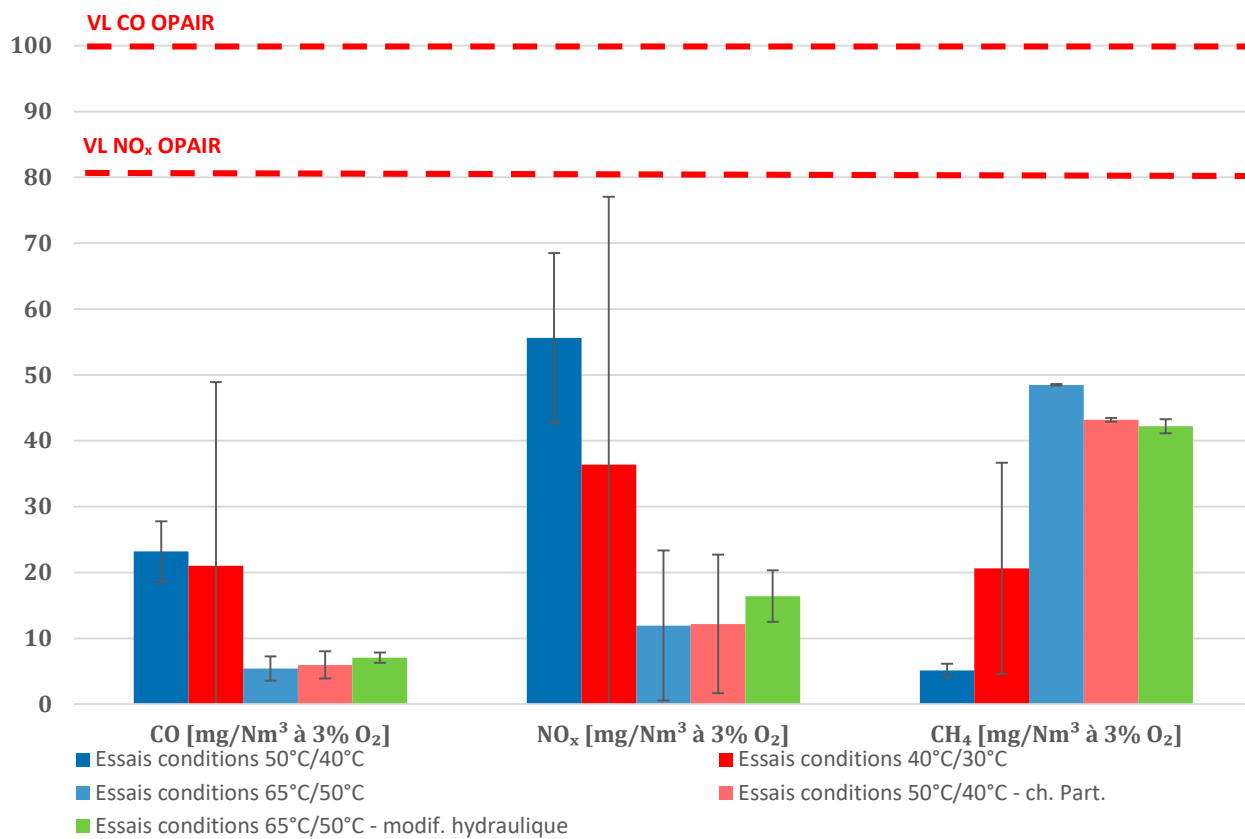


Valeurs mesurées maximales





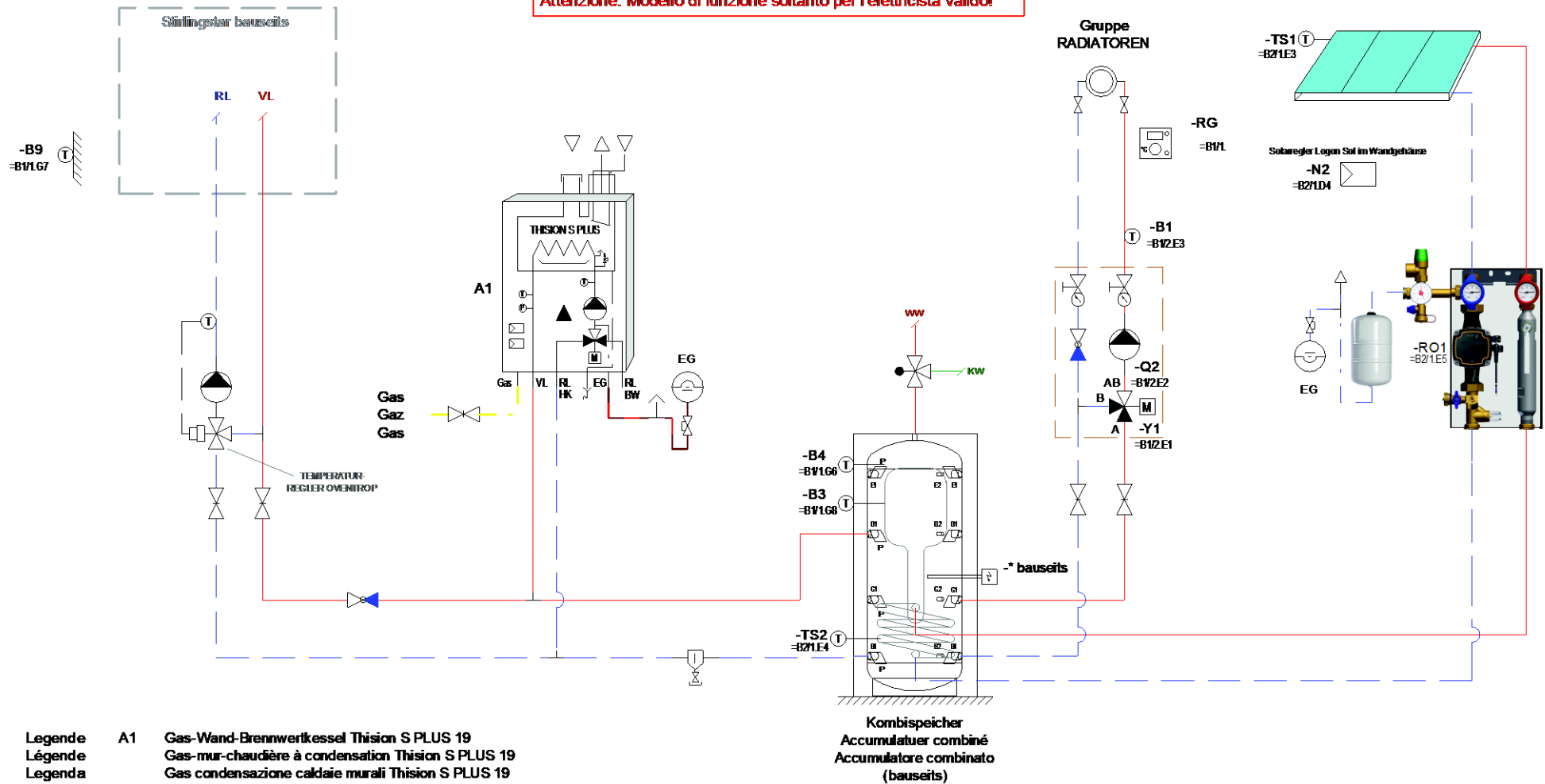
6.2 Emissions de polluants mesurés en laboratoire

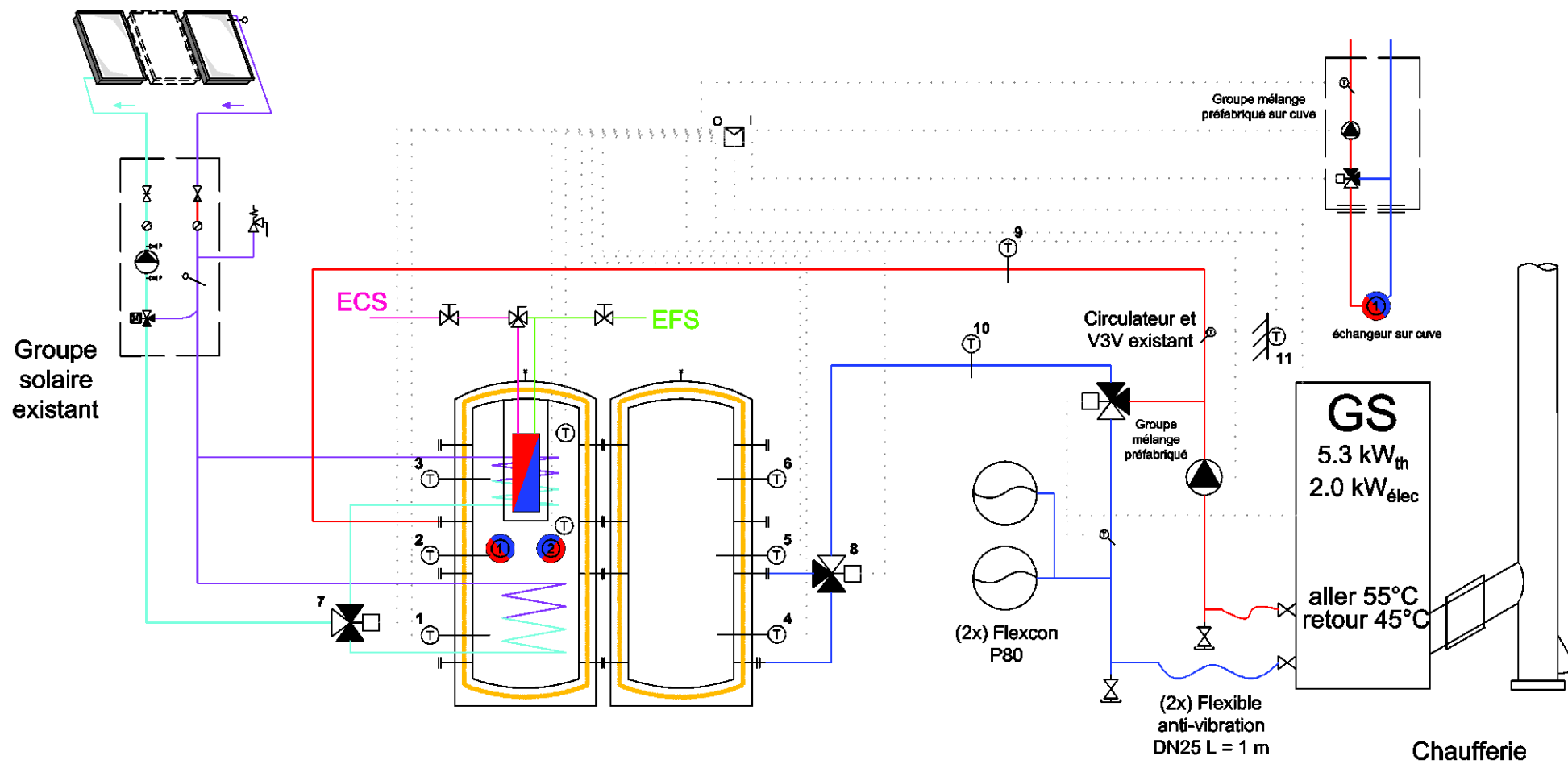


6.3 Schéma de principe pour les tests d'endurance

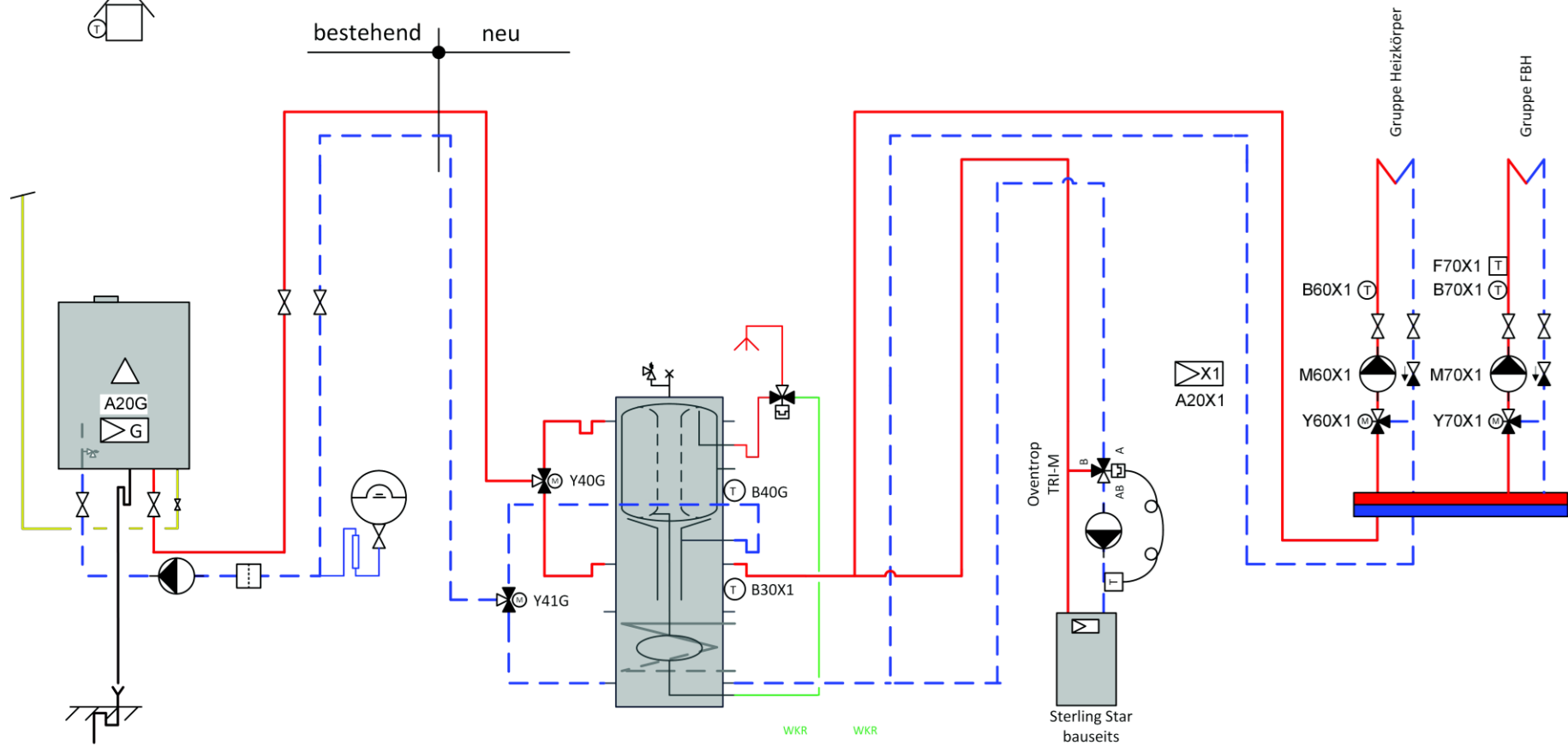
6.3.1 SFM3-1

Achtung: Funktionsschema nur für den Elektriker gültig!
Attention : Modèle de fonction seulement pour l'électricien valable!
Attenzione: Modello di funzione soltanto per l'elettricista valido!

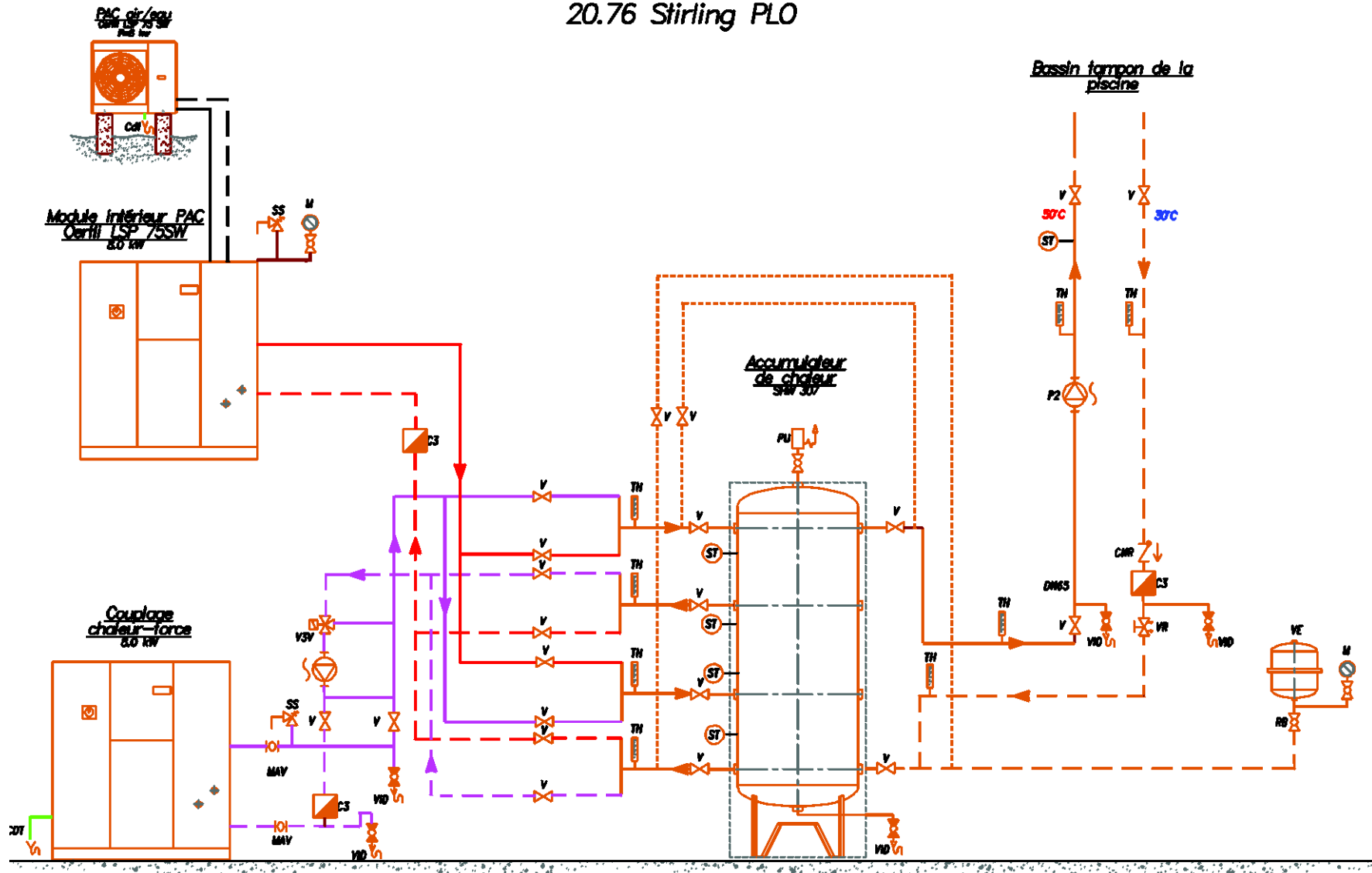




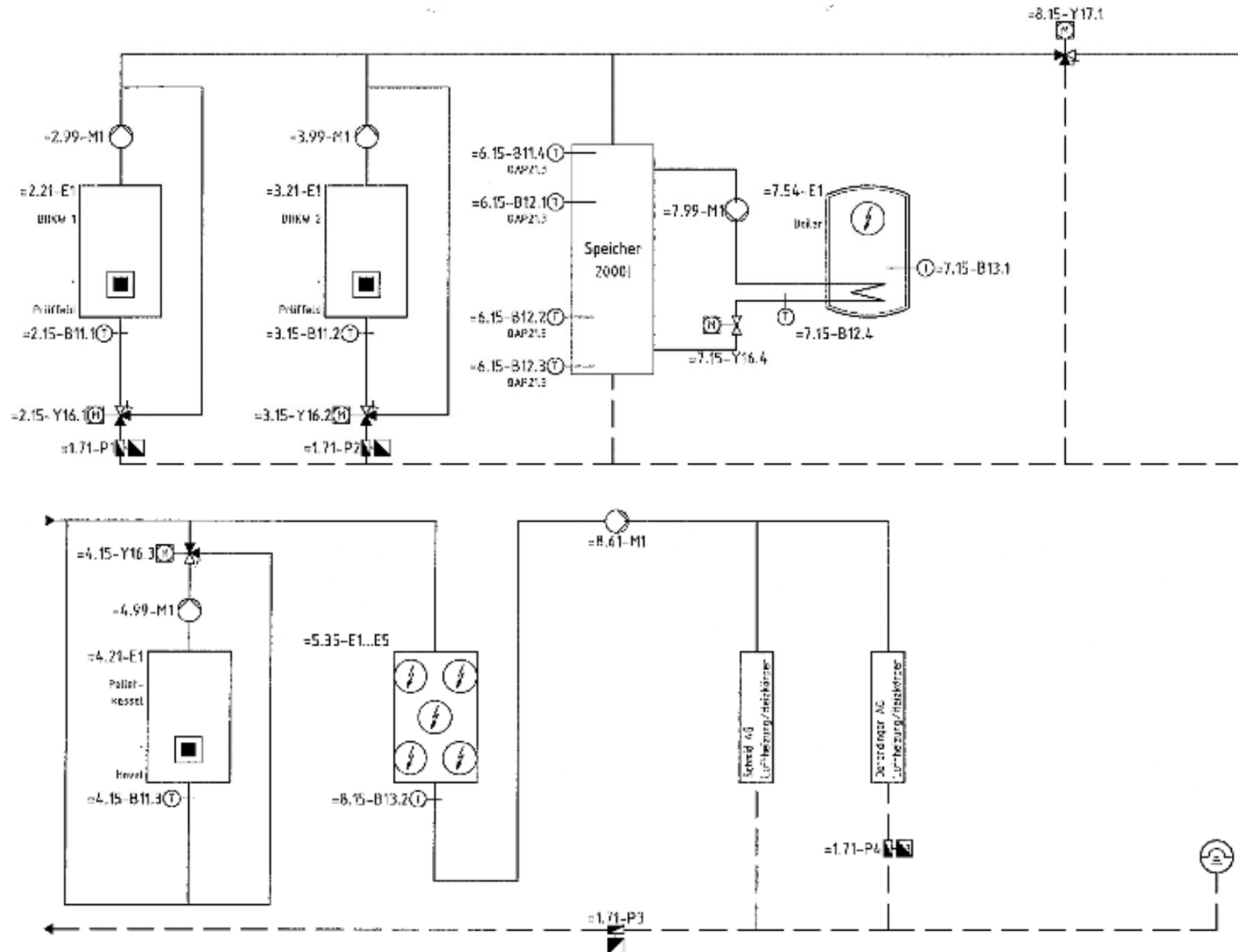
6.3.3 SFM3-3



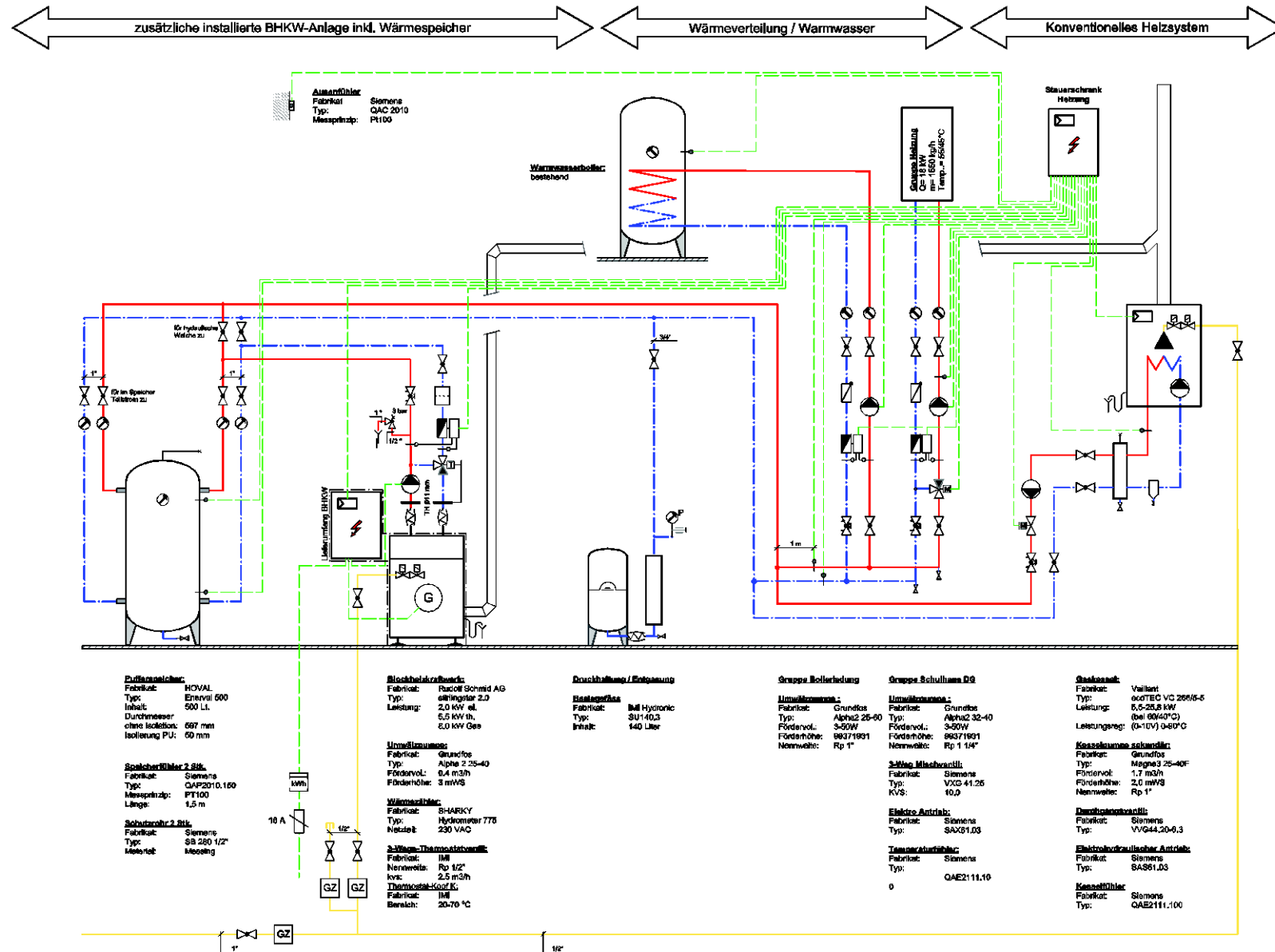
20.76 Stirling PLO



6.3.5 SFM3-5 et SFM3-6



6.3.6 SFM3-7



Bibliographie

- [1] J.-B. Carré et R. Röthlisberger, « État de l'art et potentiel des technologies de brûleur à bois utilisées en association avec un moteur Stirling pour la micro-cogénération », HEIG-VD, Yverdon-les-Bains, Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501623-01 ; Mandant : Office fédéral de l'énergie OFEN, Programme Systèmes énergétiques à combustion, juin 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=68467>
- [2] V. İncili, G. Karaca Dolgun, A. Keçebaş, et T. Ural, « Energy and exergy analyses of a coal-fired micro-CHP system coupled engine as a domestic solution », *Energy*, vol. 274, p. 127400, juill. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127400.
- [3] I. Borisov, A. Khalatov, et D. Paschenko, « The biomass fueled micro-scale CHP unit with stirling engine and two-stage vortex combustion chamber », *Heat Mass Transfer*, vol. 58, n° 7, p. 1091-1103, juill. 2022, doi: 10.1007/s00231-021-03165-z.
- [4] S. Zhu *et al.*, « Techno-economic analysis of a combined heat and power system integrating hybrid photovoltaic-thermal collectors, a Stirling engine and energy storage », *Energy Conversion and Management*, vol. 284, p. 116968, mai 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.116968.
- [5] Ștefan-D. Voronca, M. Siroux, et G. Darie, « Experimental Characterization of Transitory Functioning Regimes of a Biomass Stirling Micro-CHP », *Energies*, vol. 15, n° 15, Art. n° 15, janv. 2022, doi: 10.3390/en15155547.
- [6] D. García, M.-J. Suárez, E. Blanco, et J.-I. Prieto, « Experimental and Numerical Characterisation of a Non-Tubular Stirling Engine Heater for Biomass Applications », *Sustainability*, vol. 14, n° 24, Art. n° 24, janv. 2022, doi: 10.3390/su142416488.
- [7] T. Schneider, F. Ruf, D. Müller, et J. Karl, « Performance of a fluidized bed-fired Stirling engine as micro-scale combined heat and power system on wood pellets », *Applied Thermal Engineering*, vol. 189, p. 116712, mai 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.116712.
- [8] W. Ma, W. Han, Q. Liu, et G. Xu, « A Review of Combined Heat and Power (CHP) ». Preprints, 27 avril 2023. doi: 10.20944/preprints202304.1032.v1.
- [9] H. Montazerinejad et U. Eicker, « Recent development of heat and power generation using renewable fuels: A comprehensive review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112578, sept. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112578.
- [10] M. Wołowicz, P. Kolasiński, et K. Badyda, « Modern Small and Microcogeneration Systems—A Review », *Energies*, vol. 14, n° 3, Art. n° 3, janv. 2021, doi: 10.3390/en14030785.
- [11] S. Kallio et M. Siroux, « A Review – Renewable energy based micro-cogeneration and hybrid energy systems », *E3S Web Conf.*, vol. 294, p. 01004, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202129401004.
- [12] S. Zhu, G. Yu, K. Liang, W. Dai, et E. Luo, « A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology », *Applied Energy*, vol. 294, p. 116965, juill. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116965.
- [13] O. Mahian, M. R. Mirzaie, A. Kasaeian, et S. H. Mousavi, « Exergy analysis in combined heat and power systems: A review », *Energy Conversion and Management*, vol. 226, p. 113467, déc. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113467.
- [14] T. Schneider, D. Müller, et J. Karl, « A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110288, déc. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.110288.
- [15] P. Sirsath, S. Raut, S. Pawar, N. Parmar, et R. Petkar, « A Review on Stirling Engine Performance », vol. 6, n° 4, 2019.
- [16] U. R. Singh et A. Kumar, « Review on solar Stirling engine: Development and performance », *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 8, p. 244-256, déc. 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.08.016.
- [17] M. Wegener, A. Malmquist, A. Isalgué, et A. Martin, « Biomass-fired combined cooling, heating and power for small scale applications – A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 96, p. 392-410, nov. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.07.044.
- [18] M. A. D. Filho, N. M. F. T. S. Araújo, F. P. Maia, et G. I. M. Tapia, « A BRIEF REVIEW ON THE ADVANTAGES, HINDRANCES AND ECONOMIC FEASIBILITY OF STIRLING ENGINES AS A DISTRIBUTED GENERATION SOURCE AND COGENERATION TECHNOLOGY », *Revista de Engenharia Térmica*, vol. 17, n° 1, Art. n° 1, juin 2018, doi: 10.5380/reterm.v17i1.62258.
- [19] S. A. Salih, B. A. Aljashaami, N. T. Alwan, S. E. Shcheklein, V. I. Velkin, et O. Ali, « Factors Affecting the Thermodynamic Performance of the Stirling Engines: a Review Study », *IREME*, vol. 16, n° 10, p. 529, oct. 2022, doi: 10.15866/ireme.v16i10.22549.
- [20] F. Ahmed, H. Huang, S. Ahmed, et X. Wang, « A comprehensive review on modeling and performance optimization of Stirling engine », *International Journal of Energy Research*, vol. 44, n° 8, p. 6098-6127, 2020, doi: 10.1002/er.5214.

