

FREINS ET LEVIERS PAC THT : PARTIE 2 – ETAT DE L'ART

Webinaire de restitution de l'étude
28/11/2024



Quelques informations pratiques

- Merci de couper vos micros et caméras
- Une session de questions-réponses est prévue après chaque intervention. Pour participer :
 - Utilisez le chat écrit
 - Précisez dans le chat si vous souhaitez intervenir à l'oral
- Les présentations seront disponibles sur l'extranet ALLICE sous quelques jours.
- Contactez le 06 27 38 26 76 en cas de souci technique.



Bon visionnage !

- **Contexte**
- **État de l'art des technologies et produits sur le marché**
- **Présentation de l'Annex 58 HTHP**
- **Présentation des solutions de PAC alternatives**
- **Présentation d'Airthium**
- **Présentation des architectures de PAC THT**
- **Éléments sur la rentabilité à l'échelle européenne et point sur les projets Européens**
- **Conclusion**



Benjamin Bruyère
CETIAT



Clément Gachot
EDF



Charles L'Huillier
AIRTHIUM

Freins et leviers au déploiement des PAC une étude en trois volets

 **OBJECTIF** – Identifier les freins et leviers au déploiement des solutions de PAC dans l'industrie



Volet 1 :

**Étude de marche sur
les solutions matures
de PAC**



Volet 2:

**État de l'art sur les
PAC THT**



Volet 3:

**Intégrations
technologiques de
PAC pour l'industrie**



FREINS ET LEVIERS PAC THT : PARTIE 2 – ETAT DE L'ART

Restitution de l'étude



38. PAC 2 – Etat de l'art sur le PAC THT (Mise à jour d'étude ALLICE)

 **OBJECTIF** - Actualiser l'étude ALLICE 2021 sur les PAC THT en intégrant les dernières avancées technologiques (R&D, retours d'expérience des pilotes existants).

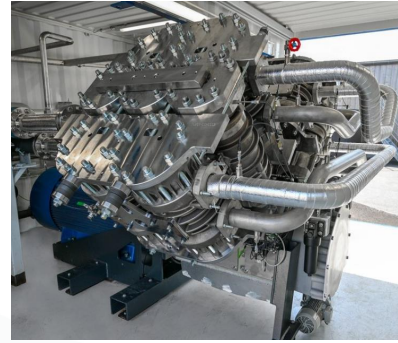
PHASES DE L'ETUDE

1. **Synthèse des offres de PAC THT** (via le rapport de l'Annexe 58 du THT HTHP et publications)
2. **Focus sur les technologies de PAC THT alternatives** (PAC à hélium, thermoacoustiques,...)
3. **Analyse des performances et intérêt économique des PAC THT**
4. **Démonstrateurs et machines en fonctionnement identifiés** (projets européens, PAC à absorption,...)

État de l'art des technologies et produits sur le marché

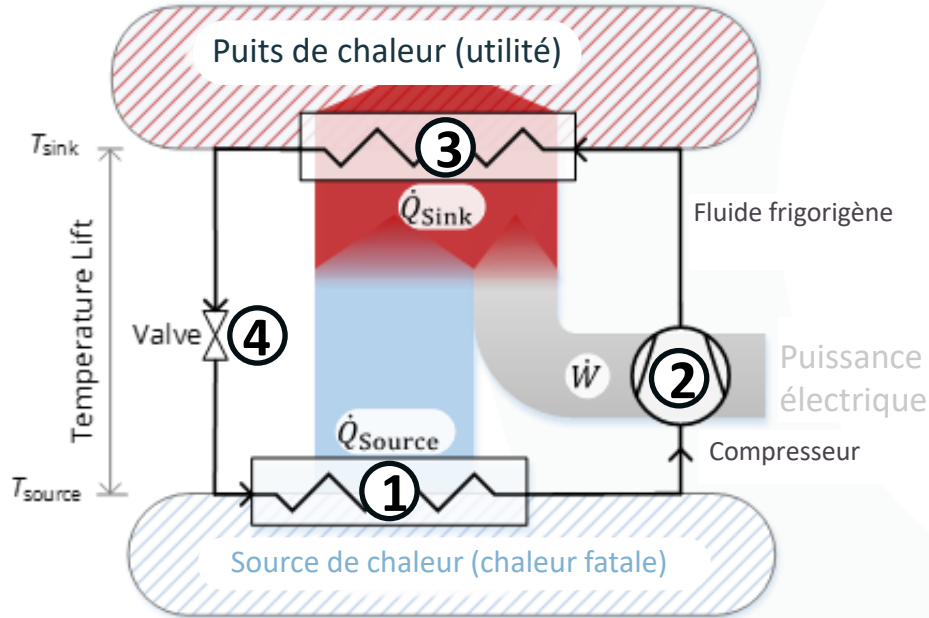
Rappels technologiques

- **Cycle à compression fermé**
 - **Entraînement par moteur électrique** ➡ Technologie majoritaire
 - Entraînement mécanique
- Cycles ouverts
- Cycle d'absorption
- Cycles Stirling
- Cycles thermoacoustique



Technologie majoritaire : cycle à compression fermé

- Transfert d'énergie basse T° vers une T° élevée en utilisant un fluide frigorigène en 4 temps :



- PAC THT : chaleur à plus de 100°C
 - 1) Evaporation
 - 2) Compression
 - 3) Condensation
 - 4) Détente
- COP : COefficient de Performance
- $$COP = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie électrique}}$$

Les fluides frigorigènes

2 grandes catégories :