- [21] H. Hachem, R. Gheith, F. Aloui, et S. Ben Nasrallah, « Technological challenges and optimization efforts of the Stirling machine: A review », *Energy Conversion and Management*, vol. 171, p. 1365-1387, sept. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.06.042.
- [22] J. Kramens, E. Vigants, et I. Liepiņš, « Experimental study of factors influencing the efficiency of Stirling engine biomass microcogeneration unit », in *2021 IEEE 62nd International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTU CON)*, nov. 2021, p. 1-4. doi: 10.1109/RTU CON53541.2021.9711686.
- [23] J. Kramens, E. Vigants, I. Liepiņš, L. Vērnies, et V. Terjanika, « Research of a Biomass Boiler with Stirling Engine Microgeneration Unit », *Environmental and Climate Technologies*, vol. 25, n° 1, p. 587-599, janv. 2021, doi: 10.2478/rtuct-2021-0043.
- [24] Ö. Tezer, N. Karabağ, A. Öngen, C. Ö. Çolpan, et A. Ayol, « Biomass gasification for sustainable energy production: A review », *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, n° 34, p. 15419-15433, avr. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.158.
- [25] S. Zare, A. R. Tavakolpour-saleh, A. Aghahosseini, M. H. Sangdani, et R. Mirshekari, « Design and optimization of Stirling engines using soft computing methods: A review », *Applied Energy*, vol. 283, p. 116258, févr. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116258.

Projet Stirling



Rapport technique réalisé pour les partenaires du projet



REPUBLIQUE
ET CANTON
DE GENEVE

POST TENEBRAS LUX

Office Cantonal de l'énergie (OCEN)



Auteurs :

Denis Iglesias Garcia (Collaborateur scientifique - HEPIA)

Basile Grandjean (Adjoint scientifique - HEPIA)

José Boix (Professeur HES - Responsable filière Technique des bâtiments – HEPIA)

Table des matières

1	INTRODUCTION.....	4
1.1	PARTENAIRES.....	4
1.2	ÉQUIPE DE PROJET.....	4
2	RÉSUMÉ.....	5
2.1	INTRODUCTION.....	5
2.2	INSTALLATION.....	5
2.3	MONITORING.....	5
2.4	RÉSULTATS.....	6
2.5	BILAN.....	6
3	CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ACTUEL.....	7
4	OBJECTIFS.....	8
5	COGÉNÉRATION.....	9
5.1	SYSTÈME STIRLING.....	9
6	INSTALLATION À PLAN-LES-OUATES.....	10
6.1	SITUATION AVANT TRAVAUX.....	10
6.2	SCHÉMA DE PRINCIPE.....	10
6.3	INSTALLATION.....	11
6.4	MISE EN SERVICE.....	11
7	MONITORING DE L'INSTALLATION.....	12
7.1	SYSTÈME STIRLING.....	12
7.2	COMPTEURS.....	12
7.3	PISCINE.....	12
8	RÉSULTATS.....	13
8.1	DONNÉES.....	13
8.1.1	Electricité.....	13
8.2	STIRLING.....	14
8.2.1	Fonctionnement.....	14
8.2.2	Performances.....	19
8.3	PAC.....	27
8.3.1	Fonctionnement.....	27
8.3.2	Performances.....	27
8.4	STIRLING AVEC PAC.....	33
8.4.1	Performances.....	33
8.5	RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE.....	39
8.6	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS.....	41
9	PISTES D'AMÉLIORATION ET RETOUR D'EXPÉRIENCE.....	43
9.1	SYSTÈME STIRLING.....	43
9.2	RÉSEAU HYDRAULIQUE.....	43
9.3	MESURE, COMMANDE ET RÉGULATION.....	43
9.4	OBJECTIFS.....	44
10	CONCLUSIONS.....	45
11	BIBLIOGRAPHIE.....	46
12	GRAPHIQUES, FIGURES, ÉQUATIONS ET TABLEAUX.....	46

13	ANNEXES	48
13.1	SYSTÈME STIRLING	48
13.1.1	<i>Fiche technique du système Stirling</i>	<i>48</i>
13.1.2	<i>Rapport de l'entreprise Schmid juin 2022</i>	<i>48</i>
13.2	PAC	48
13.2.1	<i>Fiche technique</i>	<i>48</i>
13.3	PLANS	48
13.3.1	<i>Schéma de principe hydraulique</i>	<i>48</i>
13.3.2	<i>Plans.....</i>	<i>48</i>
13.3.3	<i>Schéma de principe électrique</i>	<i>48</i>

1 INTRODUCTION

Dans le cadre de ce projet, nous mettons en application et testons une chaudière à cogénération basée sur un système Stirling couplé à une pompe à chaleur dans la chaufferie de la piscine de Plan-Les-Ouates. L'objectif est de permettre à la commune d'économiser du gaz et de produire de l'électricité en hiver lorsque les panneaux photovoltaïques sont moins performants.

1.1 PARTENAIRES

Les partenaires pour l'installation à Plan-Les-Ouates sont : (selon les pièces déposées à l'origine)

- Fonds Vitale Vert Innovation
- Commune de Plan-Les-Ouates
- Office cantonal de l'énergie (OCEN)
- Institut de recherche inPACT (Hepia)

Les partenaires pour le développement du prototype Stirling sont :

- Schmid AG avec Monsieur Budliger (concepteurs du prototype)
- Office fédéral de l'énergie (OFEN)
- Fond Climat de l'office fédéral de l'environnement (OFEV)
- Association suisse de l'industrie gazière (ASIG)

1.2 ÉQUIPE DE PROJET

L'équipe de projet est constituée de :

- Denis Iglesias (responsable de projet)
- Basile Grandjean (responsable de projet)
- Joris Vaucher (Délégué à l'énergie de la Commune de Plan-les-Ouates jusqu'à fin 2021)
- Nathan François (Délégué à l'énergie de la Commune de Plan-les-Ouates depuis début 2022)

Du côté de la Commune de Plan-les-Ouates, nous avons pu compter sur le soutien des collaborateurs du service de construction et aménagements ainsi que les collaborateurs du service des sports.

Le bureau Putallaz Ingénieurs-Conseils a fourni une aide précieuse en tant qu'assistant de maître d'ouvrage.

Pour affronter les nombreux défis, nous avons compté aussi sur l'aide des collaborateurs de la filière Technique des bâtiments à Hepia :

- José Boix
- Cédric Pasqual
- Philippe Leroux
- Claude Willemin
- Tancredi Bernasconi
- Anthony Girardin
- Harjeet Nagi

2 RÉSUMÉ

2.1 INTRODUCTION

Actuellement la Suisse ne produit pas assez d'électricité en hiver et doit en importer. L'utilisation de chaudière à cogénération permettra de produire de l'électricité et de la chaleur lorsqu'on en a le plus besoin.

Dans le cadre de ce projet, nous sommes en train de tester un prototype de chaudière Stirlingstar développé par la société Schmid AG et Monsieur Budliger. Ses principales caractéristiques techniques sont :

- Puissance électrique 2 kW
- Rendement électrique de 25%
- Puissance thermique 5.3kW

Il y a en tout 7 chaudières qui sont en test en Suisse actuellement.

2.2 INSTALLATION

Le banc de test pour le Stirling a été installé dans la chaufferie de la piscine de Plan-les-Ouates à la place d'une ancienne chaudière qui n'est plus utilisée. La piscine a besoin d'une quantité importante d'énergie pour maintenir l'eau à une température de 24°C. Une partie de l'eau est mise à l'égout toutes les semaines (1-10 m³). La chaudière actuelle à gaz Buderus prends plus d'un jour pour chauffer l'eau renouvelée.

Le principe de fonctionnement de l'installation est le suivant :

- Le système Stirling est alimenté en gaz ou biogaz, il produit :
 - o 2kW d'électricité qui alimentent une pompe à chaleur (PAC)
 - o 5.3 kW de chaleur qui est stockée dans un ballon tampon
- La PAC produit de la chaleur qui est aussi stockée dans le ballon tampon
- Le ballon tampon dissipe l'énergie produite dans le bassin tampon de la piscine

L'objectif est d'optimiser la production de chaleur et d'électricité pour réaliser des économies par rapport à l'installation existante.

Nous avons incorporé une PAC (Pompe à Chaleur) en raison des limites du système Stirling qui ne permettent d'augmenter la température de l'eau que de 45°C à 55°C. La PAC est prévue pour chauffer l'eau jusqu'à un maximum de 45°C, et son coefficient de performance (COP) devrait être supérieur à 4 pour une plage de températures de 20°C à 45°C.

Si nous prenons le système complet, nous espérons qu'à partir de 1 kWh de gaz nous obtiendrons au final au moins 2 kWh de chaleur.

Le chantier s'est déroulé en 2021 avec principalement l'intervention des entreprises suivantes :

- Badan Chauffage a réalisé les travaux de chauffage et gaz
- Piazzolla a réalisé les travaux d'électricité
- Meier Tobler a réalisé la mise en service de la PAC
- Schmid a réalisé la mise en service du système Stirling.

Nous avons pu inaugurer l'installation le lundi 22 novembre 2021 à la salle communale de Plan-les-Ouates. Une centaine de personnes ont assisté aux présentations des intervenants.

2.3 MONITORING

Nous avons suivi les performances de l'installation en étroite collaboration avec l'entreprise Schmid. Nous disposons de compteurs et d'un accès à distance.

Le système Stirling a été partiellement démonté 2 fois pour être envoyé chez Schmid à Berne. Ils ont adapté tous leurs prototypes selon les retours d'expérience des différents sites de test.

2.4 RESULTATS

Sur la période entre le 31/07/22 et le 31/07/23 nous avons obtenu les résultats suivants :

- COP de l'installation (Stirling avec PAC) de 1.52. Il faut donc 100 kWh de gaz et environ 30kWh d'électricité pour produire 152 kWh de chaleur. Ce chiffre est inférieur à ce que nous attendions (1.9). Le système Stirling a fonctionné à pleine puissance seulement 2938 h pendant cette période, ce qui explique qu'il n'arrive pas à fournir suffisamment d'électricité pour alimenter la PAC.
- Le COP annuel de la PAC est de 2.96, ce qui est inférieur aux valeurs théoriques attendues (4-4.5)
- Système Stirling
 - o On constate que le système Stirling est très sensible à la température d'entrée de l'eau et à son débit. Si la température varie de quelques degrés, le système Stirling va se mettre en stand-by. Le débit doit aussi être minutieusement réglé.
 - o Nous avons observé que le système Stirling a des performances inférieures à celles annoncées par l'entreprise Schmid :
 - Rendement électrique de 0.18 au lieu de 0.25
 - Rendement thermique de 0.62 au lieu de 0.75

2.5 BILAN

La chaufferie de la piscine de la commune de Plan-les-Ouates constitue un excellent site pour tester le couplage du système Stirling avec une pompe à chaleur.

L'installation a requis l'intervention de plusieurs entreprises spécialisée. L'homologation du système Stirling a été assez chronophage car il s'agit d'un prototype.

L'installation a été mise en service en date du 22 novembre 2021

Performances mesurées (31/07/22-31/07/23) :

- Le COP de l'installation (Stirling avec PAC) est de 1.52. Avec 100 kWh de gaz et environ 30kWh d'électricité nous arrivons à produire 152 kWh de chaleur. Nous avons estimé cette valeur à 2. Le Stirling a fonctionné environ 2938h à pleine puissance ce qui n'est pas suffisant pour alimenter la PAC (apport nécessaire d'électricité du réseau SIG)
- La pompe à chaleur à un COP annuel de 2.96, valeur inférieure à ce que nous espérions (4.0-4.5)
- Les performances du Stirling sont inférieures à celles annoncées par le fabricant
 - o Rendement électrique de 0.18 au lieu de 0.25
 - o Rendement thermique de 0.62 au lieu de 0.75

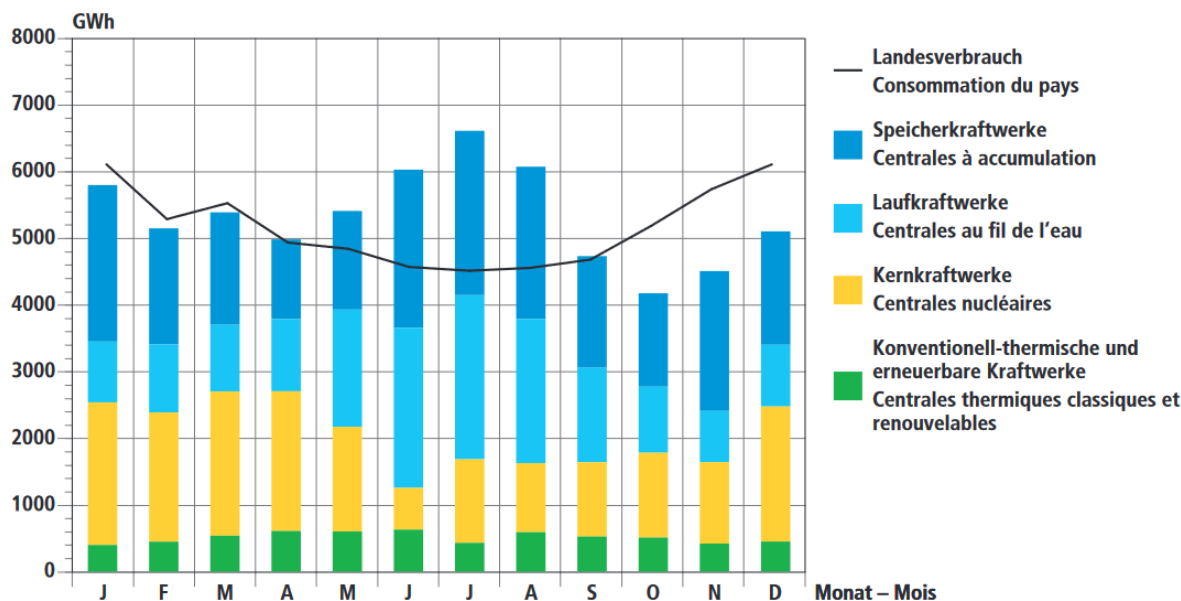
Exploitation

- Système Stirling
 - o L'entreprise Schmid est intervenue 2 fois pour ramener le moteur du système Stirling dans leur atelier à Berne et faire les mises à jour selon leur retour d'expérience sur les 7 systèmes Stirling actuellement en service.
 - o Le débit et température de l'entrée d'eau froide doivent être minutieusement réglés sinon le système Stirling va s'éteindre
 - o Les températures de fonctionnement du système Stirling ont été fixées lors de la mise en service. L'intervention de l'entreprise Schmid est nécessaire pour modifier les réglages.
 - o L'accès à distance permet d'avoir accès aux principales fonctions de la machine et aux diverses données.
- Plusieurs interventions sur site ont été nécessaires pour remplacer des appareils de mesure défectueux
- Nous avons constaté que la température extérieure a une grande influence sur la température de l'eau de la piscine, nous avons dû arrêter l'installation lors de la canicule de l'été 2022

L'installation montre des résultats intéressants lorsque l'on combine le système Stirling avec une pompe à chaleur. Cela permet de produire de l'électricité quand nous en avons le plus besoin et constitue un élément clé pour accélérer aujourd'hui la transition énergétique.

3 CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ACTUEL

Le graphique ci-dessous représente la production et consommation d'énergie en Suisse.

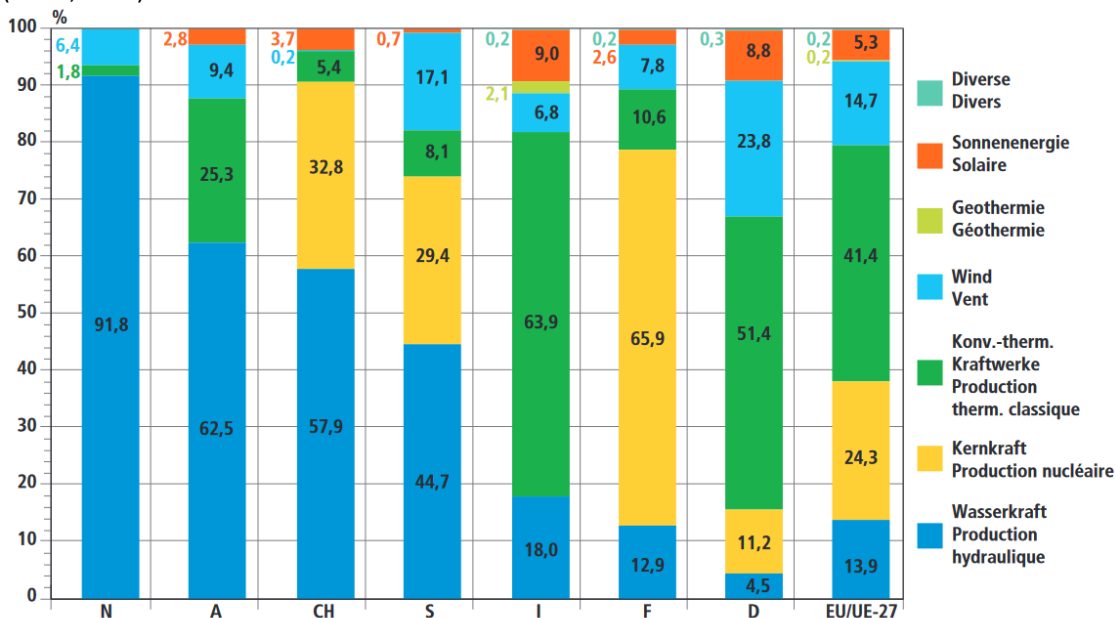


BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021 (Fig. 10)
OFEN, Statistique suisse de l'électricité 2021 (fig. 10)

Graphique 1 – Production et consommation d'électricité en Suisse pour l'année 2021 (OFEN, 2021)

On constate que la production d'électricité est insuffisante pendant l'hiver (ligne en noir sur le graphique ci-après). En hiver nous sommes obligés d'importer de l'électricité, car nous n'en produisons pas assez.

Cette électricité est principalement importée de l'Allemagne qui produit la majorité de son électricité à base de charbon (OFEN, 2021).



BFE, Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2021 (Fig. 5)
OFEN, Statistique suisse de l'électricité 2021 (fig. 5)

Graphique 2 – Structure de production de divers pays pour 2020 (OFEN, 2021)

D'ici 2030 les émissions de CO₂ doivent être réduites drastiquement. Il sera nécessaire d'augmenter la production d'électricité indigène pour répondre aux besoins en électricité en hiver.

4 OBJECTIFS

Les objectifs du projet sont les suivants :

1. Mise au point d'un prototype de moteur Stirling intégrable dans une installation technique du bâtiment (intégrant une régulation et commandes automatiques de fonctionnement).
2. Valider les performances du moteur Stirling de Schmid AG dans un environnement de fonctionnement réel. Selon les pré-études et mesures préalables effectuées par HEPIA et Schmid AG, ce système permettra d'utiliser le gaz naturel de manière 40 à 50% plus efficacement que la simple combustion. Nous devons valider qu'il est possible de produire plus de 2 kWh de chaleur à partir d'un kWh de gaz.

Le schéma ci-dessous décrit le flux des énergies :

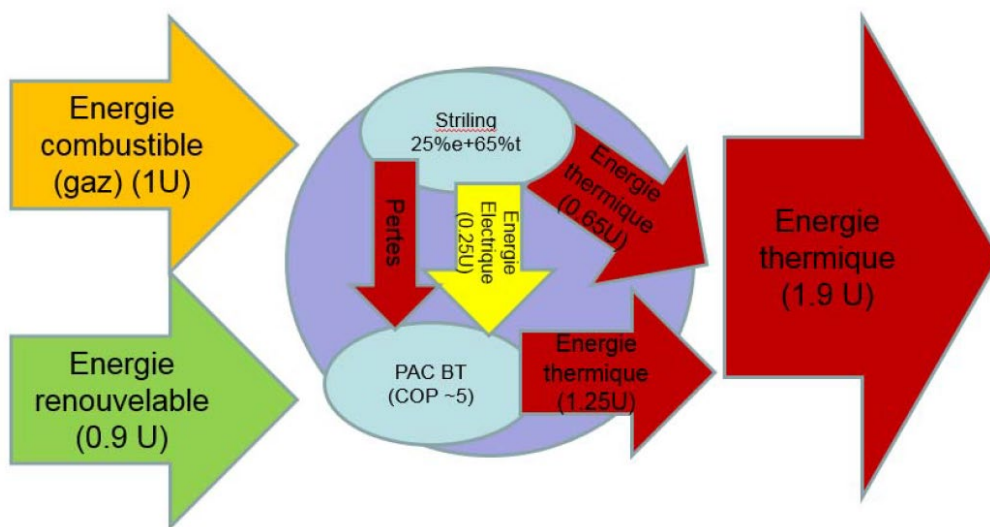


Figure 1 – Flux des énergies estimé en début de projet

3. Proposer et présenter un concept d'intégration avec ses variantes établit sur la base des tests effectués et des modes de fonctionnement les plus favorables, à l'intention des bureaux d'études et installateurs – en portant une attention particulière à la simplicité de la mise en œuvre et de la vulgarisation de ce concept.
 - Pour atteindre cet objectif, l'installation à Plan-les-Ouates pourra fonctionner à différents niveaux de température, et intégrera une pompe à chaleur afin de consommer en direct l'énergie thermique produite. En effet, mis à part les aspects purement financiers, les difficultés suivantes sont souvent rencontrées pour les installations de production « mixtes » thermiques et électriques :
 - La planification qui doit intégrer les demandes thermiques et électriques, ce qui demande une coordination qui n'est pas toujours faite dans la pratique par manque de temps.
 - Le réglage qui doit être piloté soit par la chaleur, soit par l'électricité, soit un système mixte. Le meilleur choix demande une connaissance fine des besoins d'énergie qui n'est pas toujours disponible
 - La question de la vulgarisation de la qualité de l'énergie électrique produite
 - La consommation de l'électricité produite en direct par une pompe à chaleur vise à simplifier la planification d'un tel système dans les petites installations, et de mettre en évidence le gain final de conversion de manière claire. Une réduction de la consommation fossile d'un facteur deux permet par exemple de mieux expliquer l'avantage de ce système, et de simplifier sa planification et son intégration en complément d'installations techniques.

5 COGÉNÉRATION

La cogénération est la production simultanée de deux énergies différentes dans la même chaudière. L'utilisation de chaudières qui produisent de l'électricité et de la chaleur permettrait de réduire les importations d'électricité en hiver et améliorer la production d'énergie électrique indigène.

5.1 SYSTEME STIRLING

Dans le cadre de ce projet, nous sommes en train de tester un prototype de système Stirling (Stirlingstar) développé par la société Schmid AG et Monsieur Budliger. Cette chaudière permet de produire de l'électricité et de la chaleur de manière simultanée.

Ses principales caractéristiques techniques sont :

- Puissance électrique 2 kW
- Rendement électrique de 25%
- Puissance thermique 5.3kW

Son principal avantage par rapport à d'autres chaudières qui réalisent de la cogénération est l'utilisation d'un système Stirling à pistons libres.

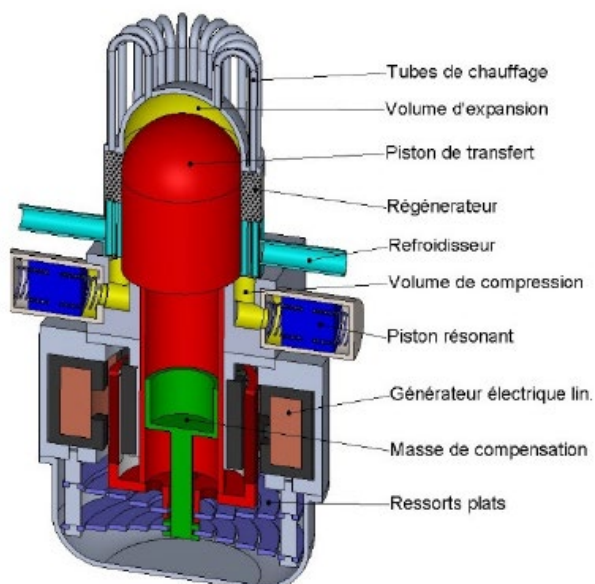


Figure 2 – Principe de fonctionnement du système Stirling

L'ensemble de l'appareil est placé dans une enceinte hermétique. Les pistons libres oscillent linéairement, suspendus latéralement par des paliers à gaz, évitant tout frottement et réduisant les pertes mécaniques au minimum. Grâce à l'absence d'embellages, aucune lubrification n'est nécessaire, ce qui réduit tout entretien de l'appareil au minimum.

Cette innovation permet d'obtenir de meilleures performances par rapport aux autres options existantes sur le marché ainsi qu'un coût d'entretien similaire à une chaudière traditionnelle à gaz.

Il y a actuellement 7 prototypes en fonctionnement dans divers scénarios :

- Couplé à une pompe à chaleur dans une piscine (Plan-les-Ouates)
- Banc de test dans un laboratoire de l'école d'ingénieurs d'Yverdon
- 2 prototypes produisent l'ECS à l'usine de Schmid AG à Berne
- 3 prototypes sont utilisés comme chaudière d'appoint pour du logement à Granges, Nidau et Saint-Gall

Le rapport de l'entreprise Schmid AG pour 2022 se trouve en annexe à ce document.

6 INSTALLATION À PLAN-LES-OUATES

6.1 SITUATION AVANT TRAVAUX

La chaudière gaz Buderus existante produit l'eau chaude sanitaire et le chauffage pour la piscine, la salle de gymnastique ainsi que le parasolaire.

L'eau de la piscine doit être maintenue à au moins 24°C pour assurer un confort minimal aux utilisateurs de la piscine. Pour des raisons d'hygiène et de respect des normes en vigueur, une partie de l'eau (1-10m³) est mise à l'égout une fois par semaine. Cette eau est remplacée par l'eau du réseau SIG (10°C) qui doit être chauffée jusqu'à 24°C. Cela peut prendre jusqu'à un jour à la chaudière Buderus.

Cette chaudière dispose d'une régulation vétuste qui maintient à 70°C l'eau qui circule dans le collecteur principal de la distribution. Nous avons déjà conseillé en 2019 à la commune de Plan-les-Ouates de limiter sa puissance, car elle s'allumait et éteignait constamment, signe clair qu'elle est surdimensionnée pour son utilisation actuelle. L'entreprise Multi-therme qui s'occupe de la maintenance a bridé la chaudière et cela a permis à la commune de réaliser des économies dans leur facture de gaz.

Notre installation est indépendante de la chaudière Buderus existante et l'objectif est d'éviter au maximum que la chaudière chauffe l'eau de la piscine.

6.2 SCHEMA DE PRINCIPE

Dans notre projet nous avons testé le couplage du système Stirling à une pompe à chaleur.

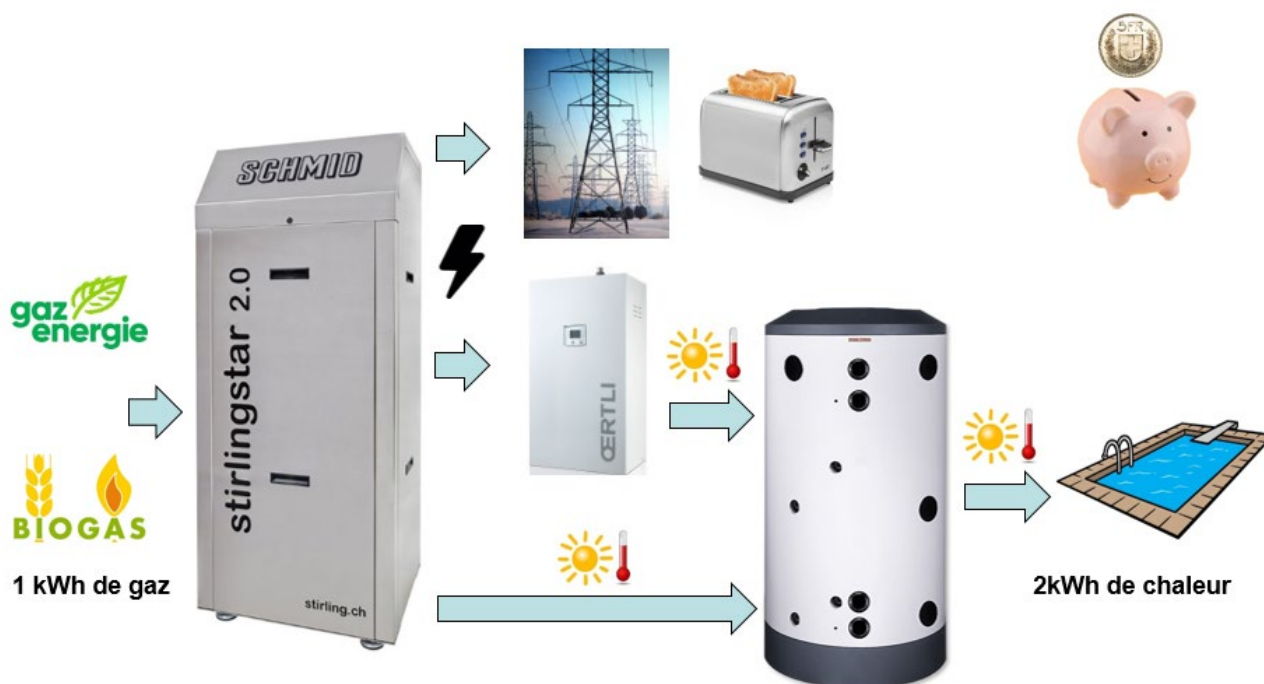


Figure 3 – Schéma de principe de l'installation à Plan-les-Ouates

Dans la figure ci-dessus on a le principe de fonctionnement que nous avons testé à Plan-les-Ouates :

- Le système Stirling est alimenté en gaz ou biogaz, il produit :
 - o 2kW d'électricité qui alimentent une pompe à chaleur avec une partie rejetée dans le réseau ou autoconsommée dans le bâtiment
 - o 5.3 kW de chaleur qui est stockée dans un ballon tampon
- La PAC produit de la chaleur qui est aussi stockée dans le ballon tampon
- Le ballon tampon dissipe l'énergie produite dans le bassin tampon de la piscine. La piscine utilise beaucoup d'énergie pour maintenir en température l'eau du bassin et nous permet de simuler un bâtiment.