Artificiels

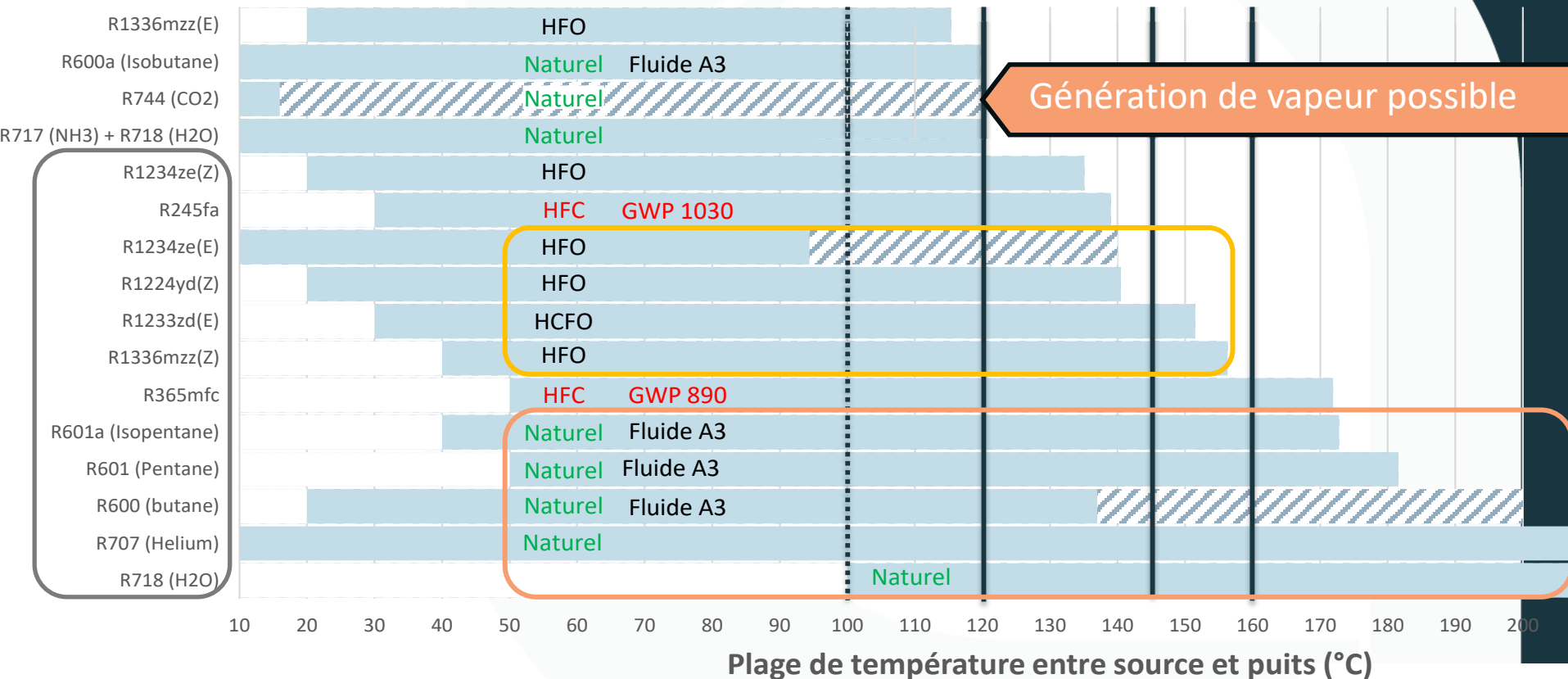
- HFC
 - R134a
 - R245fa
 - etc. → fort GWP, Fgas-II horizon 2030
- HFO, HFCO
 - R 1234ze
 - R 1336mzz(Z)
 - etc → /!\ PFAS

Naturels

- NH_3 (R717) → fluide L2
- CO_2 (R744) → pressions élevées
- Eau (R718)
- Hélium (R704)
- Hydrocarbures
 - R290 (Propane)
 - R1290 (Propylene)
 - R600a (Isobutane)
 - etc. → fluides A3



Principaux réfrigérants adaptés pour les PAC THT



PAC THT Tmax 150°C

oilon

Combitherm
APPARATE- UND ANLAGE

Hybrid Energy
HIGH TEMPERATURE HEAT PUMPS

Johnson Controls

TransPAC

Fournisseur	Type de compresseur	Fluide frigorigène	Gamme de température source chaude et source froide (°C)	ΔT lift indicatif	Capacité [kW]	TRL
Oilon	Piston	R134a, R513A, R450A, R515B, R1234ze, R1233zd	20  110 	55	0  1 000	 8 9
Combitherm	vis	1233ZE 1234ze 515B 450A 513A 1234yf	35  90 	80	0  3 300	 9
Hybrid Energy (Jonhson control Sabroe)	Piston, vis	mélange de R-717 (ammoniac) et R-718 (eau)	20  80 	75	500  5 000	 9
Johnson Controls	Piston	R-717 (ammoniac) + R-600 (butane) cascade	40  80 	70	500  5 000	 7 8
Dalkia Transpac	Piston	R-1234ZE	55  90 	55	300  750	 8

Légende :



= PAC Stirling



= PAC à compression de vapeur



= PAC à absorption



= PAC transcritique

PAC THT Tmax 250°C

MAYEKAWA
MYCOM

ANEO

SPH

OLVONDO
TECHNOLOGY

HEATEN

enerin
ENERGY ENGINEERING

Fournisseur	Type de compresseur	Fluide frigorigène	Gamme de température source chaude et source froide (°C)	ΔT_{lift} indicatif	Capacité [kW]	TRL
Mayekawa Europe (FC comp.)	vis	R-717 (ammoniac) + R718 (eau) cascade	60 100 85 145	60	0 1 000	5
Aneo Industry	Piston et ventilateur centrifuge	R-717 (ammoniac) + R-718 (eau) cascade	20 100 90 150	90	1 200 10 000	7 8
Sustainable Process Heat (SPH)	Piston	fluides HFO	20 80 120 165	90	300 5 000	6 7 8
Olvondo	Piston (stirling)	R-704 (helium)	0 100 100 200	150	500 5 000	9
Heaten	Piston, sur mesure	fluides HFO et naturels (hydrocarbures)	95 100 155 200	45	1 000 6 000	7 8 9
Enerin	Piston (stirling)	R-704 (helium)	5 100 40 250	130	300 10 000	6

Légende :



= PAC Stirling



= PAC à compression de vapeur



= PAC à absorption



= PAC transcritique

PAC THT grosses puissances



Fournisseur	Type de compresseur	Fluide frigorigène	Gamme de température source chaude et source froide (°C)	ΔT lift indicatif	Capacité [MW]	TRL
Enertime (heatlift)	compresseur centrifuge jusqu'à 3 étages	R1234ze, R1233zdE, R600, R600a, R601a	30 90 200	110	2 15	7 8 9
Turboden	Turbo	Application spécifique	15 100 150 200	155	1 30	7 8 9
York	Absorption	LiBr / H2O	60 100 137	40	1 40	9
MAN Energy	Turbo compresseur centrifuge	R-744 (CO2)	20 100 150	130	10 50	7 8
Siemens Energy	Turbo	R-1233zd(E) / R-1234ze	0 100 115 160	110	8 70	9

Légende :



= PAC Stirling



= PAC à compression de vapeur

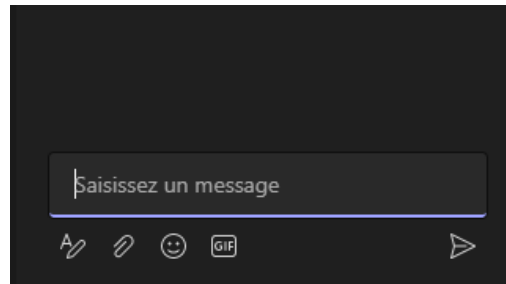
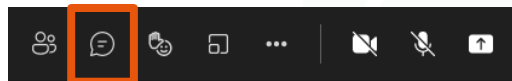


= PAC à absorption



= PAC transcritique

Des questions ?



Présentation de l'Annex 58

Clément Gachot



EDF R&D

Département TREE

*Technologies et Recherche pour
l'Efficacité Énergétique*

Clément Gachot clement.gachot@edf.fr

Chef de projet **SoBasCarbone**
Solutions de production de chaleur **Bas**
Carbone pour l'industrie



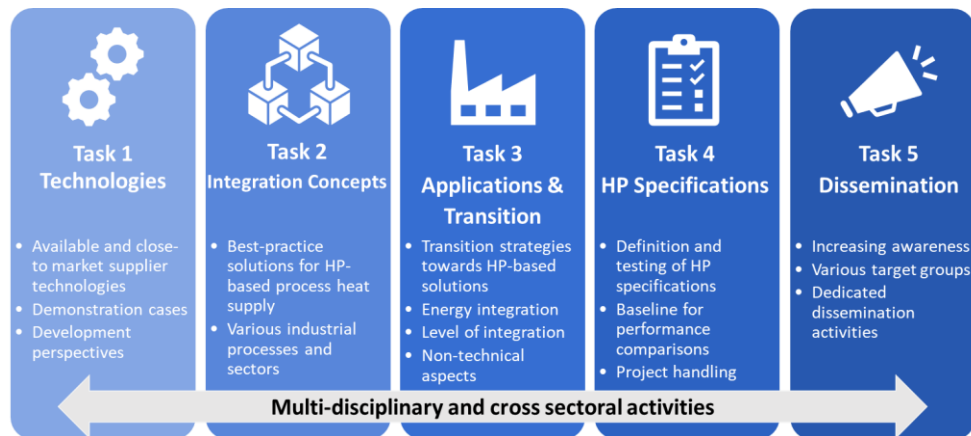
Déroulé de la présentation

1. Présentation de l'annexe
2. Les fiches technologiques
3. Les fiches démonstrateurs
4. Conclusions

1. Présentation de l'annexe 58 de l'AIE (programme HPT)

Cette annexe, concernant les PAC HT, donne un aperçu des technologies existantes et commercialisées (ou proche de l'être) et a permis d'identifier les développements en termes de R&D encore nécessaires.

Afin de maximiser l'impact des pompes à chaleur haute température, cette annexe examine également l'intégration des processus par le développement de concepts pour l'approvisionnement en chaleur industrielle par pompe à chaleur et la mise en œuvre de ces concepts.



14 pays participants : Danemark, Autriche, Belgique, Chine, Canada, France, Finlande, Allemagne, Hollande, Japon, Norvège, Corée du Sud, Suisse, USA

Pilote de l'annexe : Danish Technological Institute (DTI)

Représentants Français : EDF et CEA

2. Les fiches technologiques

Descriptions technologiques de deux pages provenant de 34 fournisseurs.