L'objectif est d'optimiser la production de chaleur et d'électricité pour réaliser des économies par rapport à l'installation existante.

Nous utilisons la PAC dans la gamme de températures où elle a le meilleur COP (coefficient de performance) 30°C-45°C avec un COP égal à 4. Nous avons mis une consigne pour qu'elle chauffe l'eau jusqu'à 45°C dans le ballon tampon et ensuite elle redémarre si la température baisse. C'est-à-dire qu'avec 1 kWh électrique on obtient 4 kWh thermiques.

Le système Stirling permet d'augmenter la température d'entrée de l'eau de 45°C jusqu'à 55°C. Si nous prenons la fiche technique, le rendement thermique devrait être à environ 70%.

Si nous prenons le système complet, nous espérons qu'à partir de 1 kWh de gaz nous obtiendrons au final au moins 2 kWh de chaleur.

6.3 INSTALLATION

Lors de la planification de ce projet, nous avons dû faire face à de multiples défis que l'on rencontre souvent dans les rénovations de bâtiments.

Le système Stirling a été installé sur le socle d'une ancienne chaudière qui n'était plus utilisée. L'entreprise Bertolit a dû réaliser un diagnostic amiante avant toute autre intervention. Les éléments concernés ont été marqués et mis en décharge dès qu'ils ont été démontés. L'ancienne chaudière a été démontée et mise en décharge.

L'installation du prototype système Stirling a été complexe :

- Le fabricant du système Stirling a eu quelques problèmes techniques ce qui a retardé la livraison et installation du prototype ;
- Nous avons fait appel à un spécialiste de la manutention pour le descendre dans les escaliers vers la chaufferie. Il pèse 300 kg et il ne peut pas être démonté ;
- Il s'agit d'un prototype qui a dû être homologué sur site par la SSIGE. Notre prototype a été le premier homologué en Suisse. Le processus a été assez chronophage.
- Ajout d'une ventilation supplémentaire pour respecter les normes dans les cas où une chaudière gaz est dans la même chaufferie qu'une PAC

Plusieurs entreprises sont intervenues dans ce projet :

- Jenni Elektrotechnik (échangeurs sur mesure pour le bassin tampon)
- Badan chauffage a réalisé toute la partie hydraulique
- Piazzolla s'est occupé des installations électriques

Nous avons réalisé avec l'aide de nos collègues de la filière technique des bâtiments :

- Installation des échangeurs à l'intérieur du bassin tampon de la piscine. Ce bassin de 30 m³ est utilisé pour chauffer l'eau de la piscine ;
- MCR (mesure commande régulation) en utilisant des logiciels open source et sur des raspberry pi 4. Cela nous permet de faire le suivi énergétique de l'installation et de pouvoir faire nos propres réglages sans l'intervention d'externes.

6.4 MISE EN SERVICE

Nous avons pu inaugurer l'installation le lundi 22 novembre 2021 à la salle communale de Plan-les-Ouates. Une centaine de personnes ont assisté aux présentations des intervenants :

- Accueil et mot de bienvenue
 - o Mario Rodriguez, Conseiller Administratif de la Commune de Plan les Ouates
 - o Gilles Triscone, Professeur HES et responsable de la coordination de la recherche à HEPIA
- Fonds Vitale Innovation
 - o Alexandre Bagnoud, Ingénieur Environnement à SIG
 - o Cédric Jeanneret, Membre de la Direction Transition Energétique à SIG
- Les défis de la transition énergétique
 - o Emile Spierer, Attaché de Direction à l'Office Cantonal de l'Énergie
- Le fonctionnement et développement du prototype Stirlingstar
 - o Jean-Pierre Budliger, Ingénieur Concepteur du Stirlingstar
- La mise en place de l'installation
 - o Denis Iglesias, Collaborateur Scientifique à HEPIA

Les présentations ont été suivies par des visites en petits groupes de l'installation.

7 MONITORING DE L'INSTALLATION

7.1 SYSTEME STIRLING

Nous collaborons étroitement avec M. Anderegg (chef de projet Schmid) pour transmettre tous les problèmes constatés. Ils sont intervenus 2 fois pour ramener le moteur du système Stirling dans leur atelier à Berne et faire les mises à jour selon les divers retours d'expérience sur les 7 systèmes Stirling actuellement en service.

Le système Stirling est très sensible à la température d'entrée d'eau (40-45°C). Si la température est en dessus ou en dessous de cette plage, le système Stirling se bloque et s'éteint automatiquement. Pour pallier en partie à ce problème, nous avons mis une vanne 3 voies avec une vanne thermostatique. L'idée est très similaire aux vannes thermostatiques qu'on retrouve sur les radiateurs. Ce dispositif permet de régler une température maximale à partir de laquelle la vanne se ferme et l'eau retourne directement dans le circuit de retour.

Les températures de fonctionnement du système Stirling doivent être fixées à la mise en service, celles-ci ne peuvent pas être modifiées à distance, l'écart entre la température d'entrée et sortie est fixé à 10°C. En l'état cela ne permet pas le fonctionnement du système Stirling en autonomie et il doit être couplé à un autre producteur de chaleur (PAC, solaire thermique, autre chaudière, etc....)

Les possibilités de régulation du système Stirling sont très limitées. Il est soit à 100% soit en veille (0%). L'entreprise Schmid est en train de développer une deuxième allure (50%). Ces deux allures permettraient au système Stirling d'éviter de s'éteindre et rallumer trop souvent et augmenter les performances du système.

Nous disposons d'un accès à distance aux données, telles que :

- Electricité produite (kW)
- Energie thermique produite (kW)
- Température d'entrée et sortie d'eau (°C)
- Etat du système (allumé/éteint)
- Données internes de la machine (température bruleur, pression du gaz, etc...)

L'entreprise Schmid peut réaliser à distance des tâches de maintenance comme par exemple allumer le système Stirling ou mettre à jour son logiciel.

7.2 COMPTEURS

Nous avons dû intervenir à plusieurs reprises sur certains compteurs ou sondes de températures qui dysfonctionnaient. Ces interventions nous ont permis d'identifier d'autres problèmes qui ont été corrigés.

7.3 PISCINE

Nous avons aussi constaté que la température extérieure avait une grande influence sur la température de l'eau de la piscine. Dès l'arrivée de la canicule en été 2022, nous avons dû ajouter une consigne pour arrêter de faire circuler de l'eau dans les échangeurs du bassin tampon dès que le seuil critique de 24°C était atteint. L'installation n'a quasiment pas fonctionné durant cette période estivale.

Ce problème a été signalé par les gardiens de la piscine qui contrôlent de manière quotidienne la température du bassin.

Pendant que notre installation a été arrêtée, les échangeurs existants alimentés par la chaudière Buderus ont continué à fonctionner. La sonde de température qui sert de consigne à la régulation des échangeurs existants se trouve au fond de la piscine ou l'eau est plus froide, elle se déclenche donc avant notre sonde qui se trouve dans le bassin tampon. Ce bassin tampon se trouve en annexe de la piscine et sert principalement à faire circuler l'eau de la piscine et à renouveler celle-ci si nécessaire.

8 RÉSULTATS

8.1 DONNEES

Nous avons utilisé les données entre le 31/07/22 et le 31/07/23.

Ici nous n'analysons pas la première année d'utilisation car nous avons dû faire face aux problèmes suivants :

- Système Stirling
 - o Sensibilité au débit et à la température de l'entrée d'eau froide
 - o Surchauffe
- Mesure-commande-régulation (MCR)
 - o Panne de plusieurs compteurs qui ont dû être remplacés
 - o Panne de Raspberry
 - o Panne de la centrale M-Bus
- Réseau hydraulique
 - o Fuite dans le réseau hydraulique dans le vide sanitaire
 - o Réseau bouché

Le monitoring installé par HEPIA a permis d'avoir une grande quantité de données. Nous avons utilisé les données suivantes :

- Stirling
 - o Consommation de gaz
- PAC
 - o Energie thermique produite
 - o Energie électrique consommée
- Piscine
 - o Energie thermique dissipée dans le bassin tampon
- Accessoires (ventilation, compteurs, Raspberry, ...)
 - o Energie électrique consommée
- Chaufferie
 - o Température ambiante

Schmid AG nous a permis d'accéder aux données des compteurs du Stirling. Les données suivantes ont été utilisées :

- Puissance thermique
- Puissance électrique
- Statuts de fonctionnement

8.1.1 Electricité

Le compteur EMU ne compte pas directement l'énergie par phase, nous avons cependant la puissance par phase au quart d'heure. Les données des compteurs de Schmid disposent d'un relevé toutes les 5 minutes.

Nous avons réalisé une comparaison et nous obtenons :

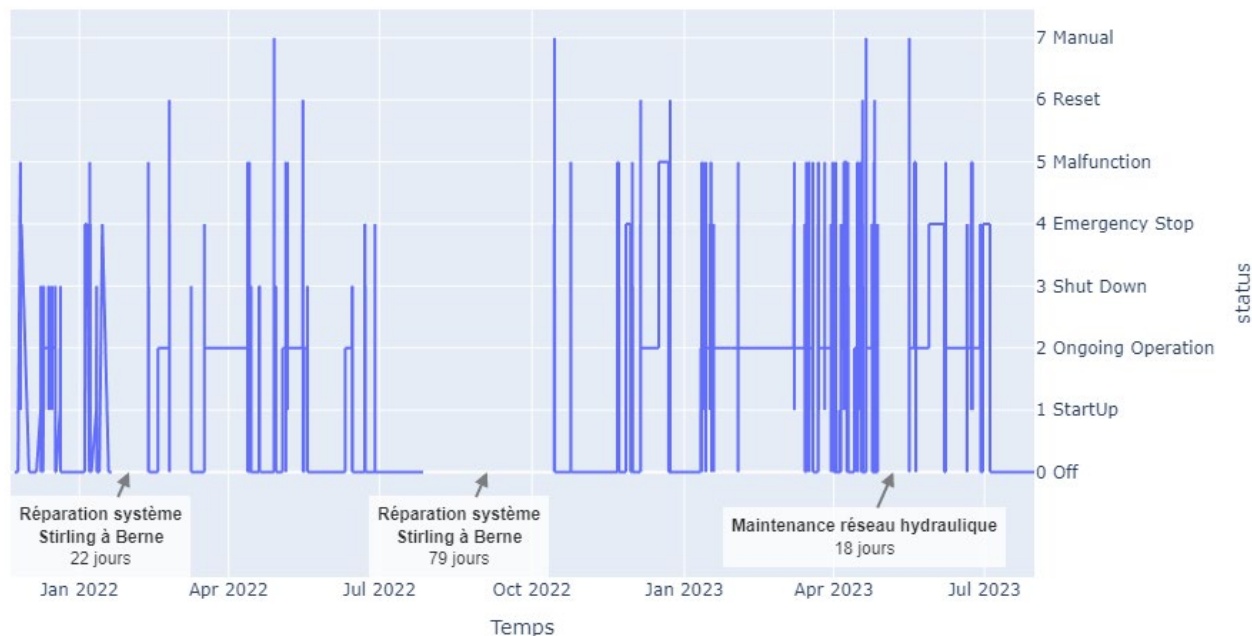
- Compteur Schmid AG
 - o Consommation électrique : 266.95 kWh
 - o Production électrique : -4325.75 kWh
- Compteur EMU
 - o Consommation électrique : 241.41 kWh
 - o Production électrique : -4591.47 kWh

Nous avons retenu les données de Schmid AG qui sont plus précises. Le système Stirling est conçu pour effectuer de très longs cycles de fonctionnement à une vitesse constante, et ne permet pas de moduler son allure en fonction des besoins.

8.2 STIRLING

8.2.1 Fonctionnement

Status depuis le 23/11/2021 (MES) au 31/07/2023



Graphique 3 – Statuts du système Stirling depuis sa mise en service

Dans le graphique ci-dessus on peut observer les différents statuts (« status ») depuis sa mise en service le 23/11/2021. Les statuts représentent l'état du système :

- « 0 Off » le système est éteint en mode veille
- « 1 StartUp » le système est en train de démarrer
- « 2 Ongoing Operation » le système est en train de fonctionner (production d'électricité et chaleur)
- « 3 Shut down » le système est en train de s'éteindre
- « 4 Emergency stop » le système a été arrêté d'urgence
- « 5 Malfunction » le système est en état d'erreur
- « 6 Reset » le système a été redémarré
- « 7 Manual » le système est piloté de manière manuelle et plus selon son automate

Les statuts sont très variables au long de la journée, le but du graphique est de vérifier si le système Stirling a de longs cycles de fonctionnement ou bien si c'est variable au long de la journée.

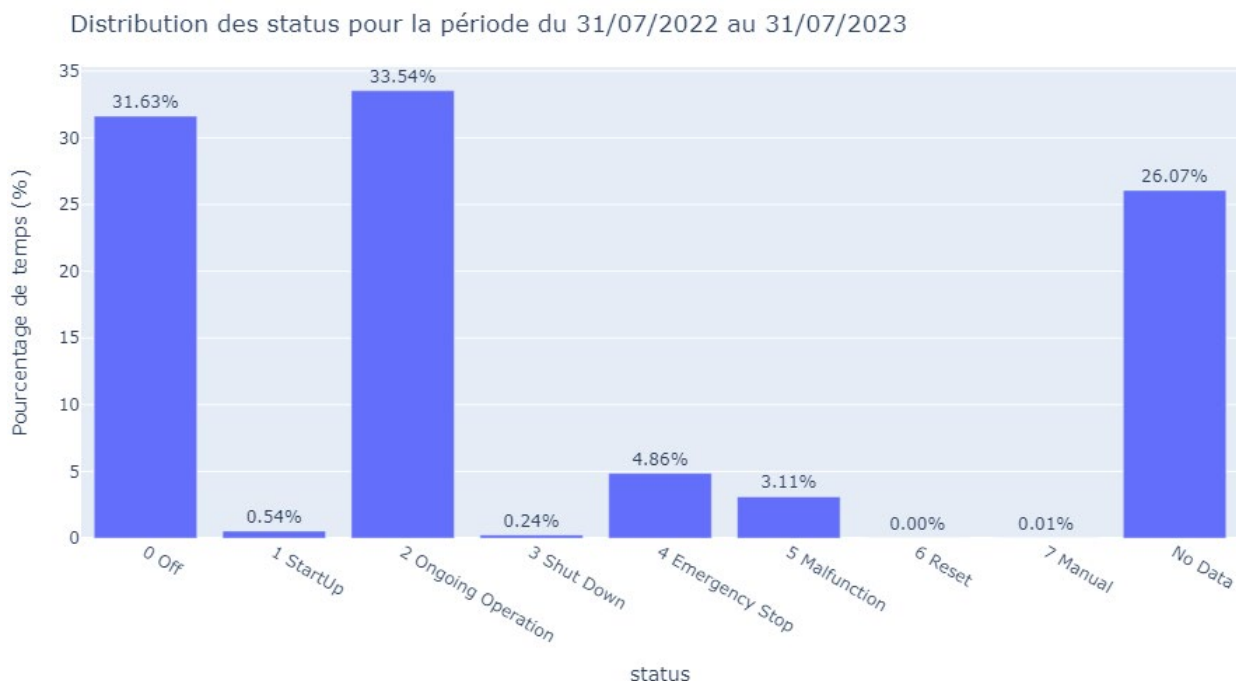
On constate qu'il y a trois périodes où il n'y a pas de données (plus de 15 jours sans données).

Le Stirling est retourné à Berne deux fois. La première fois est fin janvier 2022 pendant 22 jours. La deuxième fois en été 2022 pendant 79 jours. Il a été de nouveau fonctionnel à la mi-novembre.

Pendant cet été 2022 il y a aussi eu des problèmes de surchauffe de l'eau de la piscine qui ont obligé à arrêter tous les appareils.

Une troisième période d'arrêt a eu lieu entre le 27 avril et le 16 mai 2023 pour cause de maintenance du réseau hydraulique et MCR.

La période retenue pour réaliser l'analyse est du 31/07/2022 jusqu'au 31/07/2023. Bien que le système Stirling n'ait été opérationnel qu'à partir du 23 novembre 2022, il est impératif de prendre en considération les défis effectivement rencontrés. L'objectif sous-jacent consiste à évaluer les performances du système Stirling avec une pompe à chaleur dans des conditions réelles.



Graphique 4 – Distribution des statuts pour la période analysée

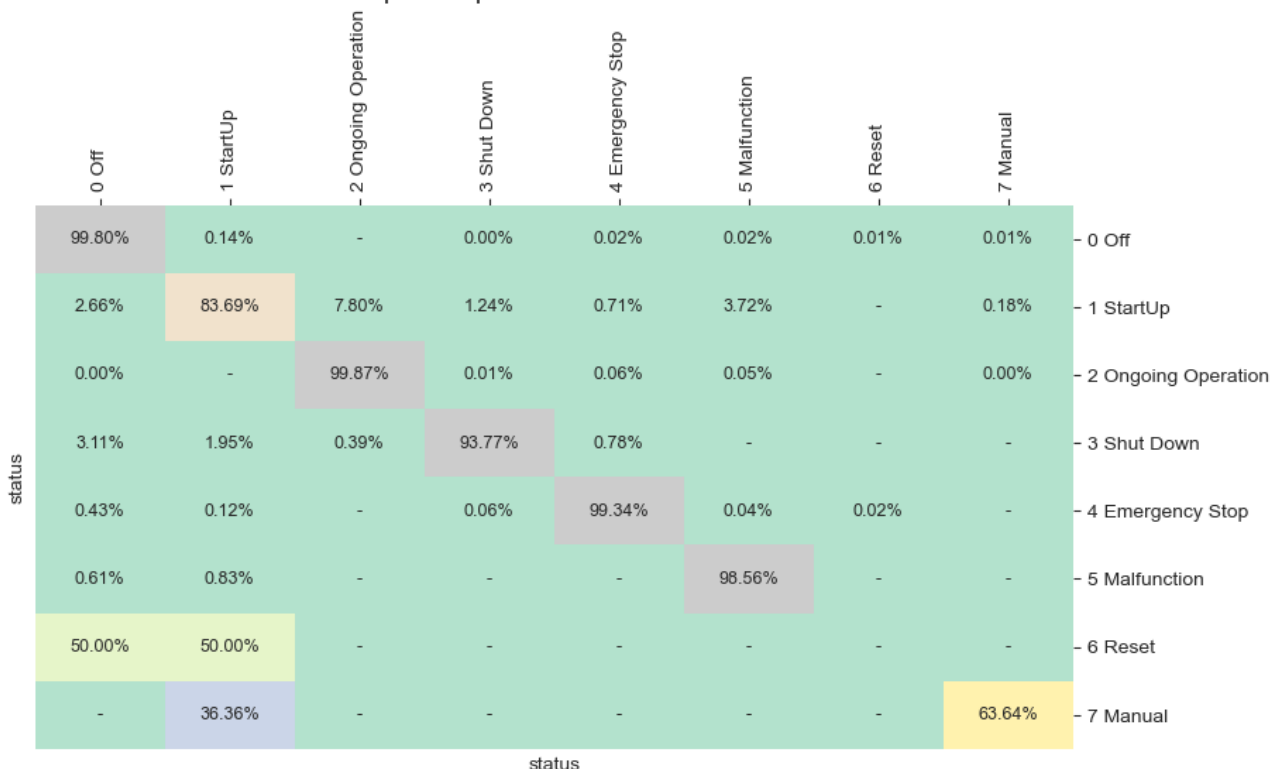
Dans le graphique ci-dessus, on observe que plus de 33% du temps (environ 2938 h) le système Stirling est en fonctionnement et environ 32% du temps (environ 2771 h) il est en « stand-by ».

On observe aussi que plus de 26% du temps (environ 2284 h), il n'y a pas de données, ce qui veut dire que le système Stirling est complètement éteint. Les raisons peuvent être :

- Maintenance prévue
- Panne
- Arrêt de l'installation dû à une panne d'un autre appareil (par exemple fuite d'eau dans le réseau hydraulique)

Le graphique suivant permet de voir comment les statuts changent.

Transition Matrix pour la période du 31/07/2022 au 31/07/2023



Notes:

Les lignes représentent les status précédents.

Les colonnes représentent le prochain status.

Les valeurs indiquent la probabilité de changement de status.

Figure 4 – Matrice de transition pour la période analysée

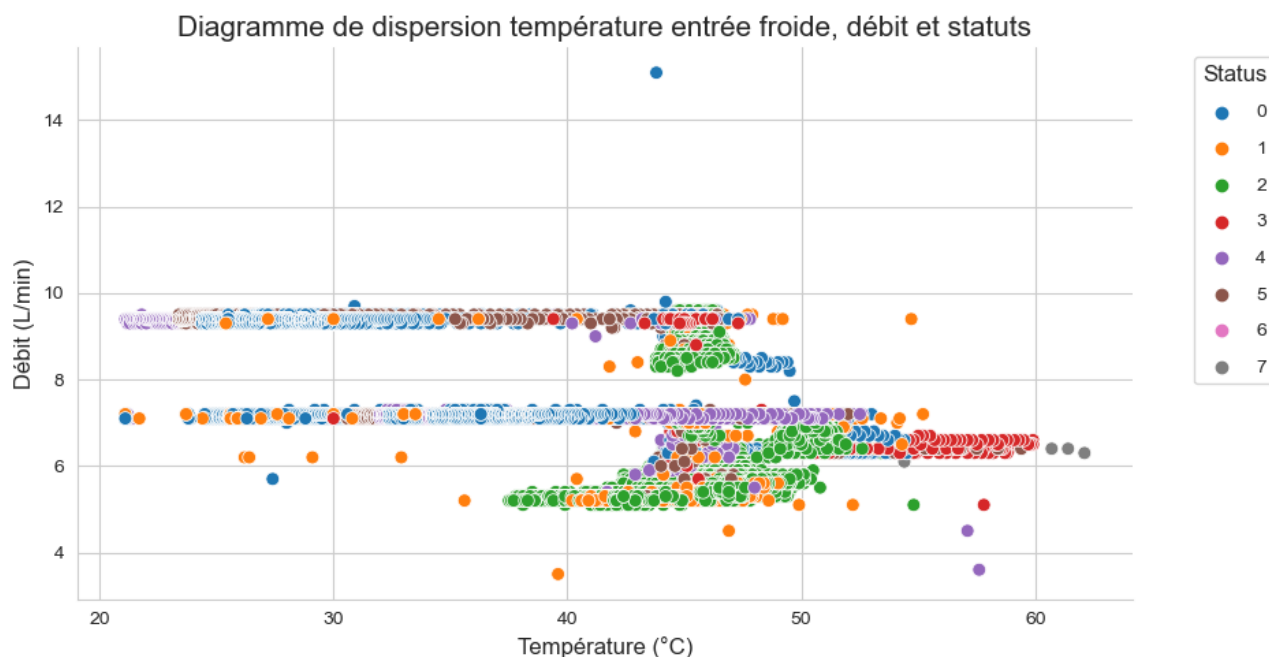
Ce graphique permet de savoir quel est la probabilité qu'un statut soit suivi d'un autre. Nous pouvons voir certaines informations intéressantes :

- Le statut « 1 » de démarrage est suivi dans 7.8% des cas par un statut « 2 » dans le lequel le système fonctionne, par contre dans 3.72% des cas il est suivi d'un statut « 5 » de panne.
- Lorsque le système est en fonctionnement (statut « 2 »), il va dans 99.87% des cas continuer dans ce statut.

8.2.1.1 Entrée d'eau froide

Au tout début du projet, nous avons constaté que le système Stirling était vulnérable à l'extinction sous l'effet des fluctuations thermiques et des oscillations du débit au niveau de l'arrivée d'eau froide. Nous avons prévu une vanne de protection à l'entrée d'eau froide pour réguler la température et le débit, nous avons eu du mal à trouver un réglage qui convienne. Après l'intervention de Schmid AG fin 2022, la situation s'est améliorée et le Stirling s'éteignait moins souvent.

Une analyse de ce phénomène pourrait permettre de déterminer quels sont les bons réglages pour optimiser le fonctionnement du système Stirling. Dans le diagramme de dispersion suivant, on peut observer quels sont les valeurs et leur statut associé.

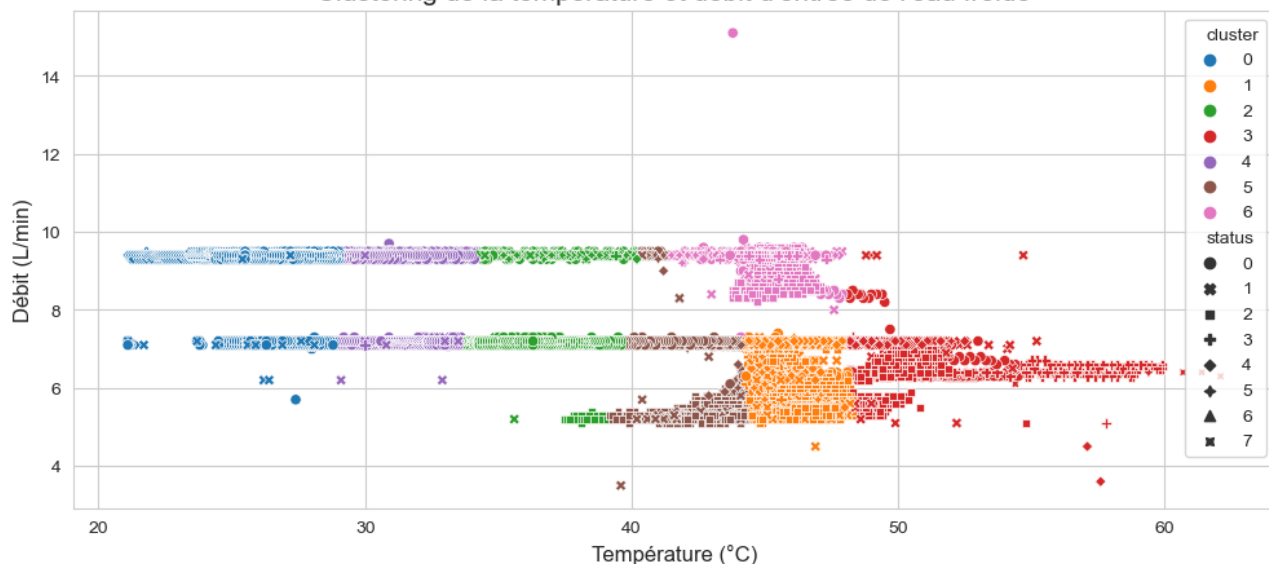


Graphique 5 – Diagramme de dispersion pour la température d'entrée d'eau froide, le débit et le statut

Le graphique ne permet pas d'estimer quel est la température et le débit idéal pour que le système fonctionne correctement.

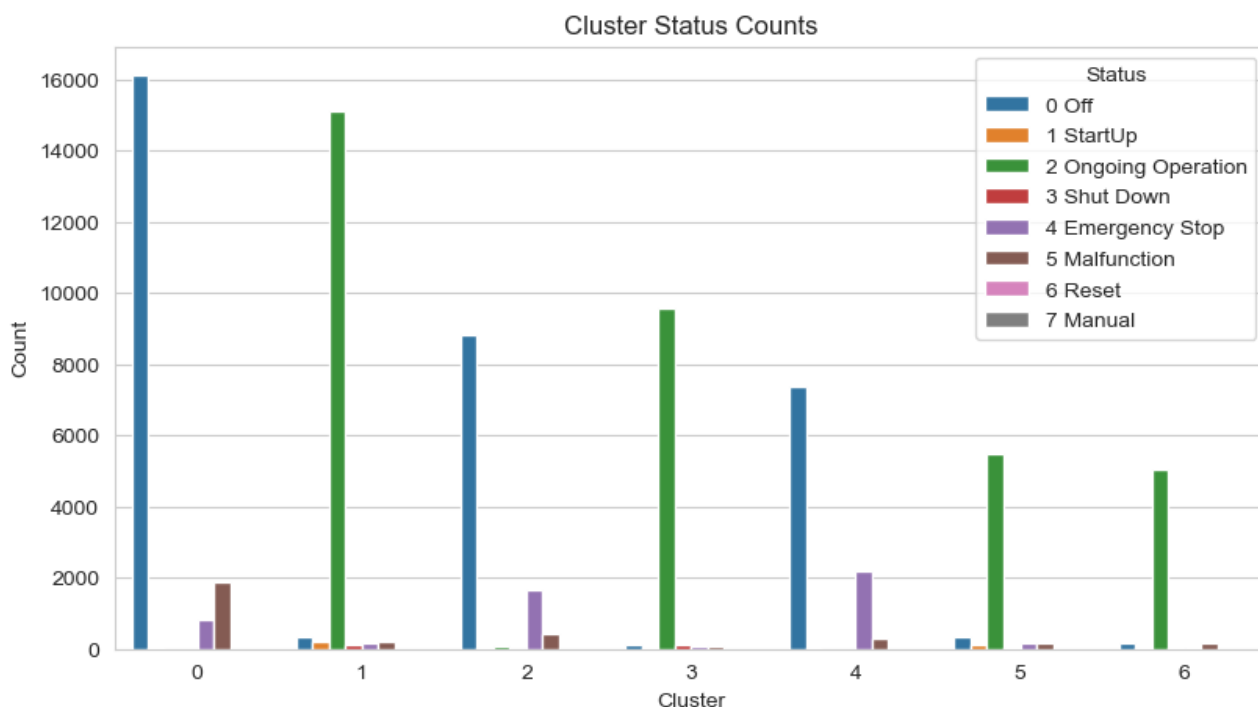
Une possible approche est de réaliser un clustering. Cette méthode de classification non supervisée permet d'utiliser l'apprentissage machine pour rassembler des données similaires.

Clustering de la température et débit d'entrée de l'eau froide



Graphique 6 – Clustering pour la température d'entrée d'eau froide, le débit et le statut

Dans le graphique ci-dessus, nous avons regroupé en 7 « clusters » les données qui ont des caractéristiques similaires. Dans le graphique de la page suivante nous verrons les caractéristiques de chacun de ces clusters.