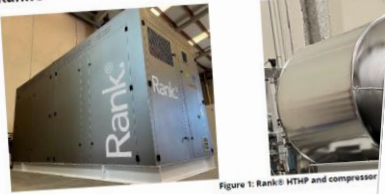
Les informations clés comprennent :

- Données de performance
- Plage de capacité
- Températures max.
- Fluide de travail
- Type de compresseur
- Coût d'investissement spécifique
- TRL
- Durée de vie prévue
- Taille et encombrement
- Exemples de projets

Annex 58 High-Temperature Heat Pumps

Screw compressor high-temperature heat pump

Rank®



Summary of technology

Rank® is a worldwide recognized company in the design and manufacture of Organic Rankine Cycles for different capacities and applications. Now, Rank® is using this valuable experience in extreme conditions to develop high-temperature heat pumps (HTHP) that can produce renewable heat up to 160 °C.

New Rank® HTHP systems are based on a single-stage cycle with an internal heat exchanger (IHx). However, a two-stage cascade cycle with IHxs can be assembled for covering larger temperature lifts.

The compressor is electrically driven, is based on a screw technology with a frequency inverter to be adapted to the customer's actual operation. The compressor is based on direct drive, avoiding gears or pulleys, minimizing the maintenance, and increasing electrical efficiency. Moreover, magnetic coupling ensures tightness and avoids the possibility of leakage.

Lubrication used for the proper operation of the compressor is polyolester oil (POE) of a specific viscosity, fully compatible with organic working fluids and able to work at high temperatures while keeping the optimum properties.

Rank® HTHP systems since we have differed adapted to the heat sized using our technology. The multi industrial processes or district heating.

Our HTHP prototype sink and source to lab-scale prototype on the tempera designed for client

The development but our comm installing our applications.

Compact HTHP technology, a thermal oil heat coming used as inter coils, among

IEA Technology Collaboration Heat Pumping Technologies (HPT TCP)

Annex 58 High-Temperature Heat Pumps

Rank®



Figure 2: Rank® modular solution

Our machines operate through an automatic, efficient managing system without human intervention. Real-time data transmission via the internet allows predictive maintenance by server data analysis, online supervision (PC, mobile phone, tablet, etc.), and remote configuration of working parameters.

Table 1: Performance for the single-stage cycle with IHx HTHP prototype (experimentally measured in lab. prototype, not fully optimized for specific purpose)

Temper.in [°C]	Temper.out [°C]	Tem.in [°C]	COP _{heating} [-]
84	70	103	5.9
101	70	122	4.6
102	72	130	4.0
115	70	130	3.7
100	90	160	3.0
116	95	160	2.8

Table 2: Case study for production of thermal oil.

Temper.in [°C]	Temper.out [°C]	Tem.in [°C]	Tem.out [°C]	COP _{heating} [-]
100	70	130	110	3.6
100	80	130	110	4.5

Project example

A perfect application for our HTHP systems is district heating networks (DHN).

DHN are present in urban and industrial environments where each user is connected and uses heat at a given temperature. Heat is distributed at a particular temperature, but users' needs can differ.

IEA Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies (HPT TCP)

FACTS ABOUT THE TECHNOLOGY

Heat supply capacity: 120 kW to 2000 kW

Temperature range: useful heat inlet 80 °C to 120 °C and outlet 100 °C to 160 °C / heat source inlet 60 °C to 100 °C and outlet 40 °C to 80 °C

Working fluid: adaptable to the application R245fa, R1336mzz(Z), R1233zd(E)

Compressor technology: Screw

Specific investment cost for installed system without integration: 200-400 € per kW, but it varies between temperature levels and applications

TRL level: TRL 7 – prototype demonstration

Expected lifetime: 20 years (with the possibility of hiring Service to extend lifetime and ensure the highest energy performance)

Size: weight 5.5 to 8 tons / surface required 5.2 to 13 m² / height 2.2 to 2.5 m

Contact information

Rank ORC, s.l.
 info@rank-orc.com / sales@rank-orc.com
 +34 964 69 68 59

All information were provided by the supplier without third-party validation. The information was provided as an indicative basis and may be different in final installations depending on application specific parameters.

3. Les fiches Démo

16 descriptions de démo sur A4 recto verso

Les éléments clés synthétisés :

- Performances au point de conception
- Heures de fonctionnement
- Fabricant du système
- Année d'installation
- Fluide de travail
- Technologie de compresseur
- Coût d'investissement
- Économies d'énergie
- Économies annuelles estimées de CO2

Annex 58 High-Temperature Heat Pumps

www.heatpumpingtechnologies.org

Refrigerant cycle designed as twin cycle for efficient operation over a wide range of operation conditions

Operating experiences

The DryEfficiency heat pump was operated for more than 4000 h covering a large range of operation conditions (heat supply temperatures from 104°C - 160°C, design point at 120°C). Compared to a natural gas burner, the providing the same amount of process heat, the DryEfficiency heat pump reduces end energy consumption by 2200 kWh/a, primary energy consumption by 1900 kWh/a, CO₂ emission by 590 t/a, resulting in 60500 €/a of energy cost savings. The increase in drying air temperature in the last zone of the dryer has beneficial effects on brick drying time and quality.

Figure 3: Measured COP of the DryEfficiency heat pump at Wienerberger

Special learnings

Challenges encountered during the development of the high temperature heat pumps included material compatibility (lubricant, refrigerant, sealing materials), mechanical design (vibrations), integration infrastructure (e.g. pressure maintenance, flow measurement) and in the process control (e.g. start up procedure, data transfer, measurement devices).

DryEfficiency demonstrated the successful component development for high temperature applications such as compressors, lubricant and ref...

Contact information

Stefan Puskas, Wienerberger AG
stefan.puskas@wienerberger.com
+43 664 8221132
Veronika Wilk, AIT Austrian Institute of Technology
veronika.wilk@ait.ac.at
+43 664 6207794

All information were provided without third-party validation provided as an indicative in final installations depend

FACTS ABOUT THE

Installation year: 2020
Operating hours: 4000 h
Working fluid used: CO₂
Compressor manufacturer: Kälte- und Kälte-technik
Performance benefits:

- Heat source
- Heat sink
- COP
- Performance
- Heat source
- Heat sink
- COP
- Performance

Investment Savings Estimated Link to

Annex 58 High-Temperature Heat Pumps

www.heatpumpingtechnologies.org/annex58/

DryEfficiency - Industrial heat pump for a climate-neutral European industry

Figure 1: DryEfficiency Heat Pump at Wienerberger brick production facility in Uttendorf, Austria

Summary of demonstration case

In the H2020 project DryEfficiency, high temperature heat pumps were developed and demonstrated to supply process heat with up to 160°C for industrial drying processes to increase energy efficiency and to lower CO₂ emissions. Wienerberger AG, the largest brick producer in the world, operates around 200 brick dryers. The DryEfficiency heat pump was integrated in the brick production process in Uttendorf, Austria, supplying heat for the drying process. A thermally moist exhaust air from the dryer to the kiln and water at 90°C for the dryers. The DryEfficiency heat pump uses the hot water from the thermal heat pump as the heat source and provides hot air at up to 160°C for the last zone of the dryer, where

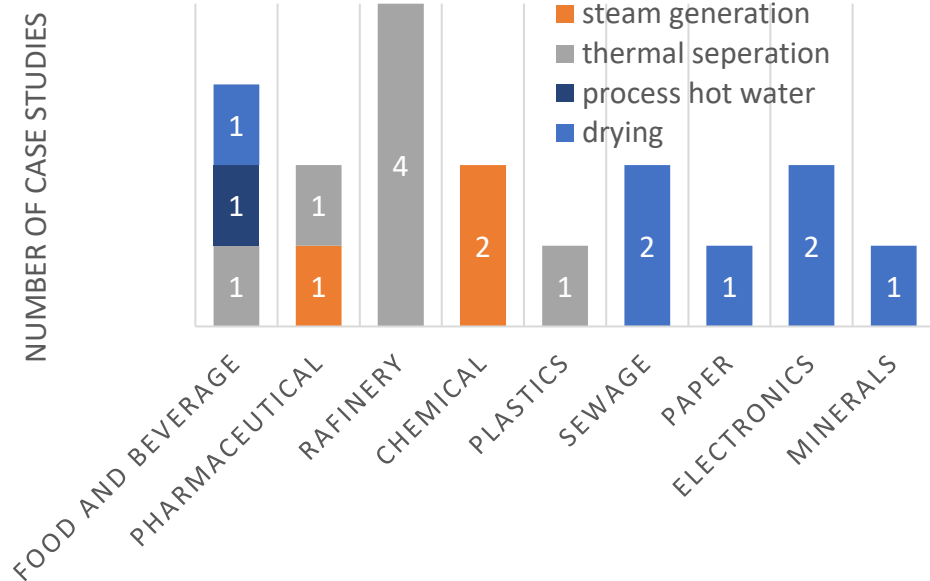
Figure 2: Layout of the DryEfficiency heat pump

It is a closed loop vapor compression heat pump, the development and demonstration work included:

- The use of the synthetic low GWP refrigerant R-1336mzz(Z) by Chemours
- 8 piston compressors designed for high temperature applications by Viking Heat Engines
- Fine-tuned, synthetic lubricant working stable with the refrigerant by Fuchs Schmierstoffe

Johannes Rath, CTO at Wienerberger Building Solutions: "Sustainability has always been at the core of the Wienerberger world. As part of the DryEfficiency research project, together with AIT, we were able to set another milestone in the direction of decarbonisation of the brick industry and create a prime example of how innovations from research can be brought to market quickly"