Graphique 7 – Caractéristiques des clusters

Le cluster choisi devra regrouper un grand nombre de statut « 2 » et minimiser les autres statuts : Le cluster 1 regroupe un nombre important de statut « 2 », il semble être le choix idéal pour s'assurer que le Stirling fonctionnera correctement. Le deuxième choix pourrait être le cluster 3.

Voici les valeurs moyennes pour la température et le débit d'entrée d'eau froide par cluster :

Cluster	Température moyenne (°C)	Débit moyen (L/min)
0	26.72	8.93
1	45.97	5.95
2	36.27	7.22
3	50.37	6.88
4	31.25	8.61
5	42.55	5.56
6	45.45	9.13

Tableau 1 – Débit et température moyens par cluster

Dans le tableau ci-dessus on voit les valeurs moyennes par cluster. Lors de la mise en service, nous avons demandé à Schmid AG de régler le Stirling pour une température d'entrée de 45°C. On voit que le cluster 1 s'approche de cette valeur. Le débit n'est pas spécifié dans la fiche technique du système Stirling. Nous avons réglé le débit avec la vanne de régulation que nous avons intégré à cet effet, mais les réglages qu'elle offre ne sont pas assez précis pour assurer un débit et une température suffisamment stables.

Si l'on prend les données fournies par Schmid pour la période analysée nous avons en moyenne une température de 38.3 °C et un débit de 7.5 litres/minute. Ensuite on peut filtrer le statut « 2 Ongoing Operation ». Nous obtenons une température moyenne de 46.6 °C et un débit moyen de 6.5 litres/min.

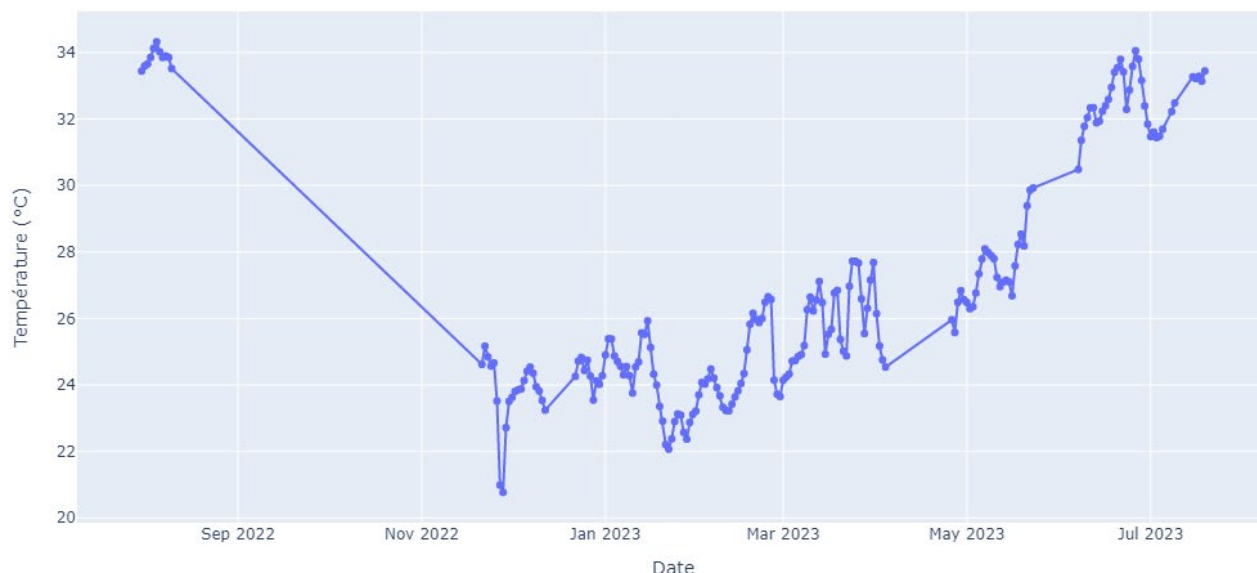
Pour un fonctionnement optimal la température doit être de 46°C et le débit 6 litres/min.

8.2.1.2 Température de la chaufferie

Lors des premières visites sur site, nous avons remarqué que la température ambiante de la chaufferie était très élevée. La chaufferie de la piscine est dans un bâtiment des années 80 et il n'y a pas eu de rénovation significative de l'enveloppe ou de la chaufferie.

On constate que la température ambiante à l'intérieur de la chaufferie est en moyenne de 26.6 °C (sur la période de mesure).

Température ambiante moyenne journalière de la chaufferie



Graphique 8 – Température ambiante moyenne journalière de la chaufferie

Dans le graphique ci-dessus, on constate que la température ambiante est très élevée. On dépasse largement les 30°C en été. Ces conditions particulières ont obligé Schmid AG à ajouter un ventilateur supplémentaire dans le Stirling pour qu'il ne surchauffe pas et arrête son fonctionnement.

Il y a plusieurs causes probables pour expliquer ces températures dans la chaufferie :

- La ventilation naturelle de la chaufferie
- Vétusté de l'isolation du réseau hydraulique
- La chaudière Buderus existante fonctionne sur consigne (température du collecteur de plus de 70 °C)
- L'ancienne chaudière était une des premières chaudières gaz à condensation du canton. Elle avait besoin d'un réseau hydraulique plus complexe que les chaudières modernes. Plus il y a de réseau hydraulique, plus il y aura de déperditions d'énergie

La piscine devrait être complètement rénovée dans les prochaines années.

8.2.2 Performances

8.2.2.1 Base normative

Les calculs ont été réalisés selon la SIA 384.344 (SIA 384.344, 2018) qui reprend la norme européenne EN 15316-4-4.

Cette norme définit les termes suivants :

Cogénération CHP (production combinée de chaleur et d'électricité) : génération simultanée d'énergies thermique et électrique par le même processus.

Rendement global : rapport de la production de chaleur utile et de la puissance électrique nette sur la consommation de combustible.

Rendement électrique : rapport de la puissance électrique nette en sortie de la cogénération sur la consommation de combustible.

Rendement thermique : rapport de la production de chaleur utile de la cogénération sur la consommation de combustible

8.2.2.2 Cogénération

Puissances journalières moyennes produites par le système Stirling (23/11/2021 au 31/07/2023)



Graphique 9 – Puissance moyenne journalière produite par le système Stirling depuis la mise en service

Le graphique précédent permet de voir l'évolution de la puissance journalière moyenne depuis la mise en service du système Stirling.

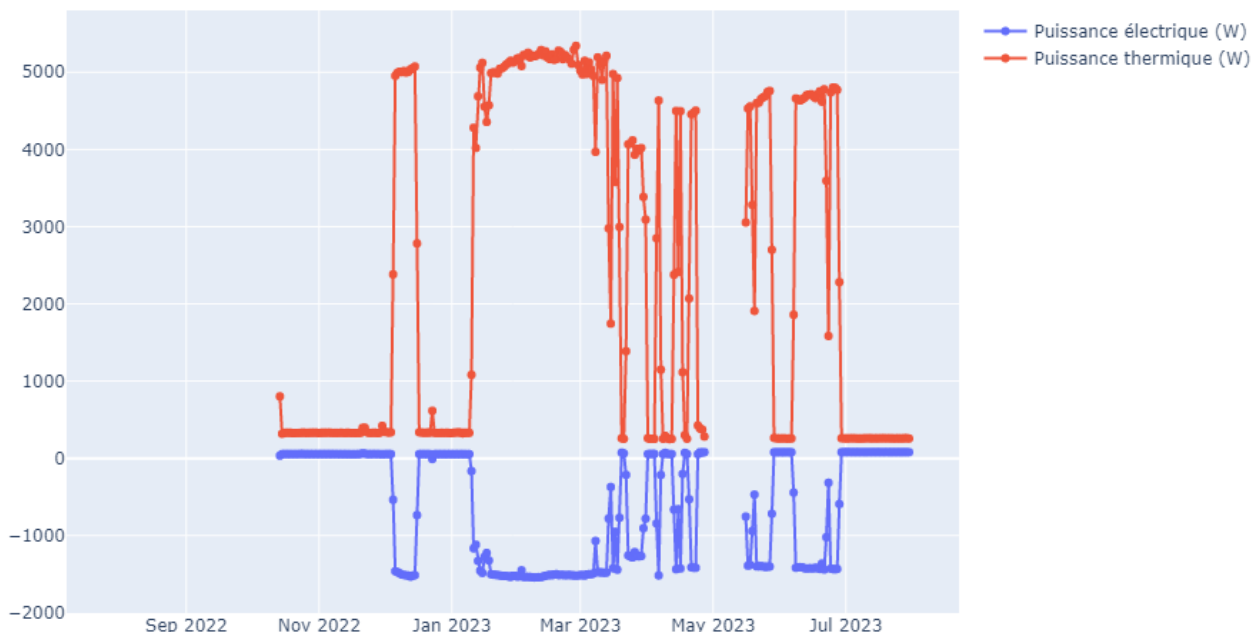
Nous avons remarqué que la puissance thermique moyenne journalière a augmenté dans le premier trimestre de 2023 par rapport au même trimestre de 2022. En ce qui concerne la puissance électrique pour ces deux périodes elle reste stable.

A partir du mois d'avril 2023, la puissance thermique et électrique journalière moyenne ont légèrement diminué. Nous observons que cette tendance pourrait être liée avec l'augmentation de la température ambiante de la chaufferie. Il n'y a pas assez de données pour quantifier cet effet.

Comme indiqué au chapitre « 8.1 Données » nous allons centrer l'analyse sur la période du 31/07/2022 au 31/07/2023. Le système Stirling était en maintenance à Berne entre le 27/07/2022 et le 14/10/2023, il n'y a donc pas de données disponibles entre ces deux dates. L'axe du temps commence au 31/07/2022 même s'il n'y a pas de données.

Nous avons voulu vérifier si la génération de chaleur et électricité a lieu de manière simultanée.

Puissances journalières moyennes produites par le système Stirling (31/07/2022 au 31/07/2023)



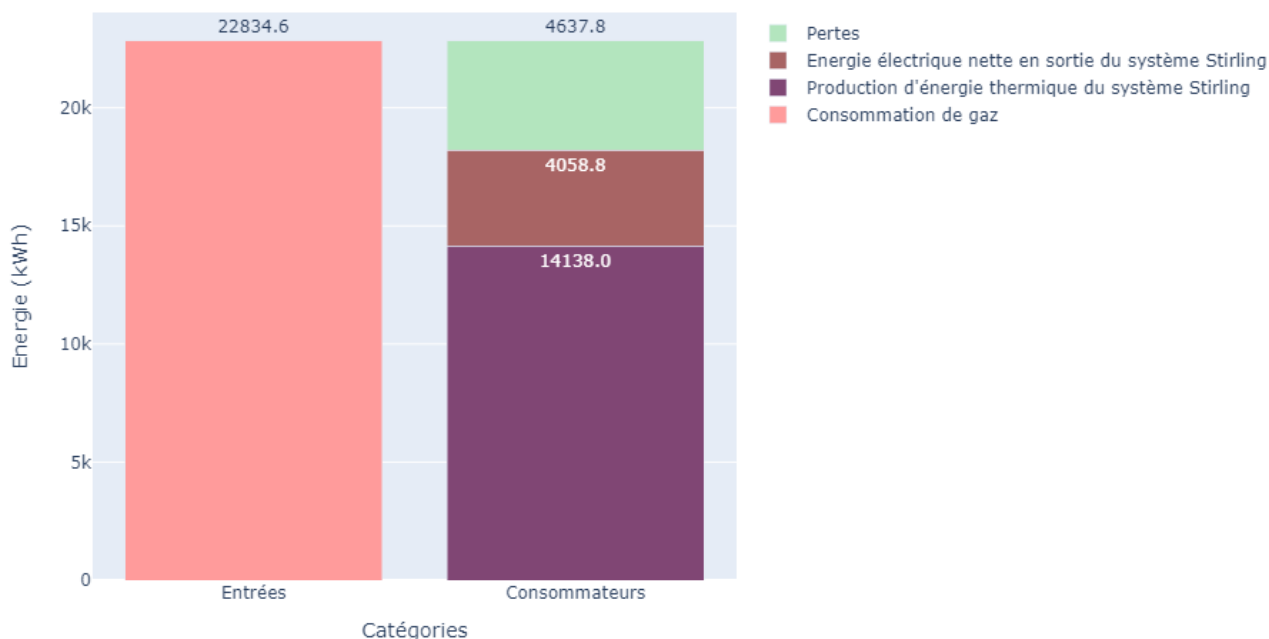
Graphique 10 – Puissance moyenne journalière produite par le système Stirling sur la période analysée

On constate sur le graphique ci-dessus que la corrélation entre la puissance électrique et thermique est élevée (0.99). Ce qui implique que le système Stirling produit de l'électricité et de la chaleur au même temps.

De manière générale on voit que le Stirling a bien fonctionné entre janvier et mars 2023. Ensuite, les moyennes journalières sont réduites.

Si l'on fait un bilan énergétique du système Stirling :

Bilan énergétique pour le système Stirling du 31/07/2022 au 31/07/2023



Graphique 11 – Bilan énergétique pour le système Stirling sur la période analysée

Dans le graphique antérieur, on observe qu'il y a une part non négligeable de pertes dans le bilan.

8.2.2.2.1 Rendement combiné

Le rendement combiné du système Stirling est :

$$\eta_{\text{Stirling}_{\text{global}}} = \frac{E_{\text{net}} + Q_{\text{produite}}}{Q_{\text{gaz}}} = \frac{E_{\text{produite}} - E_{\text{auxiliaire}} + Q_{\text{produite}}}{Q_{\text{gaz}}} \\ = \frac{4325.7 \text{ kWh}_{\text{électricité}} - 266.9 \text{ kWh}_{\text{électricité}} + 14138.0 \text{ kWh}_{\text{chaleur}}}{22834.6 \text{ kWh}_{\text{gaz}}} = 0.80$$

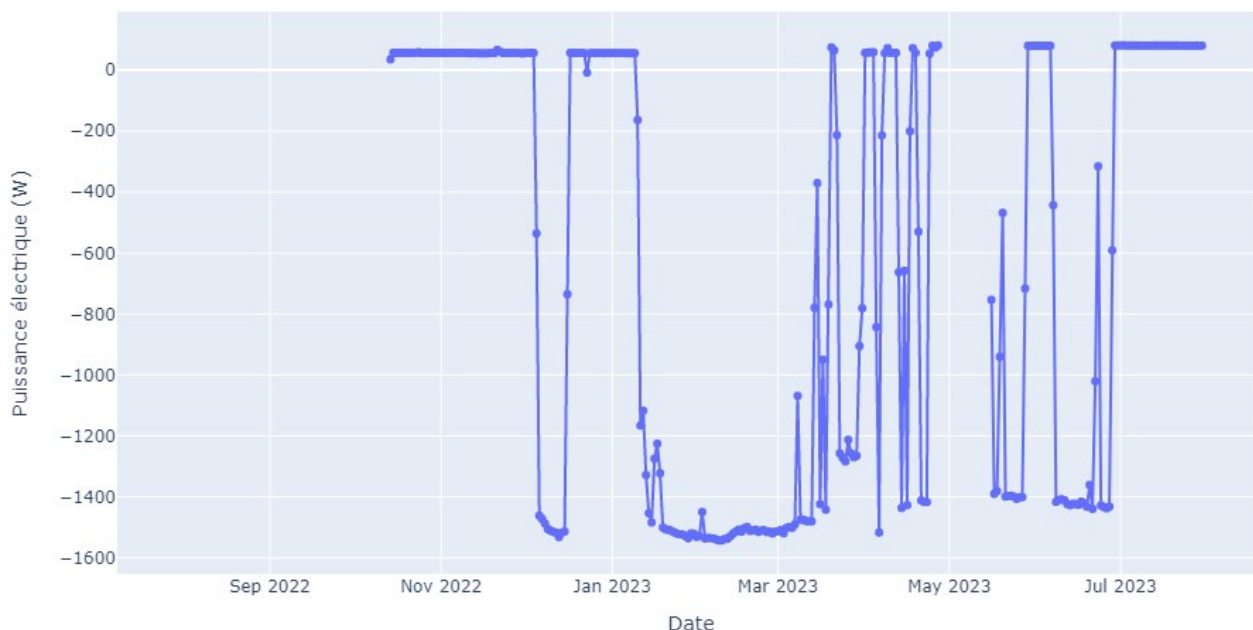
Symbole	Unité	Description
$\eta_{\text{Stirling}_{\text{global}}}$	[-]	Rapport de la production de chaleur utile et de la puissance électrique nette sur la consommation de combustible
E_{produite}	[kWh]	Energie électrique produite totale
$E_{\text{auxiliaire}}$	[kWh]	Energie électrique consommée par le Stirling (régulation, pompes, ...)
E_{net}	[kWh]	Energie électrique nette en sortie $E_{\text{net}} = E_{\text{produite}} - E_{\text{auxiliaire}}$
Q_{produite}	[kWh]	Energie thermique produite
Q_{gaz}	[kWh]	Gaz consommé

Équation 1 – Rendement combiné du système Stirling

Dans l'équation ci-dessus on peut quantifier le rendement de cogénération du système Stirling. Le fabricant annonce un rendement combiné de plus de 90%. On constate que nous avons des résultats inférieurs.

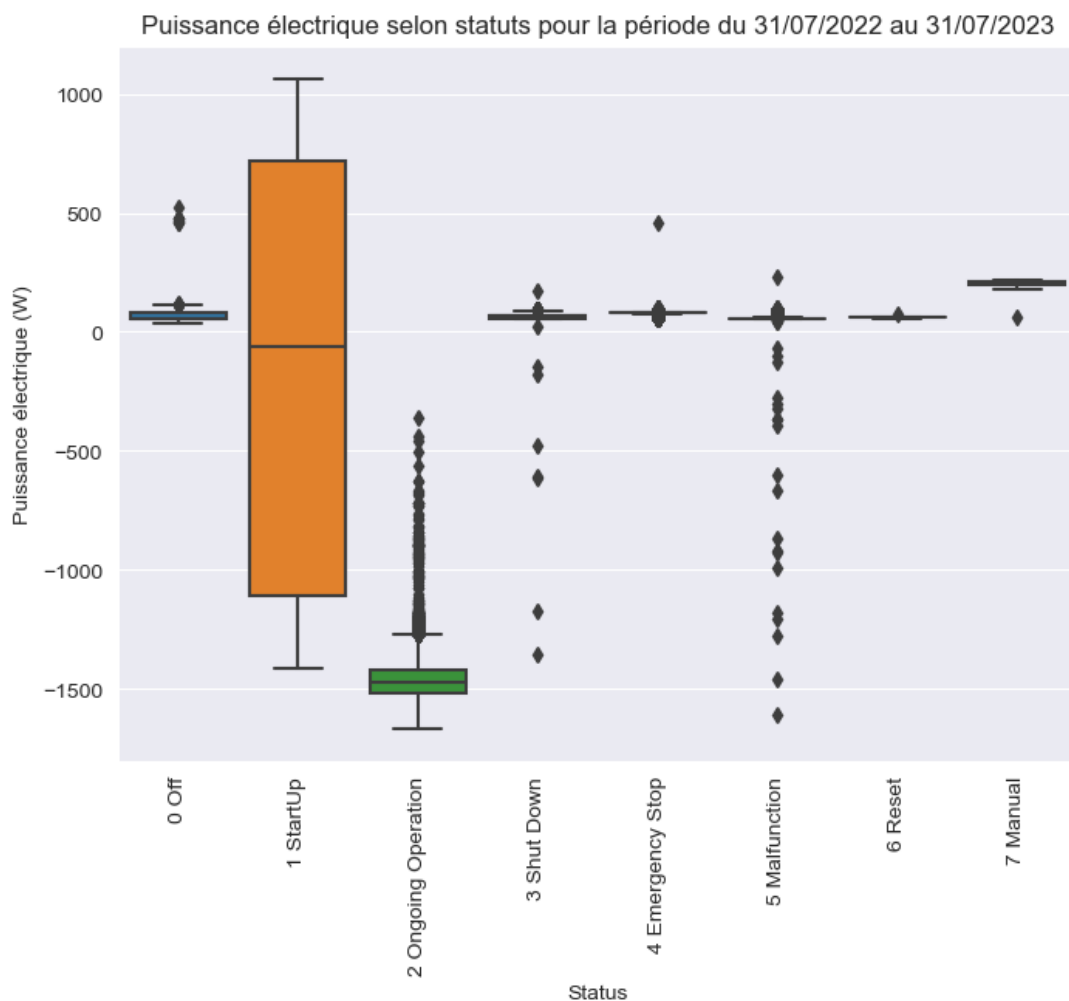
8.2.2.3 Partie électrique

Puissance électrique journalière moyenne produite par le système Stirling (31/07/2022-31/07/2023)



Graphique 12 – Puissance électrique produite par le système Stirling

Dans le graphique ci-dessus on observe la puissance moyenne journalière produite par le système Stirling. Lorsque la puissance électrique est dans la partie positive le Stirling consomme de l'électricité. Si la puissance est négative, le système Stirling est en fonctionnement et il est en train de produire de l'électricité. Comme indiqué au chapitre « 8.2.2.2 Cogénération » il y a une baisse de la puissance moyenne journalière à partir du mois d'avril 2023.



Graphique 13 – Puissance électrique produite par le système Stirling par statut pour la période analysée

Le graphique « boîte à moustaches » permet de comparer les statuts. Le rectangle va du premier quartile au troisième quartile et il est coupé par la médiane. Les segments aux extrémités représentent les extrêmes (maximum et minimum).

Nous observons que le système Stirling consomme :

- En moyenne 62.4 W lorsqu'il est en stand-by (statut « 0 »)
- Un maximum de 1065 W lorsqu'il démarre (statut « 1 »)

Il produit en moyenne 1463 W lorsqu'il est en fonctionnement (statut « 2 »).

Si nous enlevons le filtre des statuts, le système Stirling produit en moyenne 630.8 W pour la période analysée.

8.2.2.3.1 Rendement électrique

Le rendement électrique du système Stirling est :

$$\eta_{\text{stirling électrique}} = \frac{E_{\text{net}}}{Q_{\text{gaz}}} = \frac{E_{\text{produite}} - E_{\text{auxiliaire}}}{Q_{\text{gaz}}} = \frac{4325.7 \text{ kWh}_{\text{électricité}} - 266.9 \text{ kWh}_{\text{électricité}}}{22834.6 \text{ kWh}_{\text{gaz}}} = 0.18$$

Symbole	Unité	Description
$\eta_{\text{stirling électrique}}$	[-]	Rapport de la puissance électrique nette en sortie de la cogénération sur la consommation de combustible
E_{produite}	[kWh]	Energie électrique produite totale
$E_{\text{auxiliaire}}$	[kWh]	Energie électrique consommée par le Stirling (régulation, pompes, ...)
E_{net}	[kWh]	Energie électrique nette en sortie $E_{\text{net}} = E_{\text{produite}} - E_{\text{auxiliaire}}$
Q_{gaz}	[kWh]	Gaz consommé

Équation 2 – Rendement électrique du système Stirling

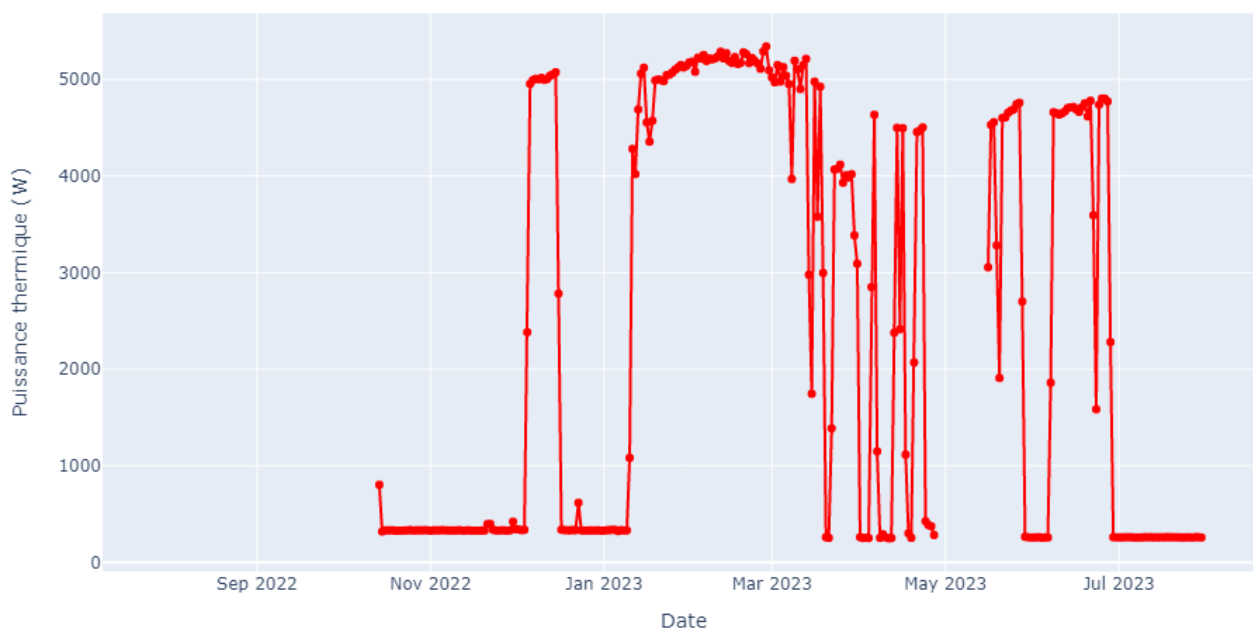
Le fabricant annonce les valeurs suivantes :

- Plus de 25% de rendement électrique
- 2 kW de puissance électrique

On constate que les valeurs obtenues sont légèrement inférieures.

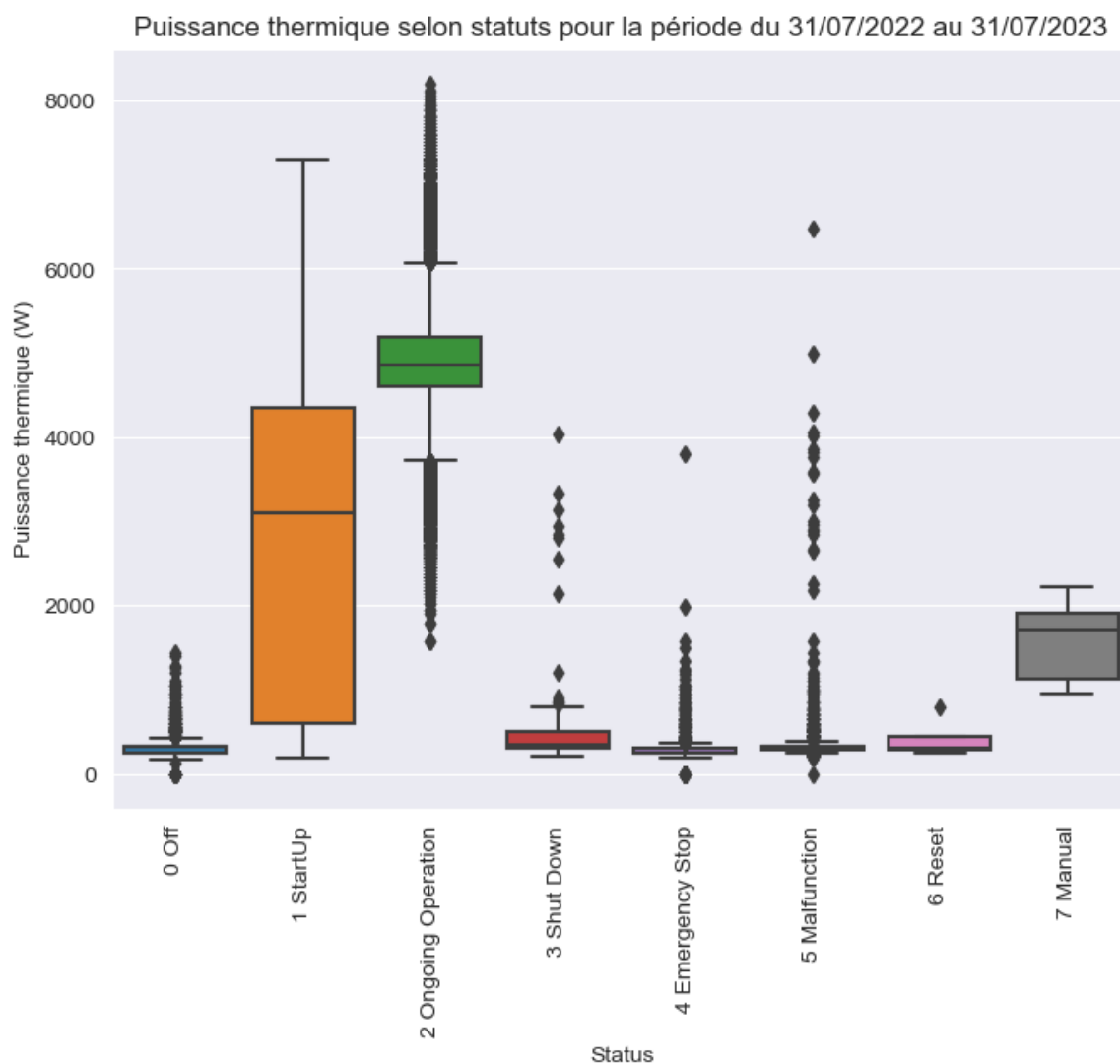
8.2.2.4 Partie thermique

Puissance thermique journalière moyenne produite par le système Stirling (31/07/2022-31/07/2023)



Graphique 14 – Puissance thermique produite par le système Stirling pour la période analysée

Dans ce graphique on constate que la puissance thermique journalière moyenne a diminué à partir d'avril 2023, il s'agit de la même tendance déjà observée pour la puissance électrique.