3. Les fiches démo



No.	Supplier	Industry	Process	Heat source			Heat sink			HP Type	Refrigerant	Compressor	Capacity [kW]	COP _H	Op. hours	Ref.
				Unit Operation	T _{out} [°C]	T _{in} [°C]	Unit Operation	T _{out} [°C]	T _{in} [°C]							
1	n. a.	beverage	alcoholic distillation	product cooling	75	78.3	distillation	140	n. a.	MVR	n. a.	n. a.	350	5.2	n. a.	[1]
2	Mayekawa	electronic	coil drying	electro-painting cooling	25	30	drying	120	20	CCHP	R744	piston	89	3.1	n. a.	[1]
3	AMT/AIT	food	starch drying	waste heat	72	76	drying	138	96	CCHP	R-1336mzz(Z)	screw	374	3.2	4,000	[2]
4	Olvondo	pharmaceutical	recooling	recooling heat	34	36	steam generation	183	178	Stirling HP	R704	piston	2,250	1.7	6,100	[2]
5	Kobelco	sewage	sludge drying	exhaust drying air	93	93	steam generation	160	160	MVR	R718	twin-screw, roots blower	675	2.9	n. a.	[2]
6	Kobelco	refinery	bioethanol distillation	process cooling	60	65	distillation	115	110	CCHP + Flash Tank	R245fa	twin-screw	1,850	3.5	n. a.	[2]
7	MHI	electronic	coil drying	waste heat	50	55	drying	130	70	CCHP	R134a	centrifugal	627	3.0	n. a.	[2]
8	Piller	plastics	thermal separation	exhaust vapour	60	60	steam generation	131	126	MVR	R718	turbo (8 blowers)	10,000	4.4	8,000	[2]
9	AMT/AIT	minerals	brick drying	exhaust drying air	80	84	drying	121	96	CCHP	R-1336mzz(Z)	piston (8 compr.)	296	5	4,000	[2]
10	Spilling	pulp and paper	pulp drying	exhaust vapour	105	133	steam generation	201	n. a.	MVR	R718	piston (4 LT-, 2 HT-cylinders)	11,200	4.2	7,500	[2]
11	Spilling	chemical	chemical	exhaust vapour	105	152	steam generation	211	n. a.	MVR	R718	piston (4 LT-, 2 HT-cylinders)	12,000	5.3	7,500	[2]
12	Rotrex, Epcor	sewage	sludge drying	surplus steam	100	n. a.	steam generation	146	n. a.	MVR	R718	turbo (2 stages)	500	4.5	n. a.	[2]
13	SkaleUP	dairy	process hot water	(re)cooling	12, 0	20, 5	process hot water	115	95	CCHP	LT-C: R290, HT-C: R600	piston	300	2.5, 2.3	6,500	[2]
14	QPinch	chemical	steam production	exhaust vapour	120 - 145		steam generation	140 - 185		heat transformer	H ₂ PO ₄	heat-driven	2,900	0.45	2,500	[2]
15	Huayuan Taimeng	refinery	ethyl-benzene	waste heat	95	120	steam generation	152	n. a.	heat transformer	LiBr-H ₂ O	heat-driven	7,553	0.48	n. a.	[2]
16	Shanghai Nuotong	beverage	alcoholic distillation	air	n. a.	18.9	steam generation	120	90	CCHP + Flash Tank + MVR	LT-C: R410a, HT-C: R245fa	screw	180	1.85	n. a.	[2]
17	Huayuan Taimeng	refinery	alkyl-benzene	waste heat	86	127	steam generation	150	n. a.	heat transformer	LiBr-H ₂ O	heat-driven	5,100	0.48	n. a.	[2]
18	Shandong Zhangqiu Blower	refinery	ethanol distillation	exhaust vapour	76	n. a.	steam generation	116	n. a.	MVR	R718	centrifugal	n. a.	7.68	7,000	[2]

3. Les perspectives de développement du marché

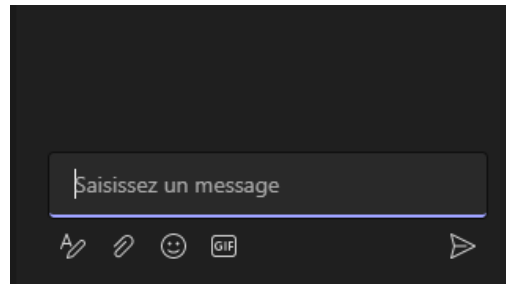
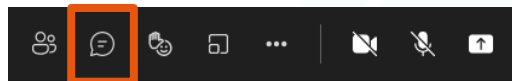
Heating Capacity	Temperature	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
200 kW to 10 MW	< 120 °C	Prototypes available 	Demonstrators available 	Commercial roll-out 	Established as preferred technology 							
	120 °C - 160 °C		Prototypes available 	Demonstrators available 	Commercial roll-out 	Established as preferred technology 						
	> 160 °C		Prototypes available 	Demonstrators available 	Commercial roll-out 	Established as preferred technology 						
>10 MW	< 120 °C	Technology transfer & commercial project sales 	Demonstrators available 	Established as preferred technology 								
	> 120 °C	Technology transfer & commercial project sales 	Demonstrators available 	Established as preferred technology 								

- Une nouvelle annexe est relancée pour prendre la suite de celle-ci en 2025
- D'autres annexes sur les PAC industrielles débuteront en 2025 : flexibilité et intégration dans les procédés de captage et de production d'H₂



Merci

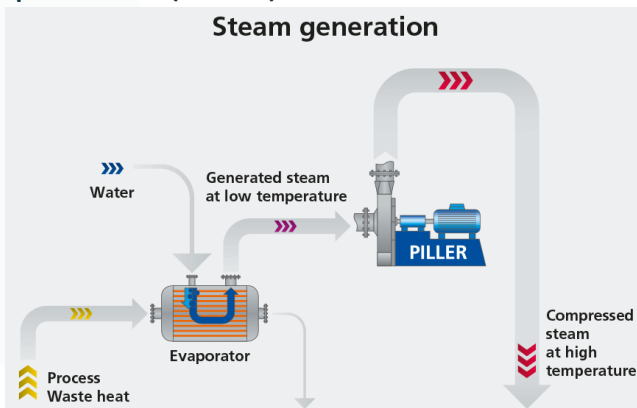
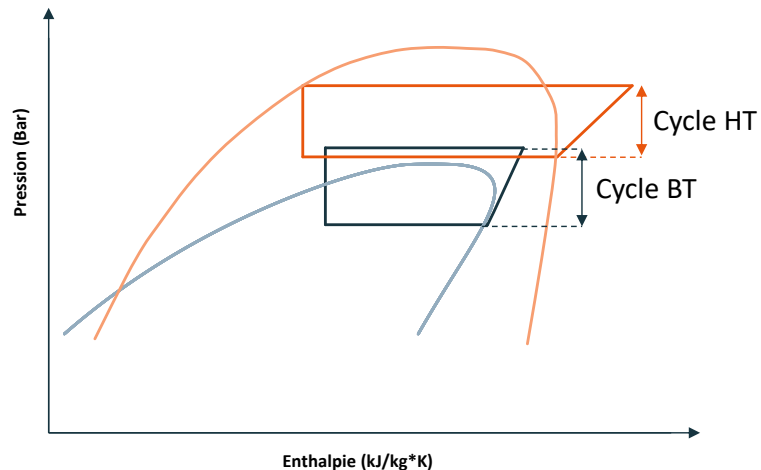
Des questions ?



Présentation des solutions de PAC alternatives

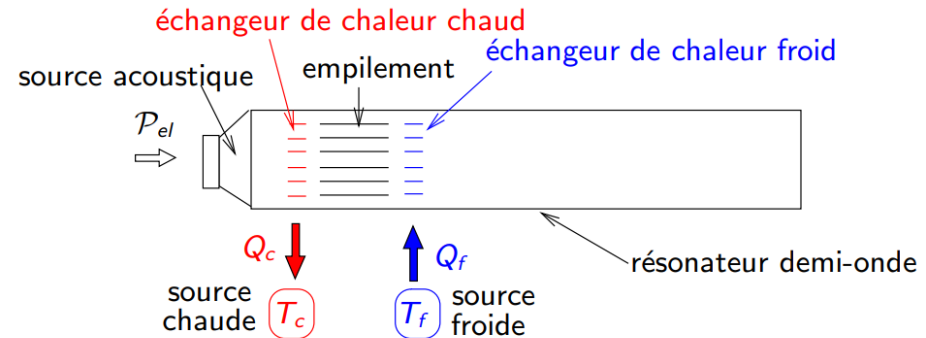
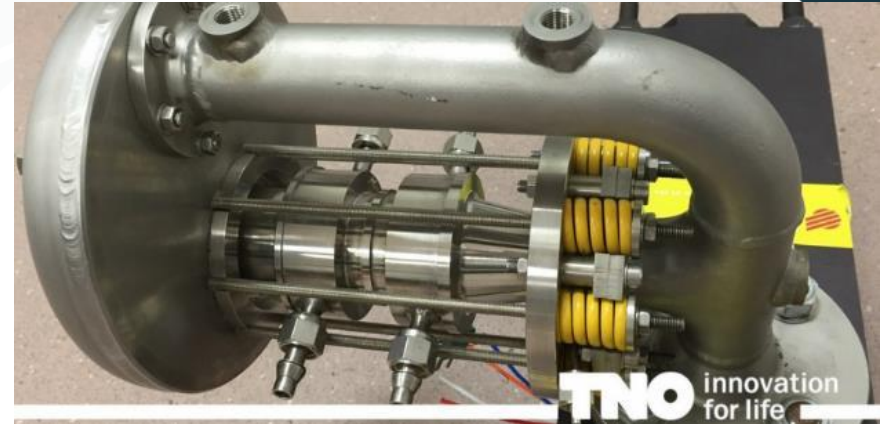
Couplages des technologies de PAC

- Cascade :
 - combinaison de deux cycles thermodynamiques basse pression et haute pression pour des lifts importants et plus efficaces
 - Applications notables
 - Ammoniac NH_3 (R717) / eau (R718)
 - Ammoniac NH_3 (R717) / pentane (R601)
- Hybridation
 - Compression mécanique de vapeur (CMV)
 - Compression thermique de vapeur



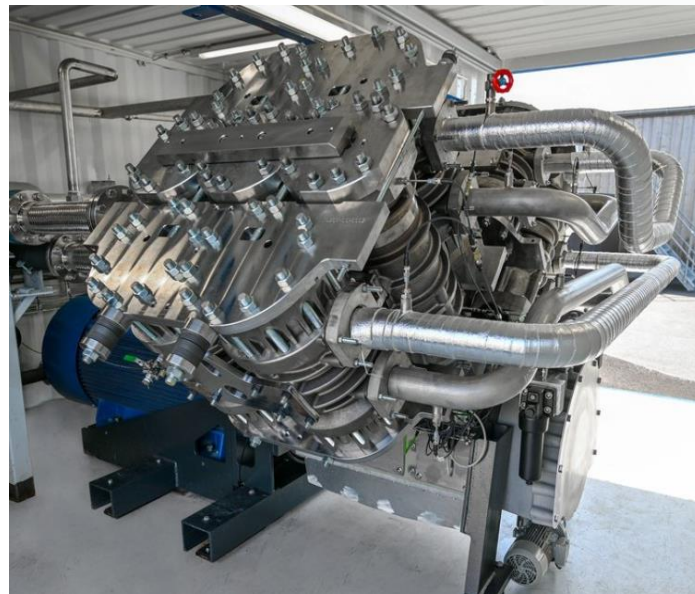
PAC thermoacoustique

- Onde sonore à grande puissance
 - Pas de changement de phase
- Equium, fabricant français
 - Des puissances pour l'instant réduites (quelques kW) limitant une utilisation industrielle
- Projet COMPTA (COMpact modular Thermo Acoustic heat pump) aux pays bas

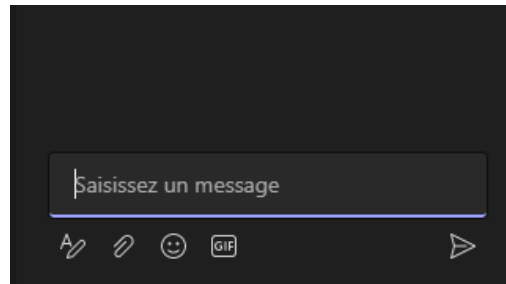
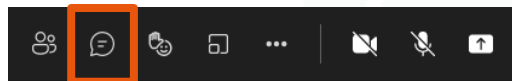


PAC stirling

- Technologie permettant des montées en température très élevées (+ de 100)
- Cycle thermodynamique sans changement de phase
 - Utilisation d'hélium (R704)
 - phase gazeuse maintenue
- 3 constructeurs identifiés
 - Olvondo Technology, basée en Norvège
 - Enerin basée en Norvège
 - Airthium, startup basée en France



Des questions ?