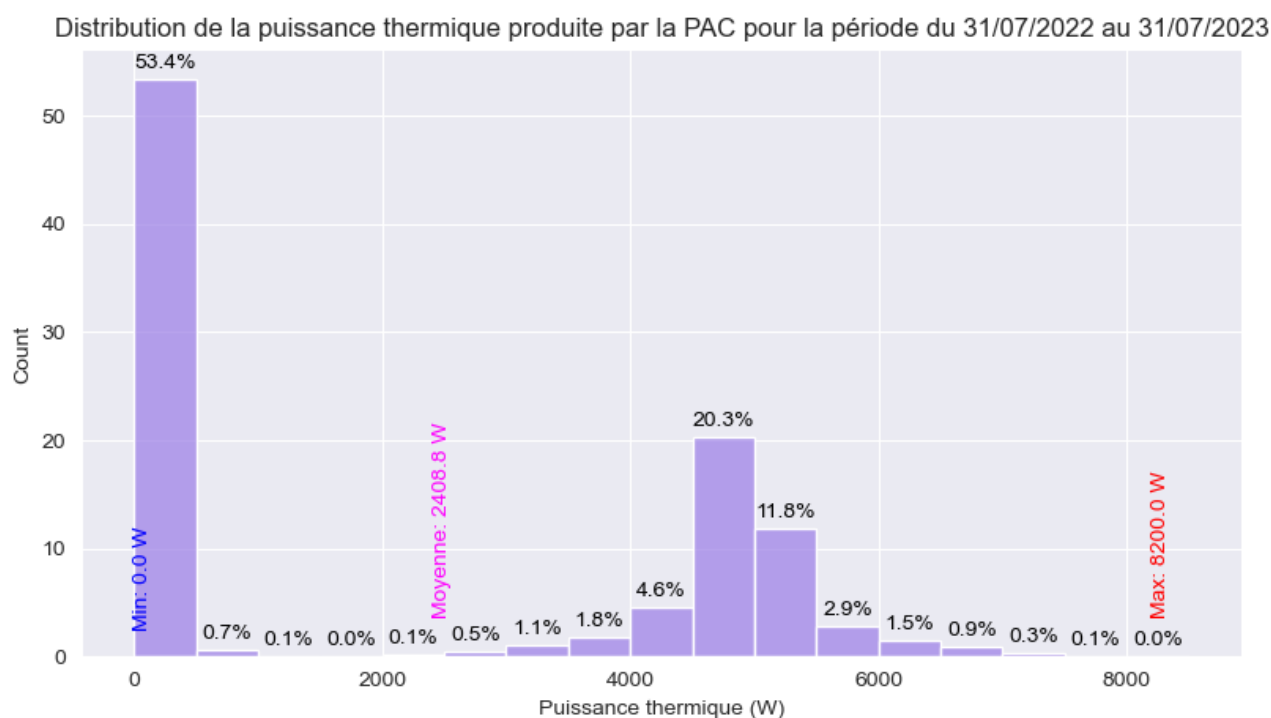


Graphique 15 – Puissance thermique produite par le système Stirling par statut pour la période analysée

Le graphique « boîte à moustaches » permet de comparer les statuts.

Nous observons que le système Stirling :

- Produit en moyenne 4903 W lorsqu'il est en fonctionnement (statut « 2 »)
- Pendant la phase de démarrage (statut « 1 ») il produit au minimum 190 W



Graphique 16 – Distribution de la puissance produite par le système Stirling pour la période analysée

Sur la période analysée la puissance thermique moyenne est de 2408.8 W.

8.2.2.4.1 Rendement thermique

Le rendement thermique du système Stirling est :

$$\eta_{\text{stirling thermique}} = \frac{Q_{\text{produite}}}{Q_{\text{gaz}}} = \frac{14138.0 \text{ kWh}_{\text{chaleur}}}{22834.6 \text{ kWh}_{\text{gaz}}} = 0.62$$

Symbole	Unité	Description
$\eta_{\text{stirling thermique}}$	[-]	Rapport de la production de chaleur utile de la cogénération sur la consommation de combustible
Q_{produite}	[kWh]	Energie thermique produite
Q_{gaz}	[kWh]	Gaz consommé

Équation 3 – Rendement thermique du système Stirling

Le rendement thermique mesuré est de 62%. Ce chiffre est inférieur à la valeur annoncée par le fabricant qui est de l'ordre de 75%.

8.3 PAC

La PAC que nous avons installée est un modèle de la marque Oertli LSP 50 SW. Sa fiche technique se trouve en annexe.

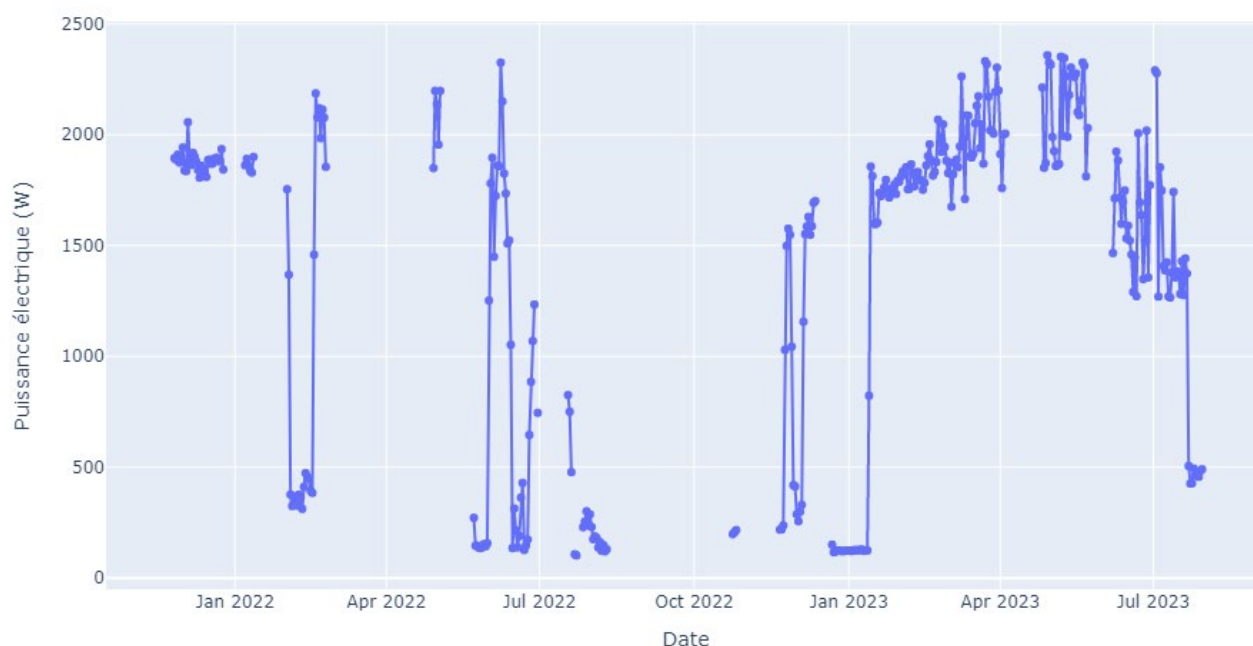
8.3.1 Fonctionnement

La PAC a fonctionné en continu sauf lors des arrêts forcés de toute l'installation. Par exemple entre le 27 avril et le 16 mai 2023 à cause de la maintenance du réseau hydraulique et MCR.

8.3.2 Performances

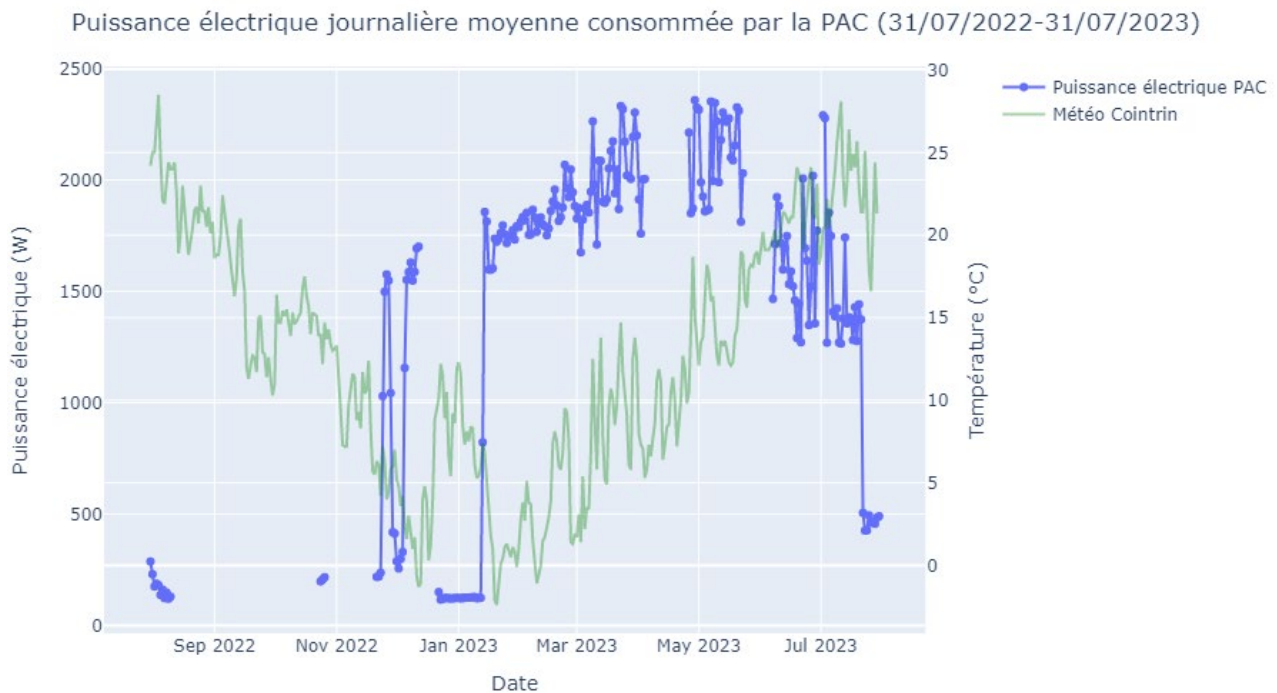
8.3.2.1 Partie électrique

Puissance électrique journalière moyenne consommée par la PAC (23/11/2021-31/07/2023)



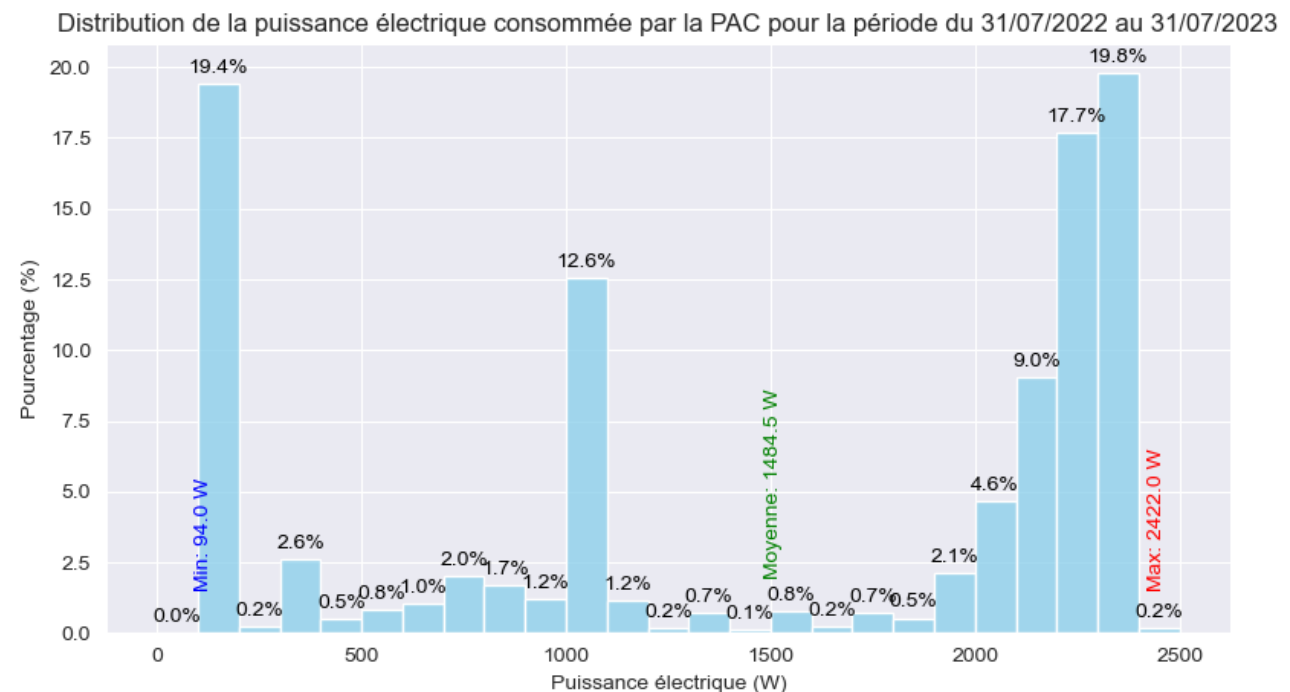
Graphique 17 – Puissance électrique consommée par la PAC depuis la mise en service du système Stirling

Sur le graphique ci-dessus nous observons que nous avons plus de données à partir de l'automne 2022.



Graphique 18 – Puissance électrique consommée par la PAC pour la période analysée

La représentation graphique antérieure permet de visualiser l'influence de la température extérieure sur la puissance électrique consommée par la PAC. En théorie, une PAC devrait consommer plus d'énergie en hiver lorsque la température est plus basse. La corrélation entre ces deux données est de -0.16, cela indique une faible corrélation entre ces variables. Une analyse plus approfondie est nécessaire pour comprendre le phénomène.



Graphique 19 – Distribution de la puissance électrique consommée par la PAC pour la période analysée

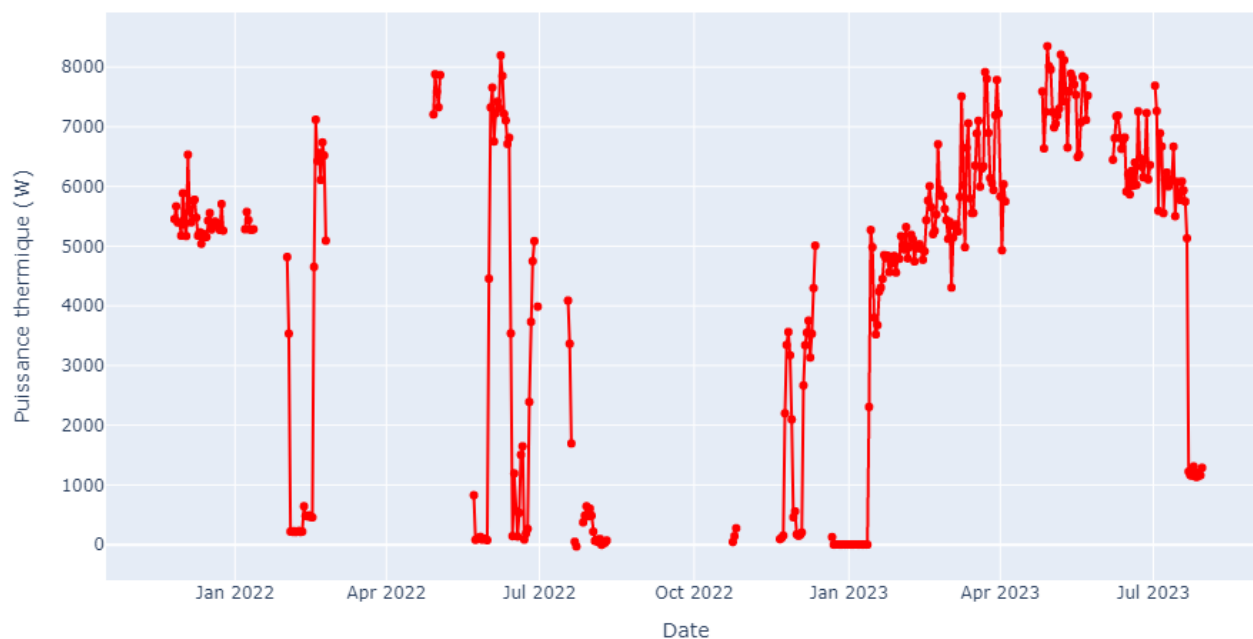
Ci-dessus, on observe comment est distribué la puissance consommée. La PAC est souvent en train de consommer entre 50 et 100W, ce qui implique un état de veille. La puissance moyenne journalière consommée est de 1484.5 W, ce qui est similaire à la production moyenne d'électricité du système Stirling lorsqu'il est en fonctionnement.

La PAC a eu le fonctionnement suivant :

- 19.4% du temps en stand-by (puissance de moins de 100 W) soit environ 1699 heures
- 10% du temps en démarrage (puissance entre 100W et 900W) soit environ 872 heures
- 12.6% du temps en à une puissance 1000W soit environ 1104 heures
- 51.3% du temps a pleine puissance (puissance entre 2000W et 2500W) soit environ 4494 heures

8.3.2.2 *Partie thermique*

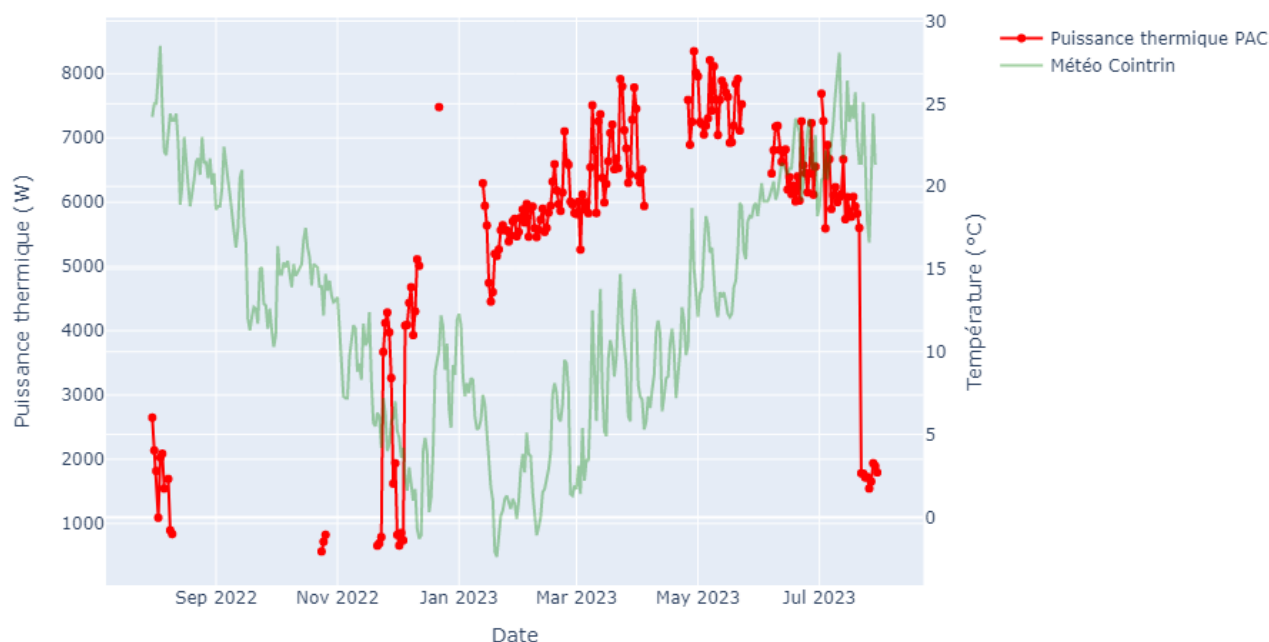
Puissance thermique journalière moyenne produite par la PAC (23/11/2021-31/07/2023)



Graphique 20 – Puissance thermique produite par la PAC depuis la mise en service du système Stirling

Ce graphique est très similaire à celui de la partie électrique de la PAC.

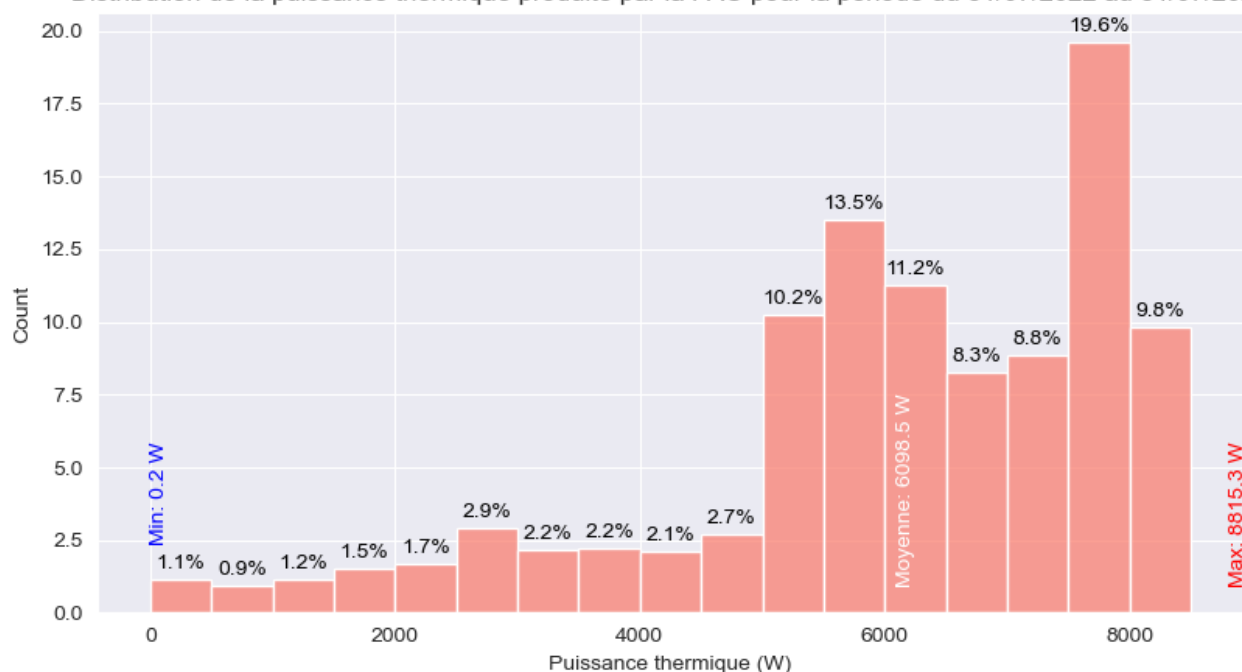
Puissance thermique journalière moyenne consommée par la PAC (31/07/2022-31/07/2023)



Graphique 21 – Puissance thermique produite par la PAC pour la période analysée

Dans le graphique ci-dessus nous observons que la puissance générée par la PAC a tendance à augmenter.

Distribution de la puissance thermique produite par la PAC pour la période du 31/07/2022 au 31/07/2023



Graphique 22 – Distribution de la puissance thermique produite par la PAC pour la période analysée

Dans le graphique ci-dessus, on observe que la puissance moyenne générée par la PAC est en moyenne de 6098.5 W.

8.3.2.3 Coefficient de performance de la pompe à chaleur

Le coefficient de performance permet d'évaluer combien de kWh thermique sont produit avec un seul kWh électrique.

$$COP_{PAC} = \frac{Q_{PAC}}{E_{PAC}} = \frac{31417.8kWh_{chaleur}}{10620.0kWh_{electricité}} = 2.96$$

Symbole	Unité	Description
COP_{PAC}	[-]	Coefficient de performance de la pompe à chaleur (PAC)
Q_{PAC}	[kWh]	Energie thermique produite totale
E_{PAC}	[kWh]	Energie électrique consommée par la PAC

Équation 4 – COP de la PAC

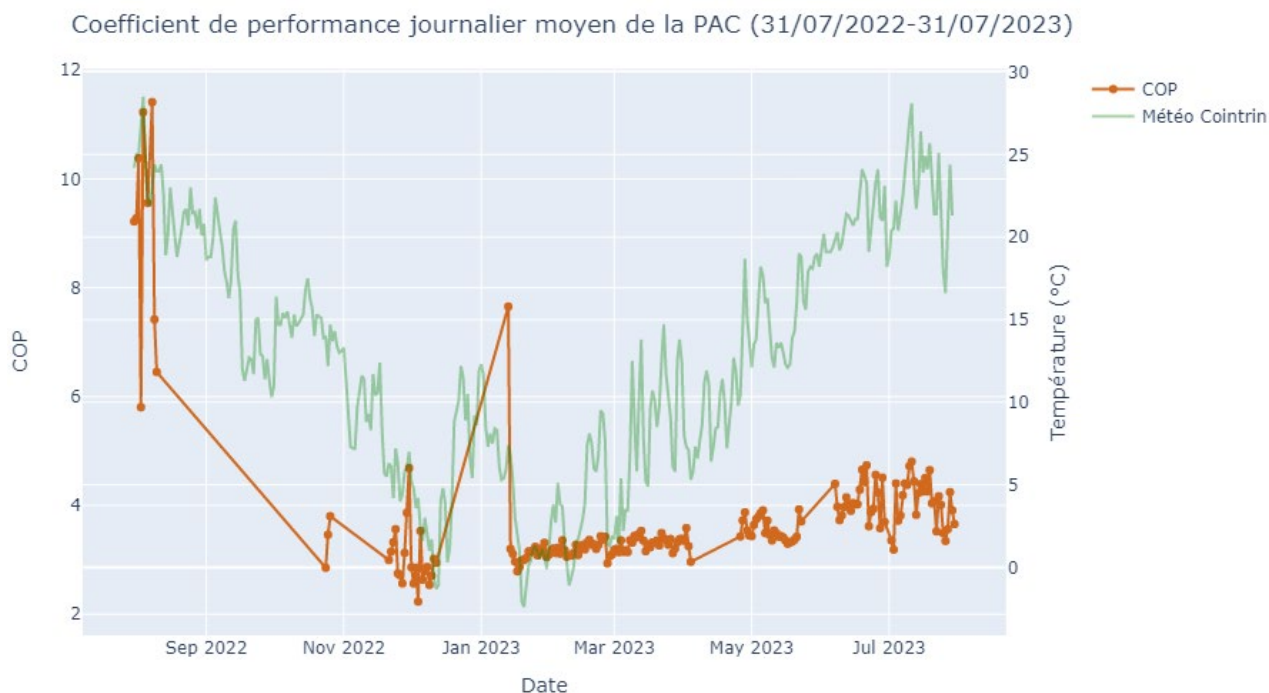
Le fabricant fournit les valeurs suivantes pour le coefficient de performance (COP) de la PAC :

- A7/W35 : COP 4.5 (« A » est la température de l'air extérieur, « W » est la température de l'eau)
- A10/W35 : COP 5.0
- A20/W35 : COP 5.9
- A7/W55 : COP 2.3
- A10/W55 : COP 2.6
- A20/W55 : COP 3.0

La température annuelle moyenne était de 12.6 °C à Genève pour la période analysée. La PAC fonctionne avec une consigne, elle doit chauffer l'eau jusqu'à atteindre 45°C, nous sommes donc entre les cas A10/W35 et A10/W55. Nous attendions des valeurs de COP de l'ordre de 4.0-4.5.

Les mesures réalisées dans des conditions réelles peuvent différer des valeurs annoncées par les fabricants, qui sont obtenues conformément aux conditions standard définies par la norme SN EN 14511 de 2022 (SN EN 14511, 2022). Ces conditions standard (température extérieure, température intérieure, débits, pressions, ...) garantissent une évaluation uniforme des performances des pompes à chaleur et facilitent la comparaison objective entre différents modèles.

Les mesures effectuées dans des conditions réelles peuvent être influencées par des paramètres tels que les variations climatiques, les caractéristiques du bâtiment, les charges thermiques, etc.



Graphique 23 – Coefficient de performance journalier moyen de la PAC pour la période analysée

Dans le graphique ci-dessus on peut observer l'évolution du COP avec la météo extérieure. La corrélation entre le COP et la température extérieure est de 0.56, nous ne pouvons pas affirmer que l'un dépende de l'autre. Il y a une légère tendance à la hausse du COP en été.

Il y a quelques données incohérentes (COP au-delà de 6), c'est probablement dû à des erreurs de mesure ponctuels, les télégrammes M-Bus peuvent prendre du temps à arriver et ils peuvent ne pas mesurer la puissance thermique et électrique exactement au même moment.

8.4 STIRLING AVEC PAC

8.4.1 Performances

8.4.1.1 Global

8.4.1.1.1 Bilan énergétique

Les résultats mesurés sur une année sont encourageants.

Bilan énergétique du 2022-07-31 au 2023-07-31

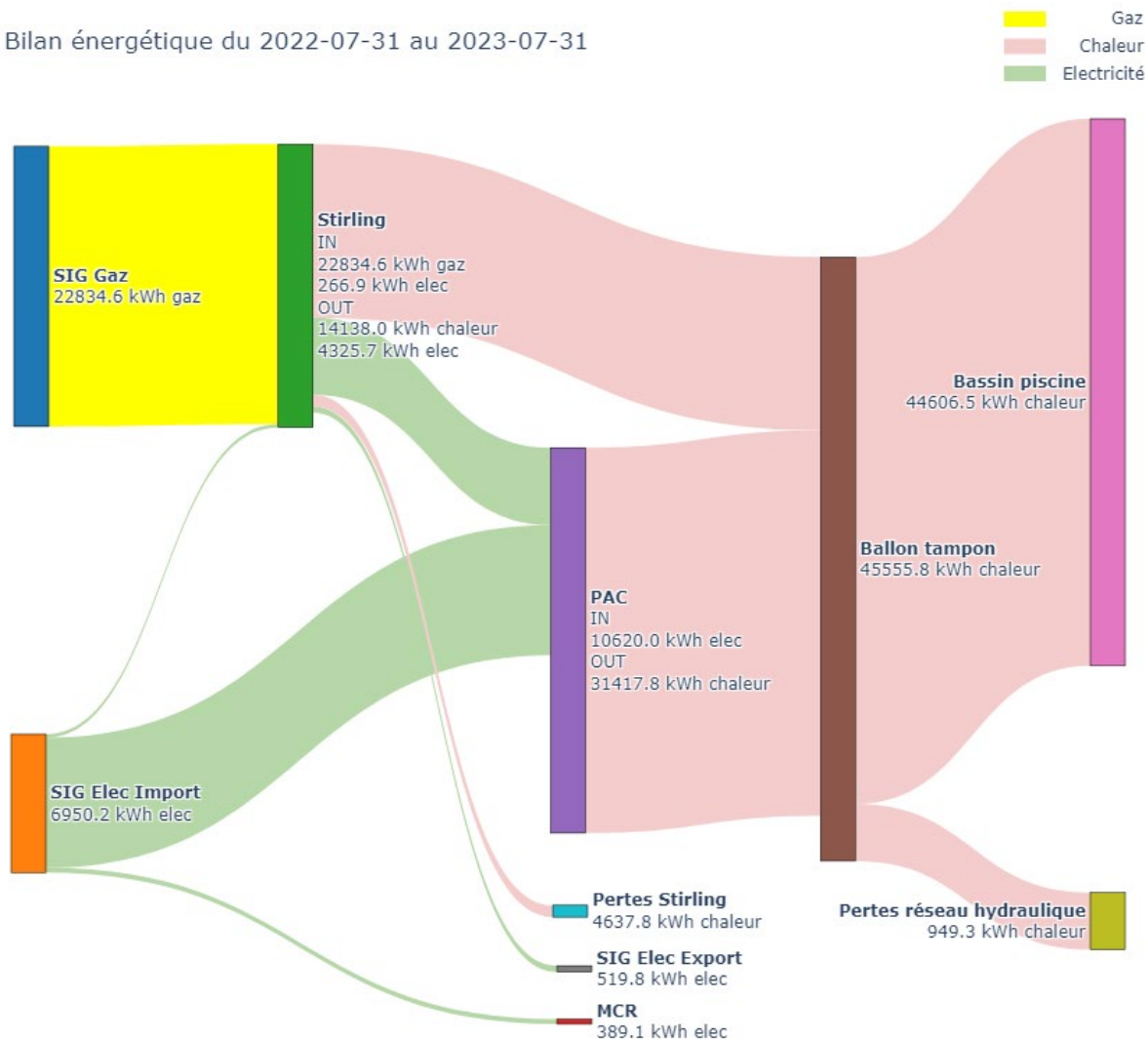


Figure 5 – Bilan énergétique global pour la période analysée

On observe ci-dessus le bilan énergétique de l'installation.

L'installation avait été dimensionnée pour que le Stirling alimente la PAC dans la plupart des cas. Nous observons que le Stirling n'a pas complètement alimenté électriquement la PAC.

La PAC a produit la plupart de l'énergie thermique de l'installation.

8.4.1.1.2 Coefficient de performance du système Stirling avec la PAC

$$COP_{PAC + Stirling} = \frac{E_{produite} + Q_{produite}}{E_{consommée} + Q_{gaz}}$$

$$= \frac{519.8kWh_{electricité} + 44606.5kWh_{chaleur}}{6950.2kWh_{electricité} + 22834.6kWh_{gaz}} = 1.52$$

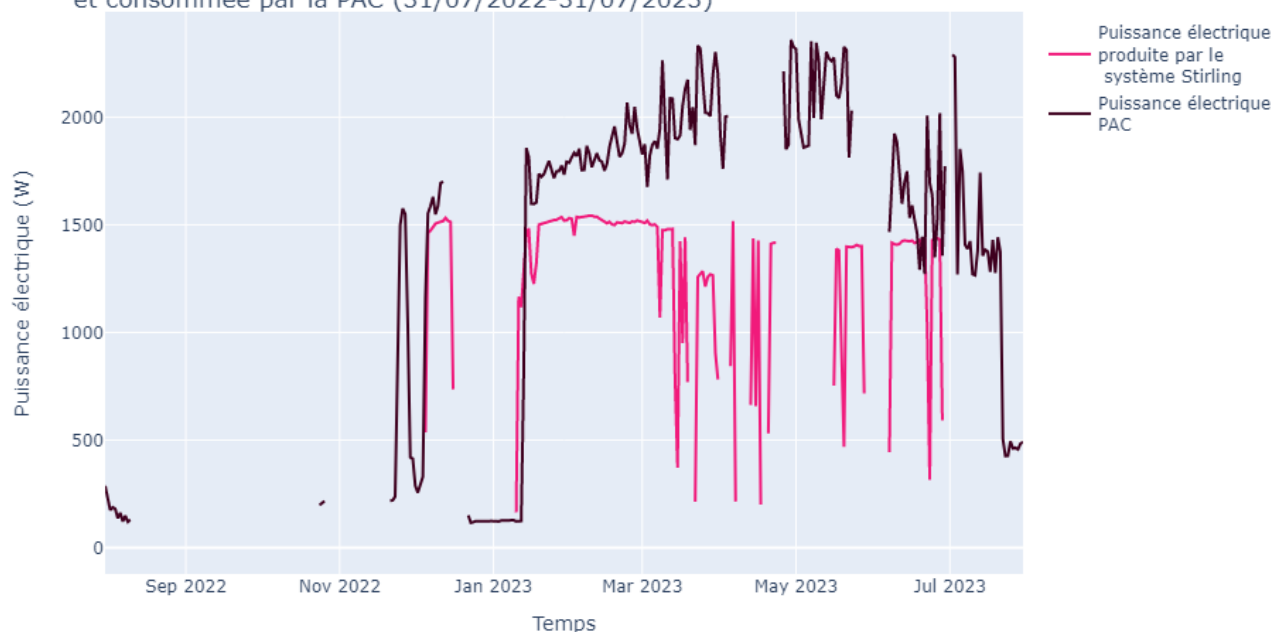
Symbole	Unité	Description
$COP_{PAC + Stirling}$	[-]	COP (Coefficient de performance) du système Stirling avec la PAC
$E_{produite}$	[kWh]	Energie électrique produite totale (export du réseau SIG)
$E_{consommée}$	[kWh]	Energie électrique consommée (import du réseau SIG)
$Q_{produite}$	[kWh]	Energie thermique produite
Q_{gaz}	[kWh]	Gaz consommé

Équation 5 – COP du système Stirling avec la PAC

Le COP du système Stirling et de la PAC est inférieur aux valeurs que nous avons ciblées (2).

8.4.1.2 Partie électrique

Puissance électrique moyenne journalière produite par le système Stirling
et consommée par la PAC (31/07/2022-31/07/2023)



Graphique 24 – Puissance électrique moyenne journalière produite par le système Stirling et consommée par la PAC pour la période analysée

Dans le graphique ci-dessus, nous avons représenté la puissance électrique consommée par la PAC par la ligne noire, et la puissance électrique produite par le système Stirling par la ligne magenta. Il est évident que la production électrique du système Stirling n'est pas suffisante pour répondre pleinement aux besoins de la PAC.

	Stirling puissance électrique (W)	PAC puissance électrique consommée (W)
count	77742	18876
moyenne	-630.8	1484.5
std	764.4	879.9
min	-1665.0	94.0
25%	-1461.0	742.0
50%	55.0	2036.0
75%	56.0	2281.0
max	1065.0	2422.0

Tableau 2 – Résumé des puissances électriques de l'installation

Dans le tableau nous avons les statistiques principales des données disponibles. En ce qui concerne le système Stirling, la puissance électrique est négative lorsqu'il produit de l'électricité ; elle sera positive lorsqu'il est en veille ou en phase de démarrage.

Sur la période analysée :

- Le système Stirling produit une puissance moyenne de 630.8 W
- La puissance moyenne consommée par la PAC est de 1484.5 W

Si l'on s'intéresse maintenant l'énergie électrique produite et consommée :

Bilan énergétique électrique du 31/07/2022 au 31/07/2023



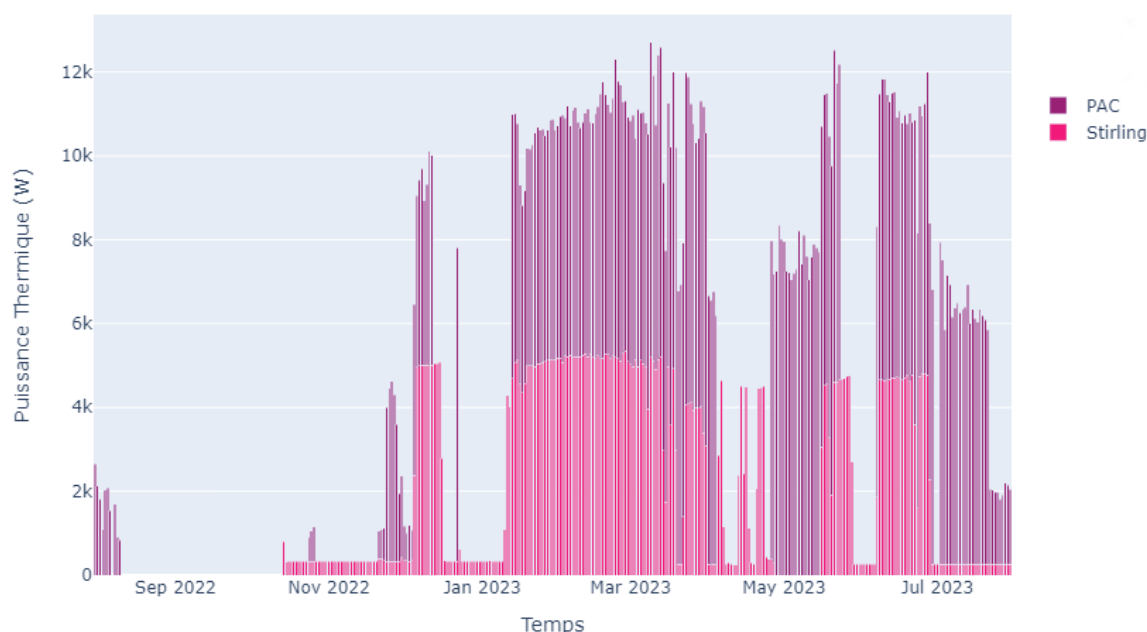
Graphique 25 – Bilan énergétique électrique de l'installation

Dans le graphique ci-dessus on observe que l'électricité apportée par le réseau (SIG) est plus importante que celle produite par le système Stirling.

Nous avons tout de même 519.8 kWh qui ont été revendus au réseau car la production d'électricité du système Stirling à ce moment était supérieure à la demande de l'installation.

8.4.1.3 *Partie thermique*

Puissance thermique moyenne journalière produite cumulée (31/07/2022-31/07/2023)



Graphique 26 – Puissance thermique moyenne journalière pour la PAC et le système Stirling pour la période analysée

Dans le graphique, on peut observer la somme des puissances thermiques moyenne journalière du système Stirling et de la PAC. La PAC produit la plupart de l'énergie thermique stockée dans le ballon tampon.

	Puissance thermique échangeurs bassin tampon (W)	Puissance thermique PAC (W)	Puissance thermique produite par le système Stirling (W)
count	16333	14893	77742
moyenne	8397.5	6098.5	2408.8
std	3232.2	1854.0	2334.8
min	0.4	0.2	0.0
25%	6818.0	5385.7	320.0
50%	8713.4	6373.1	390.0
75%	10641.8	7651.6	4810.0
max	17557.3	8815.3	8200.0

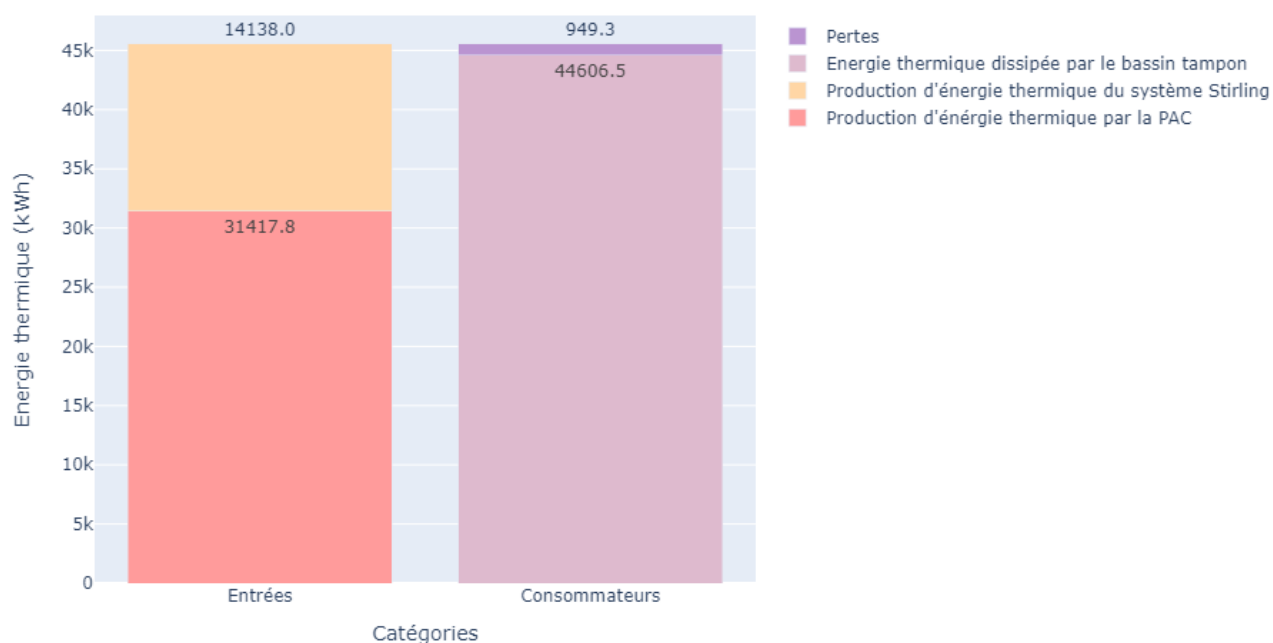
Tableau 3 – Résumé des puissances thermique de l'installation

Dans le tableau ci-dessus nous avons les statistiques principales des données disponibles, on peut voir que la PAC produit plus du double de la puissance que le Stirling en moyenne. Cela peut s'expliquer parce que le système Stirling n'a pas fonctionné à pleine charge toutes les heures prévues.

Nous observons aussi que toute la puissance produite par la PAC et le système Stirling est dissipée par les échangeurs du bassin tampon. Nous avons prévu que ces échangeurs puissent dissiper plus de 30 kW.

Si l'on s'intéresse maintenant à l'énergie thermique produite et consommée :

Bilan énergétique thermique du 31/07/2022 au 31/07/2023



Graphique 27 – Bilan énergétique thermique de l'installation

Dans le graphique ci-dessus, on peut observer que la plupart de la chaleur est produite par la PAC. Nous avons aussi quelques pertes au niveau du stockage et distribution.

8.5 RENTABILITE ECONOMIQUE

Dans ce chapitre nous allons analyser la rentabilité économique de l'installation.
Au tout début du projet nous avons estimé des économies d'environ 5000 CHF par an

Economies annuelle prévues	
Prix gaz	0.10 [CHF/kWh gaz]
Prix électricité	0.17 [CHF/kWh]
Stirling puissance électrique	2 [kW]
Stirling production thermique	5.3 [kWth]
Stirling temps de fonctionnement pleine charge	7500 [h]
Stirling production thermique	39750 [kWhth]
Stirling production électrique (export)	-15000 [kWh]
Stirling rendement combiné	0.90 [-]
Stirling consommation de gaz estimée	60833 [kWh gaz]
PAC puissance thermique	6 [kWth]
PAC COP	4 [-]
PAC puissance électrique	1.5 [kW]
PAC temps de fonctionnement	7500 [h]
PAC production thermique	45000 [kWhth]
PAC consommation électrique (import)	11250 [kWh]
Stirling + PAC production thermique totale	84750 [kWhth]
Stirling + PAC production électricité (export)	-3750 [kWh]
Stirling + PAC consommation de gaz totale	6083.33 [CHF]
Stirling + PAC production électricité (export)	-637.50 [CHF]
Coût total installation sur la période	5445.83 [CHF]
Rendement chaudière Buderus	0.80 [-]
Gaz nécessaire pour chaudière Buderus	105938 [kWh gaz]
Coût production équivalente avec Buderus	10593.75 [CHF]
Consommation de gaz évitée	45104 [kWh gaz]
Electricité revendue au réseau SIG (export)	-3750 [kWh]
Consommation de gaz évitée	4510.42 [CHF]
Electricité revendue au réseau SIG (export)	637.50 [CHF]
Estimation total économisé	5147.92 [CHF]

Tableau 4 – Estimation des économies prévues

En 2019, HEPIA avait constaté que la chaudière Buderus faisait beaucoup de cycles d'allumage et extinction au cours de la journée. Nous avons conclu que la chaudière était largement surdimensionnée par rapport aux besoins des utilisateurs. Nous avons recommandé de réduire la puissance de la chaudière, cela avait permis des économies supplémentaires de l'ordre des 4000 CHF sur la facture annuelle.

Ci-dessous le tableau récapitulatif qui estime les économies réalisées pendant la période analysée (31/07/2022-31/07/2023) :

Economies système Stirling + PAC pour la période (31/07/2022-31/07/2023)	
Prix gaz	0.10 [CHF/kWh gaz]
Prix électricité	0.17 [CHF/kWh]
Stirling + PAC consommation de gaz	22835 [kWh gaz]
Stirling + PAC consommation d'électricité (import)	6950 [kWh]
Stirling + PAC production électricité (export)	-520 [kWh]
Stirling + PAC chaleur utile totale	45556 [kWhth]
Stirling + PAC consommation de gaz totale	2283.46 [CHF]
Stirling + PAC consommation d'électricité (import)	1181.534 [CHF]
Stirling + PAC production électricité (export)	88.37 [CHF]
Coût total installation sur la période	3376.63 [CHF]
Rendement chaudière Buderus	0.80 [-]
Gaz nécessaire pour chaudière Buderus	56945 [kWh gaz]
Coût production équivalente avec Buderus	5694.48 [CHF]
Consommation de gaz évitée	34110 [kWh gaz]
Stirling + PAC consommation d'électricité (import)	6950 [kWh]
Stirling + PAC production électricité (export)	520 [kWh]
Consommation de gaz évitée	3411.02 [CHF]
Stirling + PAC consommation d'électricité (import)	-1181.53 [CHF]
Stirling + PAC production électricité (export)	88.37 [CHF]
Estimation total économisé	2317.85 [CHF]

Tableau 5 – Estimation des économies réalisées

Nous estimons que les économies réalisées pour la commune de Plan-les-Ouates sur la période d'un an sont de l'ordre de 2300 CHF.

Ces valeurs sont des estimations d'économie pour avoir les ordres de grandeur. Le but de ce rapport n'est pas de faire une analyse de rentabilité économique détaillée.

8.6 SYNTHÈSE DES RESULTATS

Le tableau ci-dessous permet de résumer les principaux éléments du projet :

Synthèse			
Prix gaz	Prix électricité	0.10 [CHF/kWh gaz]	
Prix électricité	Prix électricité	0.17 [CHF/kWh]	
	Prévu	Système Stirling + PAC pour la période (31/07/2022- 31/07/2023)	Unité
Stirling puissance électrique moyenne	2	1.5	[kWe]
Stirling production thermique moyenne	5.3	4.9	[kWth]
Stirling temps de fonctionnement pleine charge	7500	2938	[h]
Stirling production thermique	39750	14138	[kWht]
Stirling production électrique (export)	-15000	-4326	[kWe]
Stirling consommation électricité (import)	0	267	[kWe]
Stirling rendement combiné	0.90	0.80	[-]
Stirling consommation de gaz	60833	22835	[kWh gaz]
PAC puissance thermique moyenne	6	6.1	[kWth]
PAC COP	4	2.96	[-]
PAC puissance électrique moyenne	1.5	1.5	[kWe]
PAC temps de fonctionnement pleine charge	7500	4494	[h]
PAC production thermique	45000	31418	[kWht]
PAC consommation électrique (import)	11250	10620	[kWe]
Consommation électricité MCR et accessoires	0	389	[kWe]
Stirling + PAC consommation de gaz	60833	22835	[kWh gaz]
Stirling + PAC consommation d'électricité (import)	0	6950	[kWe]
Stirling + PAC production électricité (export)	-3750	-520	[kWe]
Stirling + PAC chaleur utile totale	84750	45556	[kWht]
Stirling + PAC consommation de gaz totale	6083.33	2283.46	[CHF]
Stirling + PAC consommation d'électricité (import)	0.00	1181.53	[CHF]
Stirling + PAC production électricité (export)	-637.50	-88.37	[CHF]
Coût total installation sur la période	5445.83	3376.63	[CHF]
Rendement chaudière Buderus	0.80	0.80	[-]
Gaz nécessaire pour chaudière Buderus	105938	56945	[kWh gaz]
Coût production équivalente avec Buderus	10593.75	5694.48	[CHF]
Consommation de gaz évitée	45104	34110	[kWh gaz]
Electricité importée du réseau SIG (import)	0	6950	[kWe]
Electricité revendue au réseau SIG (export)	-3750	-520	[kWe]
Consommation de gaz évitée	4510.42	3411.02	[CHF]
Electricité importée du réseau SIG (import)	0.00	1181.53	[CHF]
Electricité revendue au réseau SIG (export)	637.50	88.37	[CHF]
Estimation total économisé	5147.92	2317.85	[CHF]

Tableau 6 – Comparatif des économies estimées

En résumé :

- Système Stirling
 - Il a fonctionné moins d'heures à pleine puissance (2938 heures) que prévu (7500 heures)
 - Le rendement combiné est inférieur à ce qui était prévu, il a donc consommé plus de gaz
 - Puissance électrique moyenne en fonctionnement inférieur de 25% soit 1.5kW (mesuré) au lieu de 2kW (valeur fabricant). Ce n'est pas suffisant pour alimenter la PAC lorsqu'elle est en pleine puissance
 - Il n'a pas produit assez d'énergie électrique pour alimenter la PAC
 - Il a produit environ 38% de l'énergie électrique consommée par l'ensemble (PAC, système Stirling, MCR et accessoires)
 - Le réglage du débit et de la température d'entrée d'eau froide est délicat. Les valeurs idéales qui minimisent l'arrêt du système Stirling sont 46°C et 6 litres/minute
- PAC
 - La PAC a fourni la majorité (69%) de l'énergie thermique utile nécessaire pour chauffer le bassin tampon de la piscine
 - Elle a fonctionné 4494 heures à pleine puissance (2kW-2.5kW électrique) et 1104 heures à puissance intermédiaire (1kW électrique)
- Rentabilité économique
 - Les économies réalisées sur la période analysée s'élèvent à environ 2317.85 CHF, soit environ la moitié du montant initial prévu pour le projet, qui était de 5103.55 CHF. Le système Stirling a fonctionné pendant environ 39% des heures initialement prévues. Si le système Stirling avait fonctionné en continu pendant toutes les heures prévues, les économies réalisées auraient dépassé le montant prévu.
- Réseau SIG
 - Le réseau SIG a fourni environ 62% de l'énergie électrique consommée par l'ensemble (PAC, système Stirling, MCR et accessoires)

9 PISTES D'AMÉLIORATION ET RETOUR D'EXPÉRIENCE

9.1 SYSTEME STIRLING

Le système Stirling n'a pas fonctionné suffisamment d'heures pour atteindre l'objectif d'alimenter la PAC.

Il y a eu entre autres les difficultés suivantes :

- Débit et température d'eau de l'entrée d'eau froide
- Température de la chaufferie trop élevée
- Plusieurs maintenance du système Stirling hors site

Pour le premier problème, un limiteur de température et débit devrait être intégré sur l'entrée d'eau froide du système Stirling. Ce type de vanne de protection est très commune pour les chaudières bois pour éviter des retours trop froids. Une solution similaire mais avec un réglage plus fin devrait permettre de réaliser des cycles de fonctionnement plus longs.

La température d'entrée de l'eau froide est fixée selon le fabricant entre 30 et 45 °C, cet intervalle n'est pas suffisant pour l'application du bâtiment. Une situation courante pour une chaudière est de devoir chauffer de l'eau chaude sanitaire pour du logement. La température d'eau froide du réseau est environ de 5-10°C, celle-ci doit être chauffée jusqu'à environ 65°C. Schmid AG nous a confirmé qu'il n'est pas possible actuellement de faire un réglage plus dynamique selon les besoins. Le système Stirling aura besoin d'être en appoint d'un autre producteur de chaleur.

Une autre piste d'amélioration serait d'intégrer une petite PAC au Stirling. Actuellement, il y a sur le marché des bouilleurs ECS avec une PAC qui ne nécessitent pas de mettre un évaporateur à l'extérieur. Ce genre de PAC pourrait résoudre les difficultés avec l'entrée d'eau froide.

La chaufferie de la piscine où nous avons installé le système Stirling a une température ambiante très élevée. Dans le monde de la rénovation c'est assez courant de faire face à des situations similaires. Schmid AG a réussi à améliorer la ventilation du système Stirling pour y faire face. Il a très bien fonctionné pendant le premier trimestre 2023 lorsque la température extérieure était froide. Nous avons constaté une baisse des performances à partir d'avril 2023. Il semblerait que la température ambiante de la chaufferie a une influence sur les performances du système Stirling.

Lors de l'installation nous avons fait appel à l'entreprise « Friderici transports spéciaux » pour qu'ils réalisent la mise en place du système Stirling sur son socle. La manutention a fait appel à 4 personnes qui ont descendu par les escaliers le système Stirling de plus de 300 kg. Depuis, l'entreprise Schmid AG a amélioré le processus et il est maintenant possible de démonter en plusieurs parties le système Stirling et de le remonter sur place. Il n'est plus nécessaire de faire appel à une entreprise spécialisée.

Le système Stirling fonctionne actuellement sur une unique vitesse. Dès sa mise en service, Schmid AG nous a promis qu'une vitesse intermédiaire était en développement. Lors de la rédaction de ce rapport, nous n'avons toujours pas eu de nouvelles concernant cette deuxième vitesse.

C'est important de rappeler que nous avons testé un prototype, il faut s'attendre à une certaine maintenance et de découvrir des problèmes. Cette phase de test est une étape très importante pour détecter et résoudre les problèmes avant une possible commercialisation.

9.2 RESEAU HYDRAULIQUE

Nous avons installé un accumulateur pour stocker l'énergie. Ce dernier fonctionne comme un pot de mélange. Les sondes de température du pot de mélange nous ont permis d'observer une forte variation de température. Une possible amélioration est d'utiliser un échangeur par producteur de chaleur pour avoir une bonne stratification.

9.3 MESURE, COMMANDE ET REGULATION

Les Raspberry se sont avérés peu fiables avec les hautes températures de la chaufferie. Nous avons dû ajouter des ventilateurs supplémentaires dans l'armoire. Finalement nous avons opté pour remplacer certains Raspberry par un PC. Un automate spécialisé aurait été une meilleure solution.

Au début du projet nous avons acheté plusieurs petites centrales M-Bus qui pouvaient s'intégrer à un Raspberry. Ces cartes intégrées ont complexifié le tableau MCR, car elles ne lisent que quelques compteurs par carte. Finalement elles sont tombées en panne et nous les avons remplacées par une centrale M-Bus vendue par un spécialiste du domaine.

Le compteur EMU d'électricité est un modèle relativement complet et onéreux, mais il ne compte pas l'énergie par phase. Il aurait été préférable pour nous de mettre 1 compteur d'électricité M-Bus par phase (Stirling/PAC/Accessoires).

Nous avons intégré un module M-Bus sur un compteur Neovac existant. Ce dernier compte l'énergie envoyée par la chaudière Buderus vers la piscine (échangeur de 230 kW). Ce module M-Bus transmet les données que pendant quelques semaines, ensuite il se bloque et envoie toujours les mêmes données.

Les compteurs de chaleur Calec qui comptaient la chaleur produite par le Stirling ont dû être remplacés car nous n'arrivions pas à les lire sur la centrale M-Bus.

9.4 OBJECTIFS

Le premier objectif du projet était de mettre en place l'installation. Cet objectif a été atteint.

Le deuxième objectif était de valider que nous arrivons à produire 2 kWh à partir d'un kWh de gaz. Nous n'avons pas pu obtenir ces performances, comme indiqué dans le chapitre « 8 Résultats ». Sur la période analysée il est nécessaire de réaliser un apport d'énergie électrique en plus du gaz.

Le troisième objectif était de proposer et présenter un concept d'intégration avec ses variantes établies sur la base des tests effectués et des modes de fonctionnement les plus favorables. Nous n'avons pas pu réaliser tous les tests nécessaires pour les raisons énumérées au chapitre « 9.1 Système Stirling ».

10 CONCLUSIONS

Situation avant l'installation :

- La chaufferie de la piscine de la commune de Plan-les-Ouates constitue un excellent site pour tester le couplage du système Stirling avec une pompe à chaleur.
- La chaufferie dispose d'une ancienne chaudière vétuste qui n'est plus utilisée

Installation :

- D'un système Stirling à la place de l'ancienne chaudière
- L'installation a requis de l'intervention de multiples entreprises spécialisées et a été un challenge du point de vue logistique

Principe de fonctionnement testé :

- Test d'une chaudière qui produit de la chaleur et de l'électricité basé sur le principe du moteur Stirling
- Le système Stirling alimente électriquement une pompe à chaleur pour optimiser la production d'énergie thermique de l'ensemble
- Le reste de l'électricité produite est rejeté dans le réseau SIG

Mise en service :

- L'installation a été mise en service en date du 22 novembre 2021

Exploitation

- Système Stirling
 - o Le processus d'homologation du système Stirling avec la SSIGE a été assez chronophage
 - o L'entreprise Schmid est intervenue 2 fois pour ramener le moteur du système Stirling dans leur atelier à Berne et faire les mises à jour selon leur retour d'expérience sur les 7 systèmes Stirling actuellement en service
 - o Le système Stirling est très sensible à la température et au débit de l'entrée d'eau. Une légère variation de température ou du débit peut arrêter son fonctionnement
 - o Les températures de fonctionnement du système Stirling ont été fixées lors de la mise en service. L'intervention de l'entreprise Schmid a été nécessaire pour modifier les réglages.
 - o L'accès à distance a permis d'avoir accès aux principales fonctions de la machine et aux diverses données.
- Plusieurs interventions sur site ont été nécessaires pour remplacer des appareils de mesure défectueux
- Nous avons constaté que la température extérieure avait une grande influence sur la température de l'eau de la piscine, nous avons dû arrêter l'installation lors de la canicule de l'été 2022

Performances mesurées (31/07/22-31/07/23) :

- Le COP de l'ensemble (Stirling avec PAC) est de 1.52. Avec 100 kWh de gaz et 30kWh d'électricité nous arrivons à produire 152 kWh de chaleur
- Le système Stirling a fonctionné pendant 2938 heures à pleine puissance, ce qui s'avère insuffisant pour alimenter la PAC. En conséquence, la PAC a principalement été alimentée par le réseau électrique (SIG).
- Lorsque le système Stirling fonctionne à pleine puissance, il produit suffisamment d'électricité pour alimenter la PAC.
- La pompe à chaleur à un COP annuel de 2.96, valeur inférieure à ce que nous espérions (4.0-4.5)
- Les performances du Stirling sont inférieures à celles annoncées par le fabricant
 - o Rendement combiné de 0.80 au lieu de 0.90
 - o Rendement électrique de 0.18 au lieu de 0.25
 - o Rendement thermique de 0.62 au lieu de 0.65

L'installation montre des résultats intéressants uniquement en combinant le système Stirling avec une pompe à chaleur.

11 BIBLIOGRAPHIE

- OFEN. (2021). *Statistique suisse de l'électricité 2021*. Récupéré sur Statistique de l'électricité: <https://pubdb.bfe.admin.ch/fr/publication/download/10942>
- SIA 380/1. (2016). *L'énergie thermique dans le bâtiment*.
- SIA 384.344. (2018). *Performance énergétique des bâtiments - Méthode de calcul des besoins énergétiques et des rendements des systèmes - Partie 4-4: Systèmes de génération de chaleur, systèmes de cogénération intégrés au bâtiment, Module M8-3-4, M8-8-4, M8-11-4*.
- SN EN 14511. (2022). *Climatiseurs, groupes refroidisseurs de liquide et pompes à chaleur pour le chauffage et le refroidissement des locaux et refroidisseurs industriels avec compresseur entraîné par moteur électrique*.

12 GRAPHIQUES, FIGURES, ÉQUATIONS ET TABLEAUX

Graphique 1 – Production et consommation d'électricité en Suisse pour l'année 2021 (OFEN, 2021)	7
Graphique 2 – Structure de production de divers pays pour 2020 (OFEN, 2021)	7
Graphique 3 – Statuts du système Stirling depuis sa mise en service	14
Graphique 4 – Distribution des statuts pour la période analysée	15
Graphique 5 – Diagramme de dispersion pour la température d'entrée d'eau froide, le débit et le statut	17
Graphique 6 – Clustering pour la température d'entrée d'eau froide, le débit et le statut	17
Graphique 7 – Caractéristiques des clusters	18
Graphique 8 – Température ambiante moyenne journalière de la chaufferie	19
Graphique 9 – Puissance moyenne journalière produite par le système Stirling depuis la mise en service	20
Graphique 10 – Puissance moyenne journalière produite par le système Stirling sur la période analysée	21
Graphique 11 – Bilan énergétique pour le système Stirling sur la période analysée	21
Graphique 12 – Puissance électrique produite par le système Stirling	22
Graphique 13 – Puissance électrique produite par le système Stirling par statut pour la période analysée	23
Graphique 14 – Puissance thermique produite par le système Stirling pour la période analysée	24
Graphique 15 – Puissance thermique produite par le système Stirling par statut pour la période analysée	25
Graphique 16 – Distribution de la puissance produite par le système Stirling pour la période analysée	26
Graphique 17 – Puissance électrique consommée par la PAC depuis la mise en service du système Stirling	27
Graphique 18 – Puissance électrique consommée par la PAC pour la période analysée	28
Graphique 19 – Distribution de la puissance électrique consommée par la PAC pour la période analysée	28
Graphique 20 – Puissance thermique produite par la PAC depuis la mise en service du système Stirling	29
Graphique 21 – Puissance thermique produite par la PAC pour la période analysée	30
Graphique 22 – Distribution de la puissance thermique produite par la PAC pour la période analysée	30
Graphique 23 – Coefficient de performance journalier moyen de la PAC pour la période analysée	32
Graphique 24 – Puissance électrique moyenne journalière produite par le système Stirling et consommée par la PAC pour la période analysée	34
Graphique 25 – Bilan énergétique électrique de l'installation	36
Graphique 26 – Puissance thermique moyenne journalière pour la PAC et le système Stirling pour la période analysée	37
Graphique 27 – Bilan énergétique thermique de l'installation	38
Figure 1 – Flux des énergies estimé en début de projet	8

Figure 2 – Principe de fonctionnement du système Stirling	9
Figure 3 – Schéma de principe de l'installation à Plan-les-Ouates	10
Figure 4 – Matrice de transition pour la période analysée.....	16
Figure 5 – Bilan énergétique global pour la période analysée	33
Équation 1 – Rendement combiné du système Stirling	22
Équation 2 – Rendement électrique du système Stirling	24
Équation 3 – Rendement thermique du système Stirling.....	26
Équation 4 – COP de la PAC	31
Équation 5 – COP du système Stirling avec la PAC	34
Tableau 1 – Débit et température moyens par cluster	18
Tableau 2 – Résumé des puissances électriques de l'installation	35
Tableau 3 – Résumé des puissances thermique de l'installation	37
Tableau 4 – Estimation des économies prévues.....	39
Tableau 5 – Estimation des économies réalisées	40
Tableau 6 – Comparatif des économies estimées	41

13 ANNEXES**13.1 SYSTEME STIRLING****13.1.1 Fiche technique du système Stirling****13.1.2 Rapport de l'entreprise Schmid juin 2022****13.2 PAC****13.2.1 Fiche technique****13.3 PLANS****13.3.1 Schéma de principe hydraulique****13.3.2 Plans****13.3.3 Schéma de principe électrique**

Fiche technique stirlingstar 2.0

provisoire

Le **stirlingstar 2.0** est une unité de couplage chaleur-force (CCF) d'une puissance électrique de 2 kW, fonctionnant selon un nouveau concept d'un Stirling à pistons libres, breveté internationalement. Ce système de micro-génération se distingue par son rendement électrique supérieur à 25%.

Modes d'application

Système de chauffage monovalent pour maisons individuelles ou jumelées, couvrant des besoins de chauffage réduits. L'eau chaude sanitaire est également préparée par le **stirlingstar 2.0**, ce qui augmente ses heures de service. La chaleur dégagée est stockée dans un bouilleur d'environ 500 litres. Une tige de chauffage peut être installée dans ce réservoir, servant à couvrir les charges de pointe.

Système de chauffage bivalent pour immeubles d'habitation et petites entreprises. Le **stirlingstar 2.0** couvre la charge continue durant de nombreuses heures de fonctionnement. Une chaudière d'appoint fournit le complément de chaleur variable et sert comme unité redondante. L'installation d'un bouilleur suffisamment volumineux est recommandée.

Le **stirlingstar 2.0** est utilisé de préférence durant les heures où l'opérateur a besoin d'énergie électrique ; tout surplus de chaleur produite est stocké temporairement dans le bouilleur.

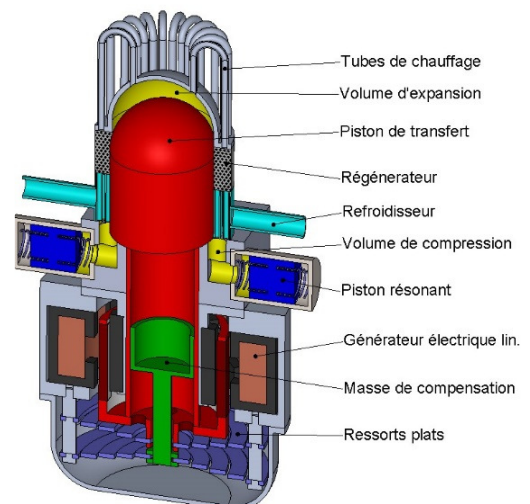


Structure et fonction

Les systèmes Stirling à pistons libres conviennent particulièrement bien pour de petites unités de cogénération, permettant d'utiliser l'énergie primaire efficacement:

- La chaleur dégagée dans un brûleur par une combustion continue est transmise au gaz de travail du Stirling depuis l'extérieur. La combustion est complète et se distingue par des effluents propres. Grâce à son fonctionnement silencieux, l'appareil convient bien pour son utilisation dans les quartiers résidentiels.
- Les appareils fonctionnent avec un bon rendement sous conditions nominales ainsi que dans une vaste plage de charges partielles. Ils démarrent en quelques minutes après un préchauffage initial.

L'ensemble de l'appareil est placé dans une enceinte hermétique. Les pistons libres oscillent linéairement, suspendus latéralement par des paliers à gaz, évitant tout frottement et réduisant les pertes mécaniques au minimum. Grâce à l'absence d'embellages, aucune lubrification n'est nécessaire, ce qui réduit tout entretien de l'appareil au minimum.



Ce nouveau système de Stirling à résonance fait l'objet d'un **brevet déposé internationalement** :

Le **piston principal** englobe le déplaceur et le piston de travail qui sont solidement reliés ensemble. L'amplitude et la phase de son mouvement périodique sont contrôlés précisément par le générateur électrique linéaire associé. Le volume de travail comprend en outre des **pistons de résonance**, qui par leur libre oscillation font varier périodiquement la pression du gaz de travail. Ces pistons de résonance représentent une impédance du circuit de gaz qui amplifient les variations de pression périodiques; leur angle de phase est déplacé de manière appropriée par rapport au mouvement du piston principal, de sorte à générer un travail optimal, agissant sur les pistons de cet ensemble.

Les unités Stirling disponibles sont conçues pour une opération à une fréquence de 50 Hz ; le courant ainsi généré peut directement être injecté dans le réseau électrique, sans recourir à un convertisseur.

Le brûleur fonctionne selon le **procédé FLOX**, dans lequel les effluents sont recyclés dans la chambre de combustion. Toute l'enceinte de ce brûleur ainsi que les tubes de chauffage du Stirling sont chauffés de manière homogène à une température élevée, comprise dans une plage restreinte, de sorte que peu de polluants sont formés (CO ou NO_x).

L'unité CCF se distingue par un bilan énergétique favorable, avec un apport d'énergie primaire est environ 50% plus faible que lors d'une production séparée de la chaleur et de l'électricité avec le même comburant. Le débit d'effluents et de gaz de serre dégagés par ces unités sont réduits dans la même proportion. Le système Stirling à résonance fonctionne avec un système de commande simple, à pleine charge comme dans une vaste plage de charges partielles. La puissance peut donc précisément être ajustée à la demande en chaleur ou en énergie électrique.

Caractéristiques techniques

Valeurs électriques

Puissance électrique:	2kW
Rendement électrique:	> 25%
Raccordement électrique:	1 x 230V, 16A

Valeurs thermiques

Puissance thermique:	5.3kW
Température de chauffage:	45 – 65°Cpréréglé
Température du retour:	30 – 50°Cpréréglé
Raccordement:	¾ "

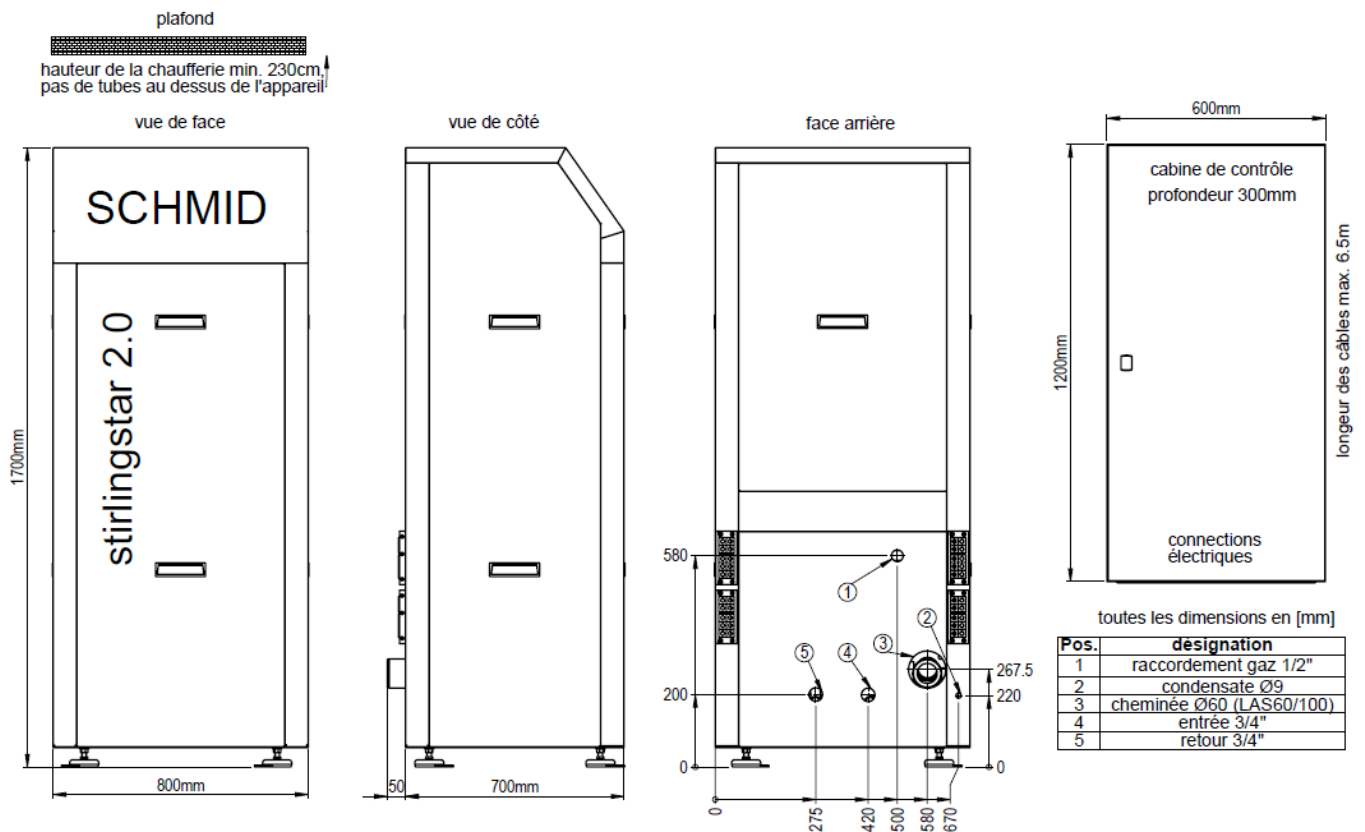
Charge des effluents

Cheminée:	ø60mm (LAS 60/100 préparé)
Température d'évacuation:	env. 50°C
Charge des effluents:	CO < 40mg/m ³ NO _x < 70mg/m ³
Pression des gaz d'échappement	neutre, pression atmosphérique
Raccord condensats:	ø9mm

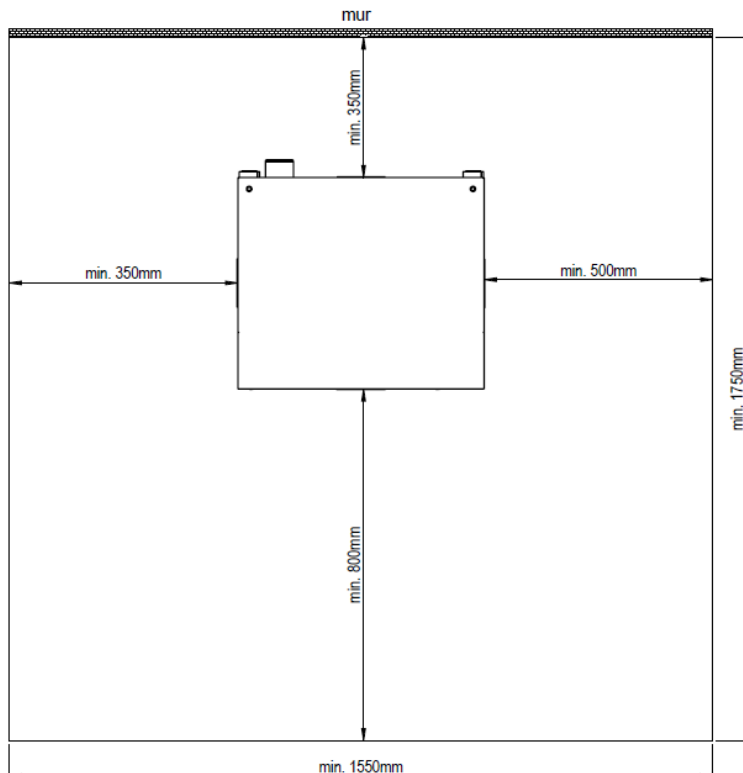
Données générales

Rendement global:	> 90%
Dimensions L/P/H:	70/60/170cm
Place disponible L/P:	155/175cm (hauteur de la chaufferie min. 2.3m)
Masse totale:	328kg
Niveau de bruit:	< 52dB A
Combustible:	gaz naturel/gaz liquide
Consommation:	env. 8kWh/h

Dimensions de l'unité



Disposition de l'installation (recommandée)



Standorte der Feldtest-Einheiten SFM3

	Ort	Gebäudeart	Unterstützende Heizung	Speicher Inhalt in l	Anwendungs fall	Laufstunden 21/22 bis Juni in h
SFM3-1	Grenchen	Einfamilienhaus	Gasheizung, Solarthermie	1200	Optimieren der Anwendung	2281
SFM3-2	Yverdon-les Bains	Einfamilienhaus	Solarthermie	1600	Optimieren der Anwendung	3165
SFM3-3	Nidau	Zweifamilienhaus	Gasheizung PV-Anlage	950	Optimieren der Anwendung	2389
SFM3-4	Plan-les-Ouates	Gemeindelokale + Hallenbad	Gasheizung, Wärmepumpe	600	Optimieren der Anwendung mit Wärme pumpe	1467
SFM3-5	Thörishaus	Werkstätte	Pelletheizung	1800	Dauerlauf	526
SFM3-6	Thörishaus	Werkstätte	Pelletheizung	1800	Dauerlauf	2254
SFM3-7	St. Gallen	4-Familienhaus	Gasheizung	600	Optimieren der Anwendung, abstimmen auf den Verbrauch	246
Total						12328

Feldtestversuch mit dem Freikolben-Resonanzstirling SFM3

Kurzbericht Juli 2022

Beschreibung des Konzeptes

Der Freikolben-Resonanzstirling bildet das Herzstück von fortschrittlichen „**Stromerzeugenden Heizungen**“. Sein hoher elektrischer Wirkungsgrad und seine kompakte, dauerhafte Mechanik werden im Heizungsmarkt neue Massstäbe setzen. Langzeitig erprobte Einheiten werden in Kürze als serienweise hergestelltes Produkt erhältlich sein.

Als Hauptmerkmal dieses Freikolbensystems ist der **Arbeitskolben starr mit dem Verdrängerkolben verbunden**. Zusätzliche, einfache Resonanzkolben schwingen als Impedanz frei mit, so dass sich im gesamten Arbeitsvolumen eine periodische Druckänderung einstellt und einen effizienten Arbeitsumsatz ermöglicht.

Stabiler Betrieb, Nutzung hoher Betriebstemperaturen

Dem Motor wird von aussen Wärme mit einem flammenlosen (FLOX-)Brenner zugeführt: Abgase werden in der Brennkammer rezirkuliert, um den Sauerstoff-Teildruck in der Reaktionszone zu mindern und die Flammentemperaturen zu begrenzen. Die heissen Abgase dieser Brenner werden genutzt um die benötigte Frischluft auf hohe Temperaturen vorzuheizen.

Beim FLOX-Verfahren dient die vorgeheizte Brennerluft als Antrieb zur Rezirkulation eines Teiles der Abgase durch ein Venturirohr. Die Verbrennung findet damit in einer verdünnten Sauerstoff-Atmosphäre statt, so dass eine akzeptable Temperaturgrenze nicht überschritten wird.

Start der Anlagen, Aufheizung mit üblicher Verbrennung, Druckaufbau des Arbeitsgases

Zum Start der Anlage muss der Motor zuerst durch üblichen Verbrennungsprozess vorgeheizt werden. Durch Erhöhung der Temperaturen steigt auch der Mitteldruck des Arbeitsgases, was auch die Eigenfrequenz der Resonanzkolben beeinflusst.

Mit dem **Steuer- und Regelsystem** müssen die Kolbenhübe genau eingestellt werden, was eine Kontrolle des Brenners und Temperaturen am Erhitzerkopf erfordert. Die Betriebsüberwachung erfordert zahlreiche Messinstrumente, wobei die gemessenen Daten kontinuierlich aufgezeichnet und kontrolliert werden können. Der sichere Betrieb erfordert die Überwachung vieler Grenzwerte, mit automatischer Abschaltung der Anlage.

Zusammenfassung der wichtigsten Betriebsdaten

Versuchsergebnisse		Bei Volllast	Bei Teillast
Zugeführte thermische Leistung	W_{TH}	8'000	5'000
Elektrische Abgabeleistung	W_{EL}	2'000	1'200
Max. verfügbare Heizleistung	W_{TH}	5'300	3'300
Elektrischer Wirkungsgrad	%	> 25	> 23
Gesamtwirkungsgrad	%	> 90	> 90
Modulationsbereich der Leistung	60 – 100%	100%	60%
Druckverhältnis Arbeitsgas	p_{MAX}/p_{MIN}	1.35 – 1.40	1.30 – 1.35
Arbeitsfrequenz	Hz	50	
Abmessungen B / T / H	cm	60 / 70 / 140	
Gewicht	kg	ca. 180	
Energiequelle		Biogas / Erdgas / LPG	

Feldtestanlagen

Sieben Feldtestanlagen vom Typ SFM3 wurden nach dem gleichen Konzept hergestellt, erprobt und die Betriebsdaten ausgemessen.

HEIG-VD übernahm eine Einheit, installierte sie auf ihrer Betriebsanlage, um die Eigenschaften unter verschiedenen Betriebsbedingungen ausmessen zu können. Die Qualität der Abgase wurde laufend kontrolliert. Diese Tests dauerten bis Ende Oktober 2022 an. Die Ergebnisse sind im 4. Zwischenbericht vom 11.11.2021 festgehalten. Danach wurde diese Einheit in einem Einfamilienhaus in Yverdon installiert.

Fünf Einheiten wurden in Gebäuden installiert, um Informationen über ihren Betrieb unter verschiedenen Einsatzbedingungen ermitteln zu können. Die beigefügte Tabelle fasst die wichtigsten Charakteristiken und Anwendungsbedingungen zusammen.

Zwei Einheiten stehen in der Werkstätte der Rudolf Schmid AG im Einsatz, um bei langfristigem Betrieb Erfahrung über die Dauerfestigkeit sammeln zu können. Diese Einheiten können auch als Ersatz beim Ausfall einer der Kundenmaschinen dienen.

Die zeitliche Nutzung der Anlagen hängt einerseits vom Datum der Bereitstellung der Anlagen zusammen, andererseits von den benötigten Heizleistungen der Betreiber, den herrschenden Vor- und Rücklauftemperaturen. Die sieben Feldtestanlagen sollen mindestens bis Juni 2023 weiter betrieben werden, um die vorgesehene Nutzung während insgesamt 30'000 Betriebsstunden erreichen zu können.

Wie bei Feldtests zu erwarten, traten eine Reihe von Problemen auf, die meist in lokalem Einsatz behoben werden konnten. Hauptproblem betraf den FLOX-Brenner der Einheiten. Diese Brenner wurden von einem auswärtigen Hersteller bezogen, welcher dieses Brennerkonzept entwickelte und mit höheren Leistungen industriell vertreibt. Die Stirlingbrenner sind den grösseren Modulen nachgebildet, weisen jedoch noch nicht die Qualität eines industriellen Produktes auf.

Aufgetretene Probleme und vorgesehene Verbesserungen

Brenner: Der FLOX-Brenner funktioniert bei Temperaturen von mehr als 800°C. Die Abgase werden rezirkuliert, um die O₂-Konzentration zu senken und die höchste, in der Reaktionszone auftretende Temperatur einzugrenzen. Die erzeugte Wärme wird an die Erhitzerrohre des Stirlings übertragen. Diese sind stark beansprucht und beeinflussen auch den Betrieb des Brenners. In einem separaten Innosuisse-Projekt wurde die Verbrennung simuliert und nach Optimierungen in der Brennkammer gesucht. Einige Verbesserungsvorschläge werden jetzt umgesetzt.

Der **Erhitzerkopf** wird mit Röhrchen mit stärkerer Wandung bestückt. Nach Möglichkeit werden die Erhitzerrohre so gestaltet, dass der Druckabfall der zirkulierenden Abgase vermindert wird.

Der **Dom des Stirlings** (aus diesem traten Verunreinigungen aus) wird ausgewechselt und das gesamte Arbeitsvolumen wird gereinigt.

Das **Steuer- und Regelsystem** des Stirlings wird besser abgeschirmt und gegen äussere, störende Einflüsse geschützt.

Zudem werden die **Temperatursensoren** im Brennraum durch ein besseres Fabrikat ersetzt.

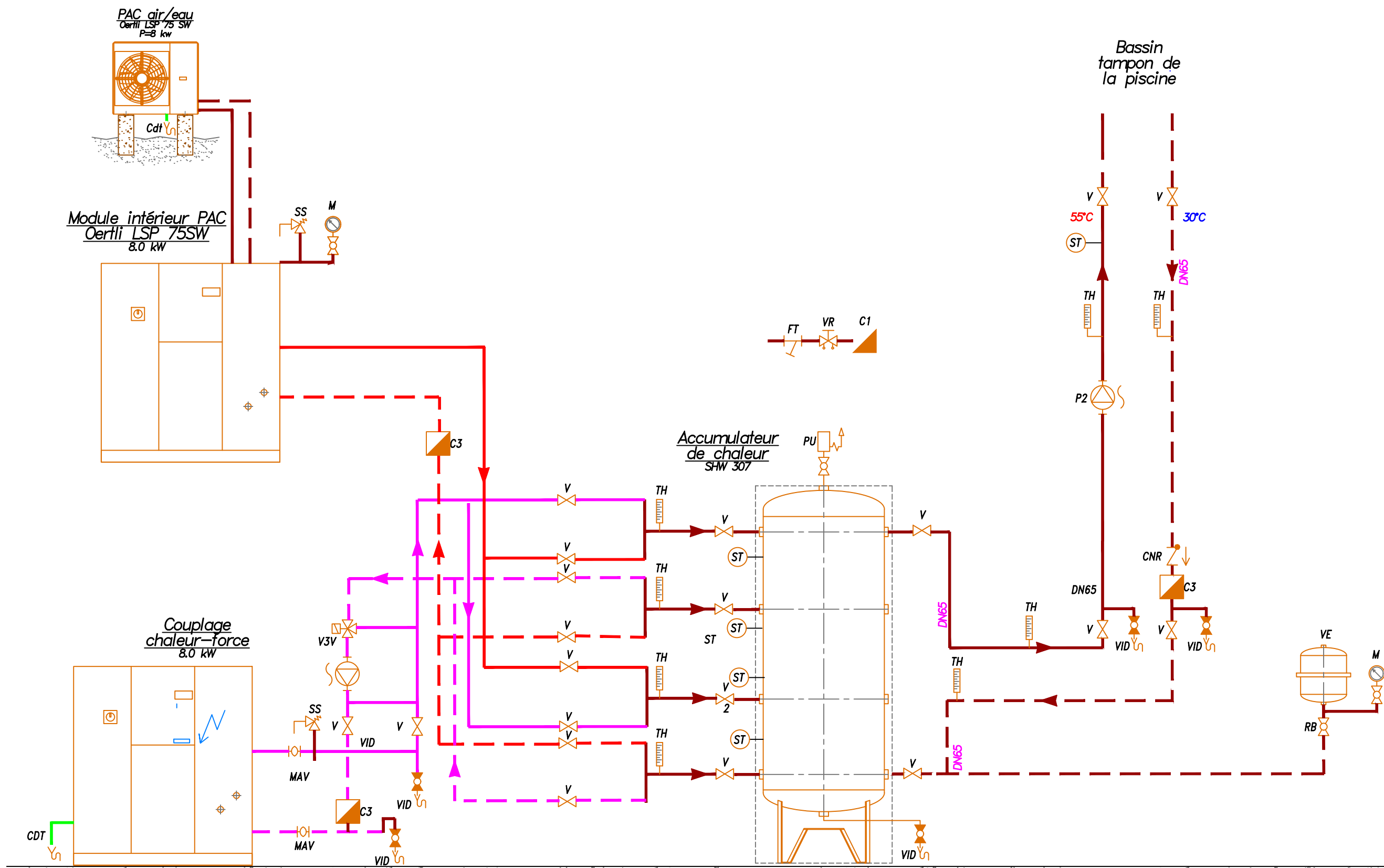
Mit der Freikolbenmechanik breiten sich **Druckwellen im Arbeitsvolumen** aus, welche Störungen oder Instabilitäten erzeugen können. Diese Wellen werden nach Möglichkeit gedämpft, um die Mittelposition der Resonanzkolben besser zu stabilisieren und keine Fehlfunktion ausgelöst wird.

Pompes à chaleur air-eau (split) Oertli

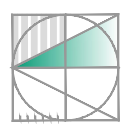
Pompes à chaleur air-eau avec la technologie inverter

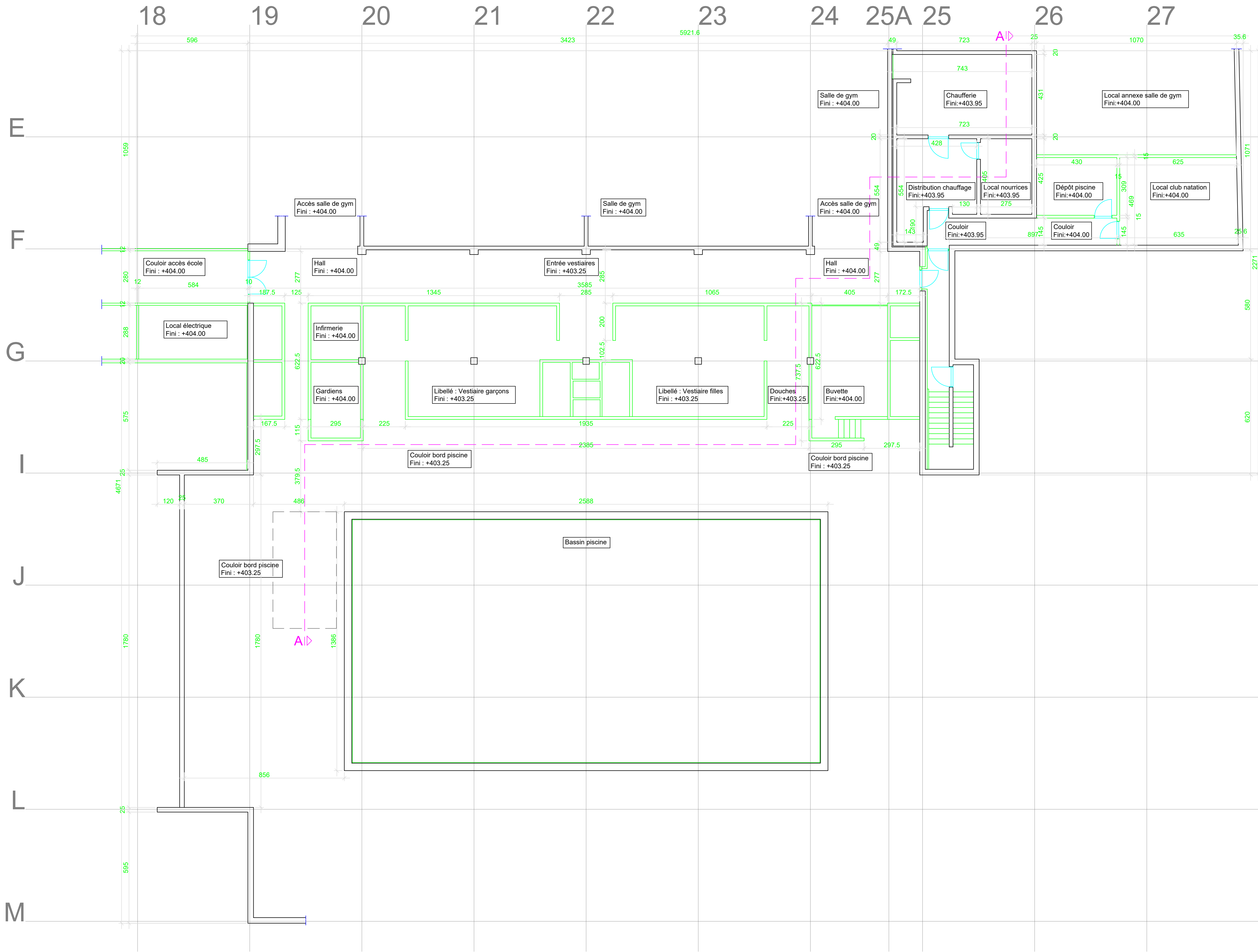
Caractéristiques techniques selon EN 14511

		LSP 50 SW	LSP 75 SW
Module extérieur			
Source de chaleur / conception		Air / Split	Air / Split
Régulation		SE 6024WPC	SE 6024WPC
Emplacement		Extérieur	Extérieur
Nombre de compresseur		1	1
Seuils d'utilisation			
Air	°C	-20 à +35	-20 à +35
Nombre de ventilateurs		1	1
Niveau de puissance acoustique		60	60
Débit d'air évaporateur		2'100	3'300
Dimensions / poids			
Dimensions de l'appareil		HxIxP mm	600x800x330
Poids		kg	42
Raccord gaz			
Gaz chauds		1/2" (12.7mm)	5/8" (15.88mm)
Gaz liquide		1/4" (6.35mm)	3/8" (9.52mm)
Fluide frigorigène, quantité		Type / kg	R410A / 2,1
Pression de service max.		bar	45
Données électriques			
Tension de raccordement / fusibles		1x230V/50Hz / C16A	1x230V/50Hz / C20A
Compresseur		Inverter	Inverter
Courant de démarrage		A	3
Courant max.		A	13
Puissance absorbée A7/W35		kW	1,33
Puissance absorbée max.		kW	2,93
Module intérieur			
Seuils d'utilisation			
Départ et retour eau de chauffage		°C	jusqu'à 60 / dès 20
Départ et retour eau de refroid.		°C	dès 12 / à 18
Débit			
Débit de l'eau de chauffage / différence de pression interne			
maximum		m³/h / Pa	1,4 / 14900
nominal		m³/h / Pa	1,1 / 8400
minimum		m³/h / Pa	0,5 / 1500
Circulateur WILO Stratos-PARA			20/1-11.5
Volume min. accumulateur tampon		Litres	40
Pression de service max.		bar	3
Dimensions / poids			
Dimensions de l'appareil		HxIxP mm	1000x550x370
Poids		kg	58
Données électriques			
Tension de commande / fusibles		1x230V/50Hz / C13A	1x230V/50Hz / C13A
Puissances de chauffage / coefficient de performance (COP)			
A-15 / W35	kW / --	3,5 / 2,0	7,0 / 2,0
A-7 / W35	kW / --	4,4 / 2,8	7,0 / 2,9
A2 / W35	kW / --	5,0 / 3,2	7,5 / 3,4
A7 / W35	kW / --	6,0 / 4,5	8,0 / 4,4
A10 / W35	kW / --	6,9 / 5,0	9,0 / 5,1
A20 / W35	kW / --	8,0 / 5,9	10,2 / 6,0
A-7 / W55	kW / --	4,4 / 1,5	7,0 / 1,7
A2 / W55	kW / --	5,0 / 1,9	7,1 / 1,9
A7 / W55	kW / --	6,0 / 2,3	8,0 / 2,7
A10 / W55	kW / --	6,8 / 2,6	9,0 / 2,9
A20 / W55	kW / --	8,0 / 3,0	10,2 / 3,1
Capacité de refroidissement / coefficient de performance (EER)			
A35 / W18	kW / --	5,0 / 4,0	7,1 / 4,0



LEGENDE	
SYMBOLE	DESIGNATION
V	Vanne d'isolement
V3V	Vanne 3 voies motorisée
VE	Vase d'expansion
MAV	Manchette anti-vibratile
VID	Vidange
RB	Robinet à boisseau sphérique
M	Manomètre
SS	Soupape de sécurité
CNR	Clapet de non retour
PU	Purge
TH	Thermomètre
ST	Sonde de température

0	11/03/2020	Première diffusion	JYP
Indice	Date	Modification	Dessiné
<div><div><div><div>PUTALLAZ</div><div>INGENIEURS-CONSEILS SARL</div><div><div>BOULEVARD JAMES-FAZY 13</div><div>CH - 1201 GENEVE</div><div>TEL +4122 734 34 44</div><div>FAX +4122 734 34 54</div><div>www.putallaz-ing.ch</div></div></div></div></div>			20.76 - Stirling PLO Schéma de principe production hydraulique
			N° AFFAIRE 20.76 ECHELLE Sans



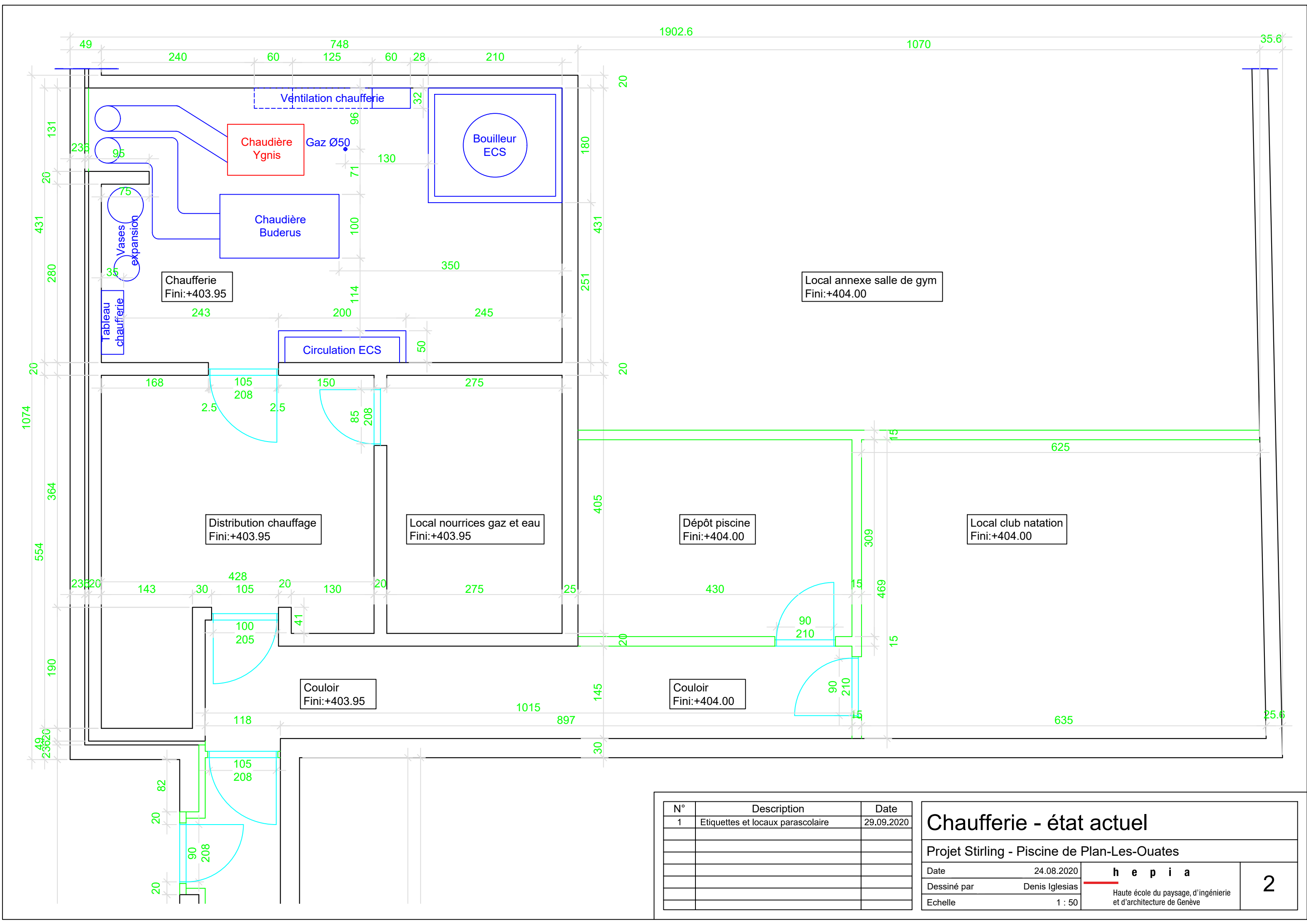
N°	Description	Date

Piscine - SS1

Projet Stirling - Piscine de Plan-Les-Ouates

Date 29.09.2020
Dessiné par Denis Iglesias
Echelle 1 : 100

he p i a
Haute école du paysage, d'ingénierie
et d'architecture de Genève

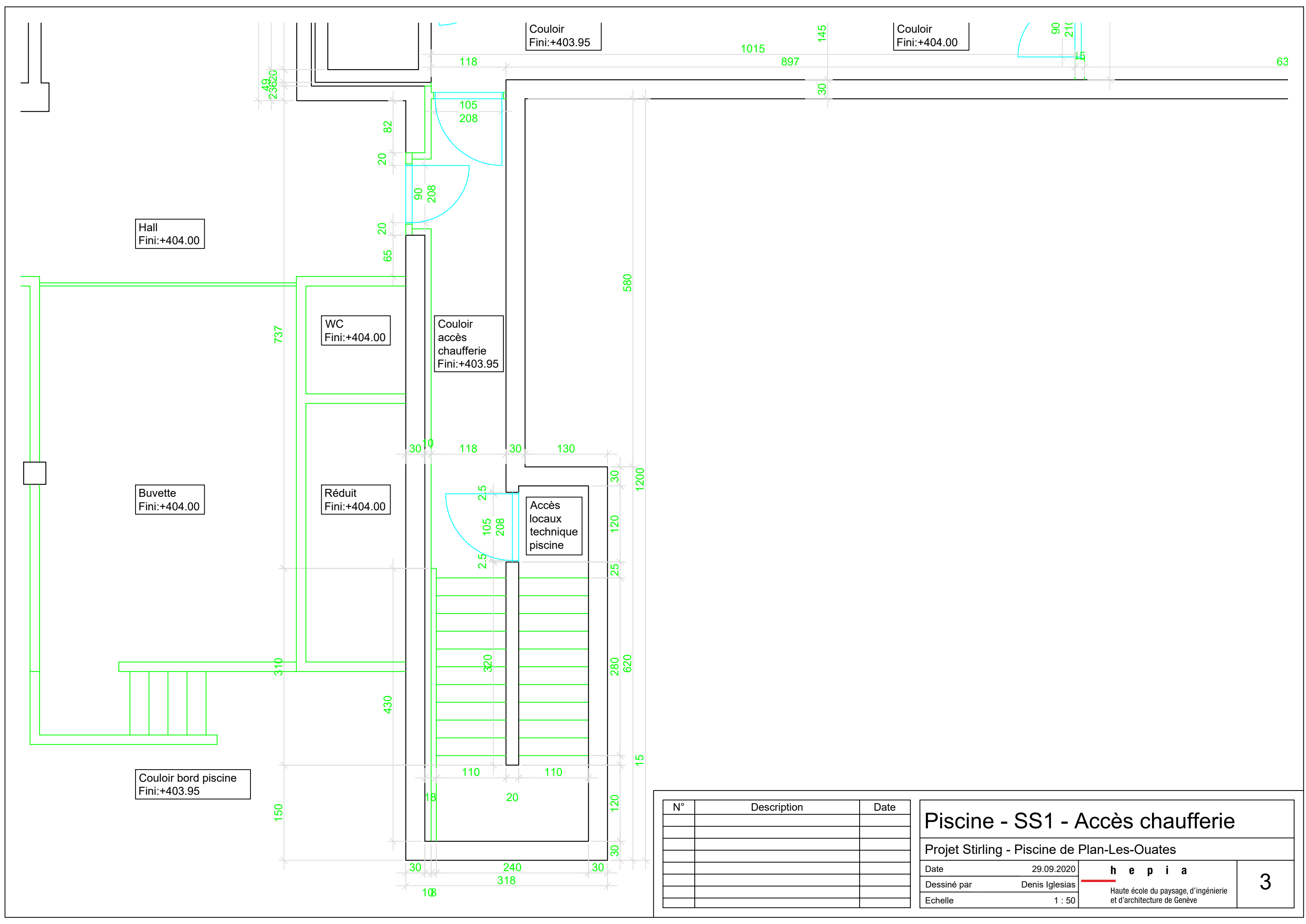


N°	Description	Date
1	Etiquettes et locaux parascolaire	29.09.2020

Chaufferie - état actuel

Projet Stirling - Piscine de Plan-Les-Ouates

Date	24.08.2020	h e p i a Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève	2
Dessiné par	Denis Iglesias		
Echelle	1 : 50		

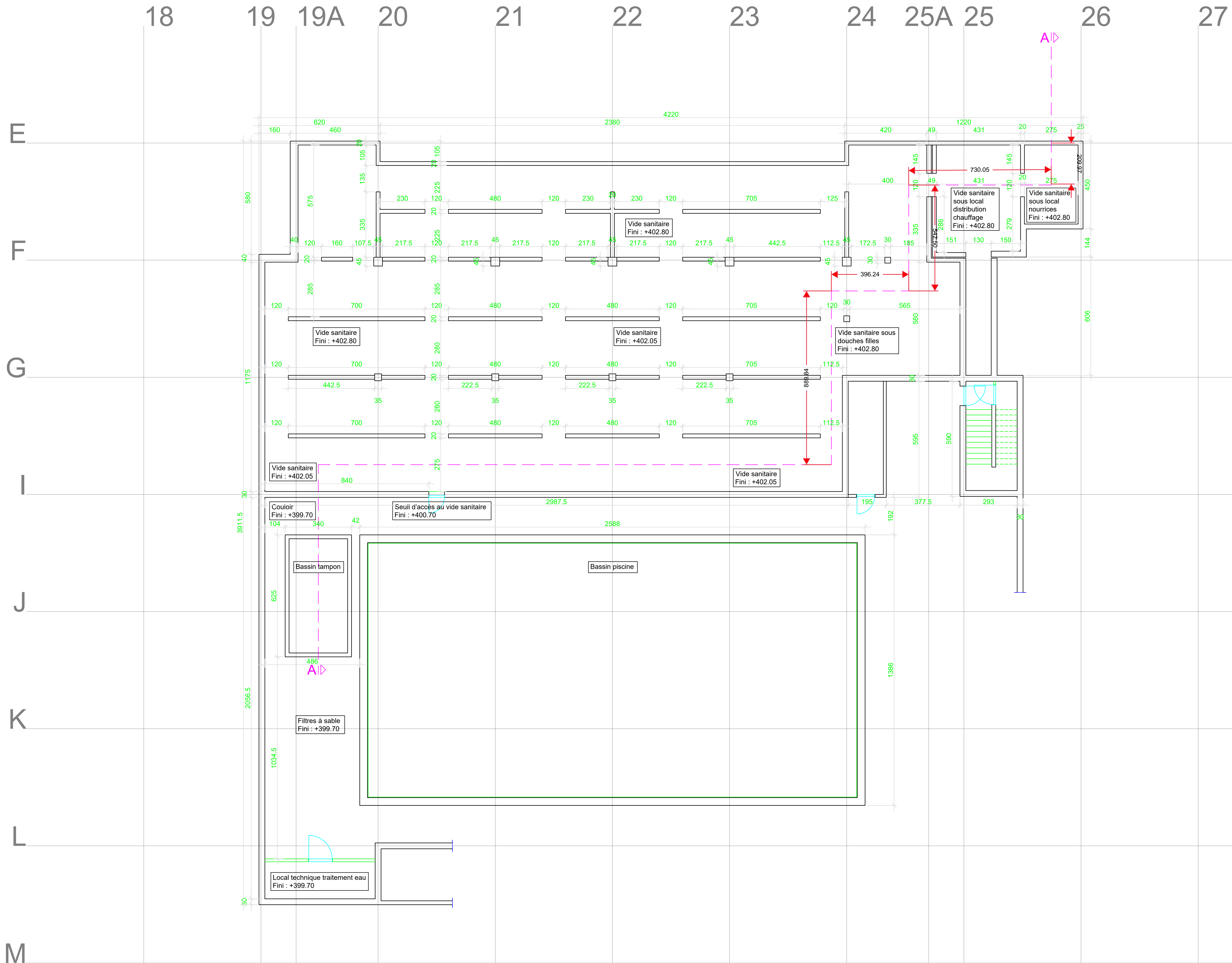


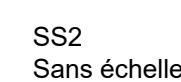
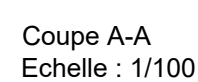
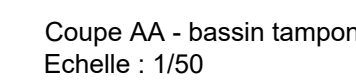
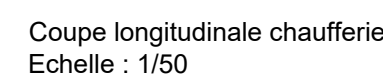
N°	Description	Date

Piscine - SS1 - Accès chaufferie

Projet Stirling - Piscine de Plan-Les-Ouates

Date	29.09.2020	h e p i a Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève	3
Dessiné par	Denis Iglesias		
Echelle	1 : 50		





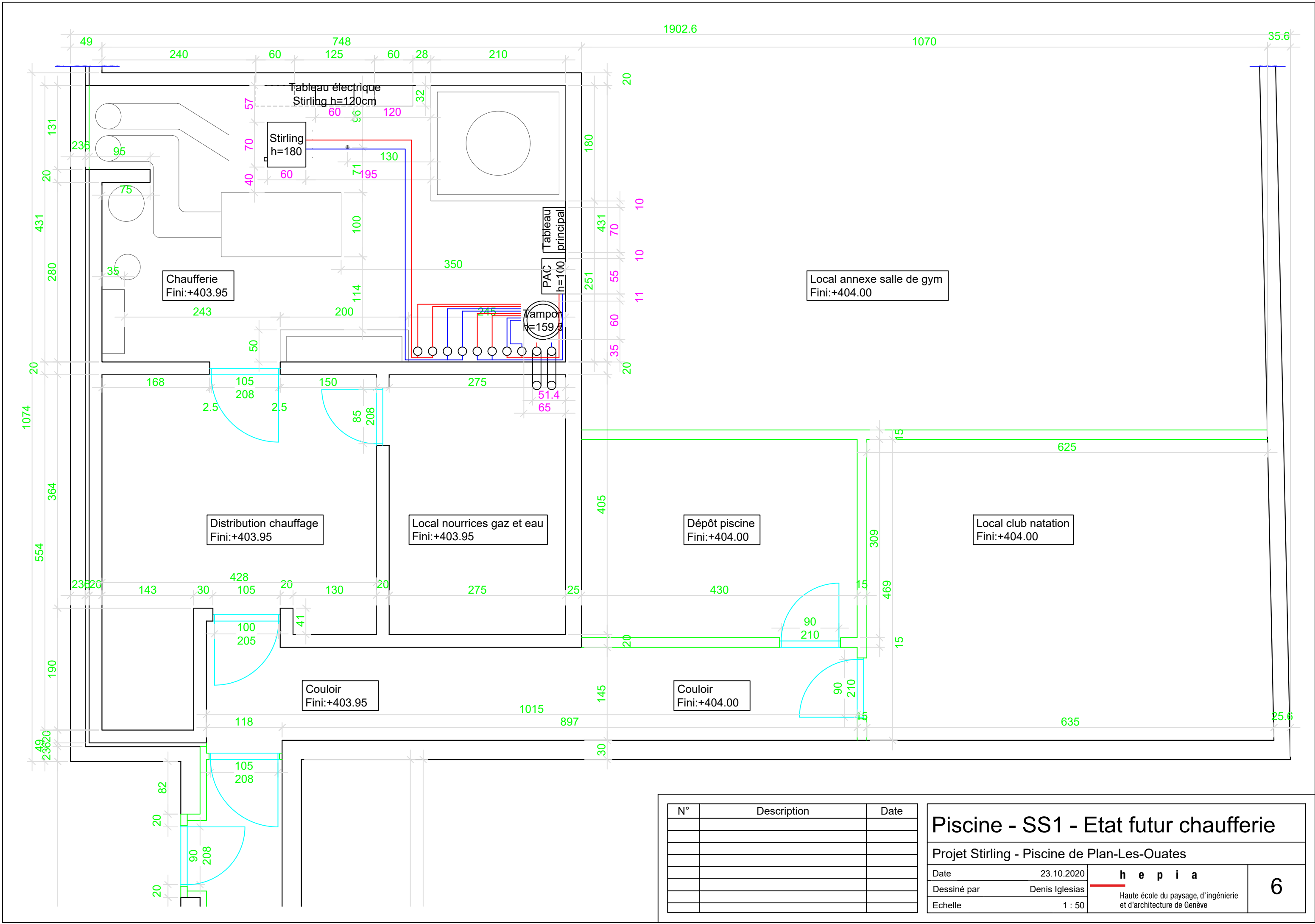
N°	Description	Date

Coupes

Projet Stirling - Piscine de Plan-Les-Ouates

Date	29.09.2020	<div>h e p i a</div>	5
Dessiné par	Denis Iglesias		
Echelle	-		

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Gand



N°	Description	Date

Piscine - SS1 - Etat futur chaufferie

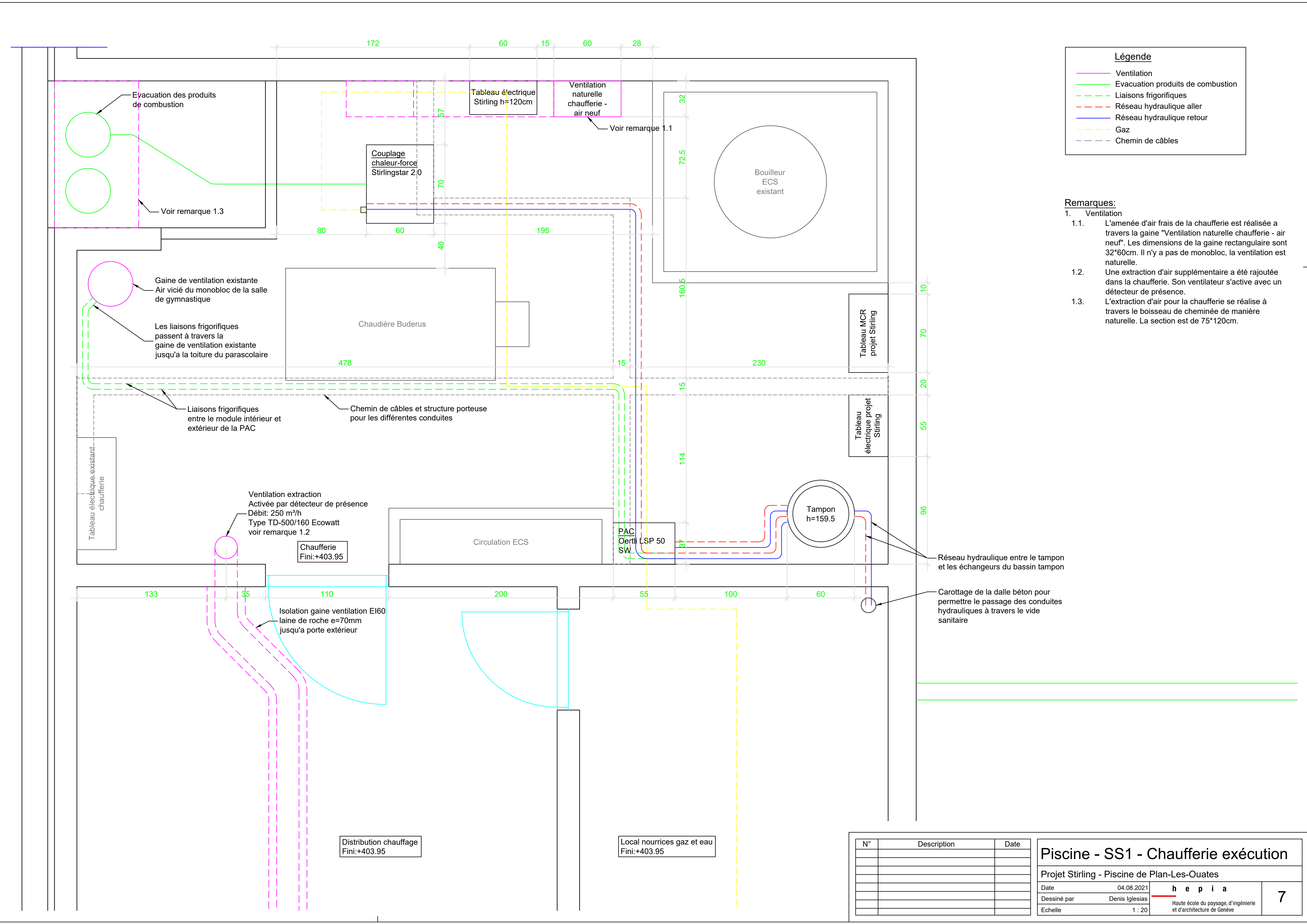
Projet Stirling - Piscine de Plan-Les-Ouates

Date	23.10.2020
Dessiné par	Denis Iglesias
Echelle	1 : 50

h e p i a

Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève

6



Légende

Ventilation

Evacuation produits de combustion

Liaisons frigorifiques

Réseau hydraulique aller

Réseau hydraulique retour

Gaz

Chemin de câbles

- Remarques:
1. Ventilation

1.1.

L'amenée d'air frais de la chaufferie est réalisée a travers la gaine "Ventilation naturelle chaufferie - air neuf". Les dimensions de la gaine rectangulaire sont 32*60cm. Il n'y a pas de monobloc, la ventilation est naturelle.

1.2.

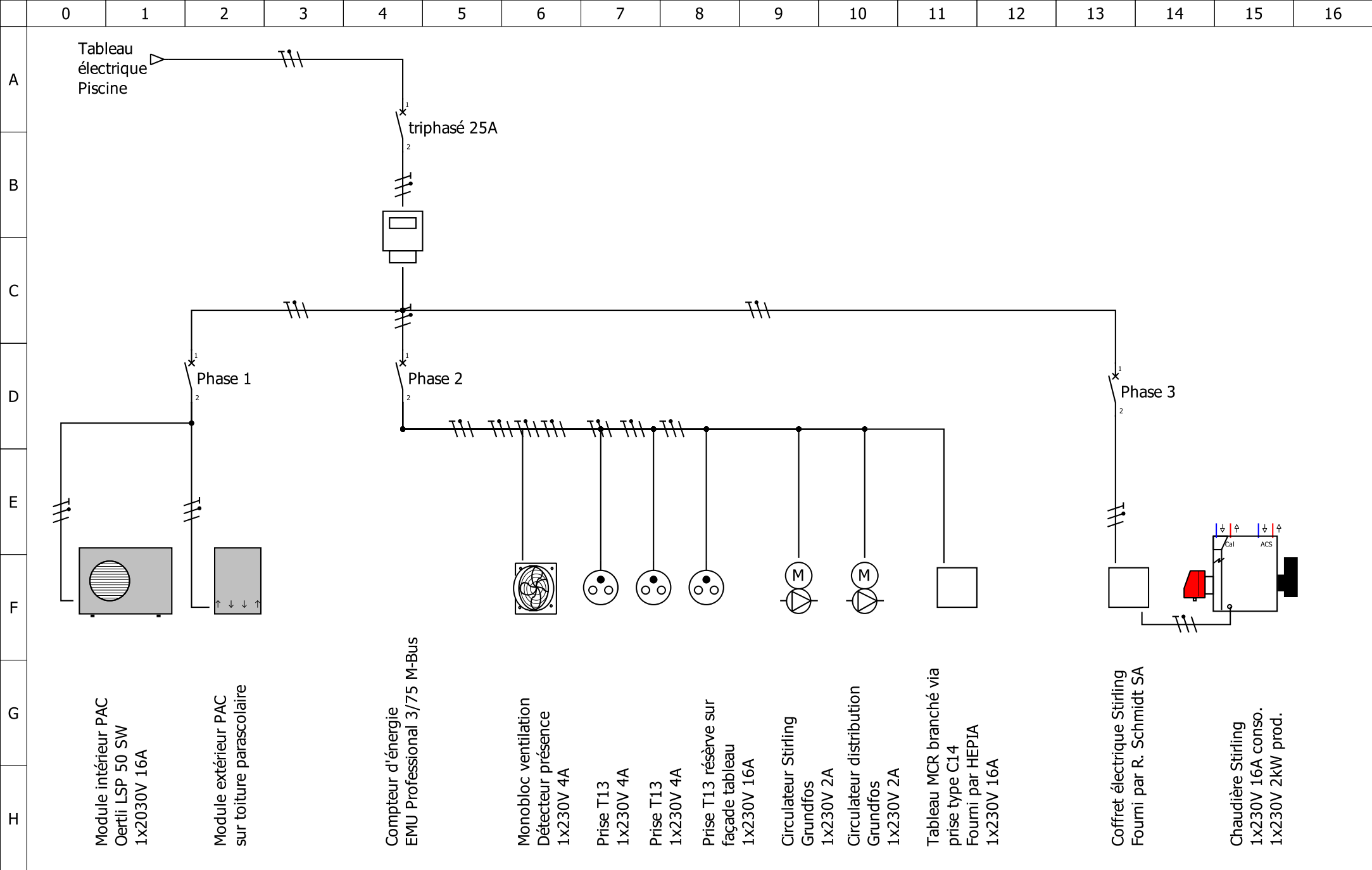
Une extraction d'air supplémentaire a été rajoutée dans la chaufferie. Son ventilateur s'active avec un détecteur de présence.

1.3.

L'extraction d'air pour la chaufferie se réalise à travers le boisseau de cheminée de manière naturelle. La section est de 75*120cm.

N°	Description	Date

Piscine - SS1 - Chaufferie exécution		
Projet Stirling - Piscine de Plan-Les-Ouates		
Date	04.08.2021	h e p i a
Dessiné par	Denis Iglesias	
Echelle	1 : 20	
Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève		7



Version	Date	Modifications	Schéma électrique
1	02.03.2020	Première version	
2	03.04.2020	Divers	
3	02.11.2020	Divers	
4	17.11.2020	Modif phases et composants	
5	13.01.2021	Ajout 4eme compteur chaleur + clarification branchement tableau MCR	
6	29.11.2021	Supprimer ligne local PV et compteurs chaleurs. Ligne 3 dédiée au Stirling et ligne 2 pour le restes des appareils	Auteur : DI
			Fichier : Projet_Stirling_PLO
			Folio : 2/5