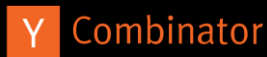
Présentation d'Airthium

Charles L'Huillier



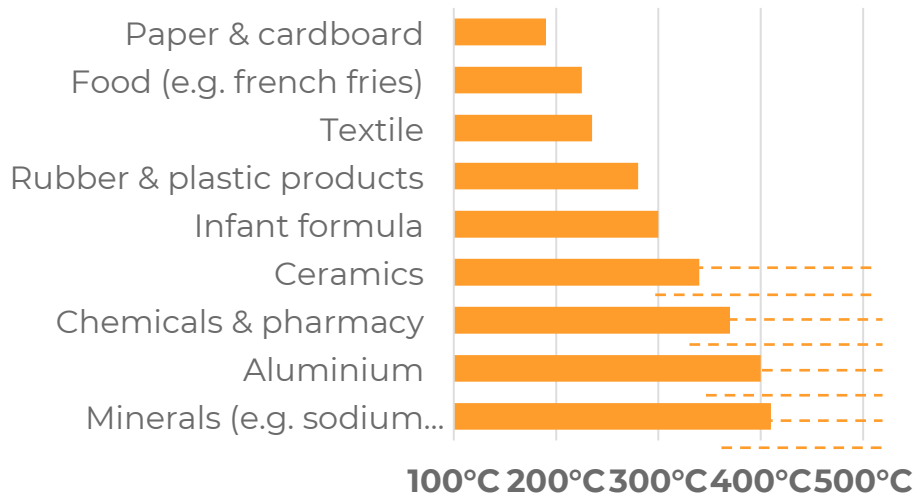


Decarbonizing **industrial heat** cost-effectively



Industrial heat between 150°C and 550°C is essential

Most goods require high temperature heat



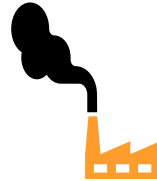
These examples are taken from potential customers we talked to in the past 12 months.



But industrial heat between 150°C and 550°C is also a heavy polluter



90% of industrial heat is generated by **burning fossil fuels** (natural gas, coal, oil...)



Resulting in **3% of global CO₂ emissions** for heat between 150 and 550°C¹



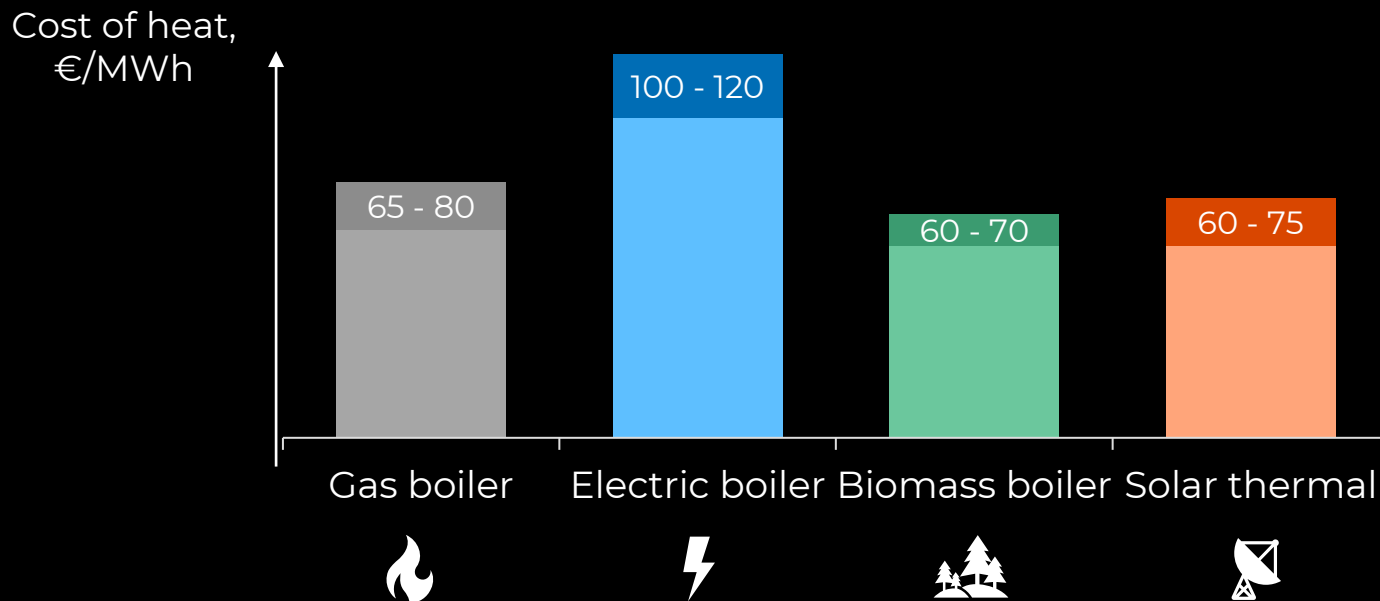
This is more than the **global air traffic**, or **Canada and Australia** combined^{2,3}

1: Industrial heat as a whole is estimated to account for 21% of global CO₂ emissions in 2016.

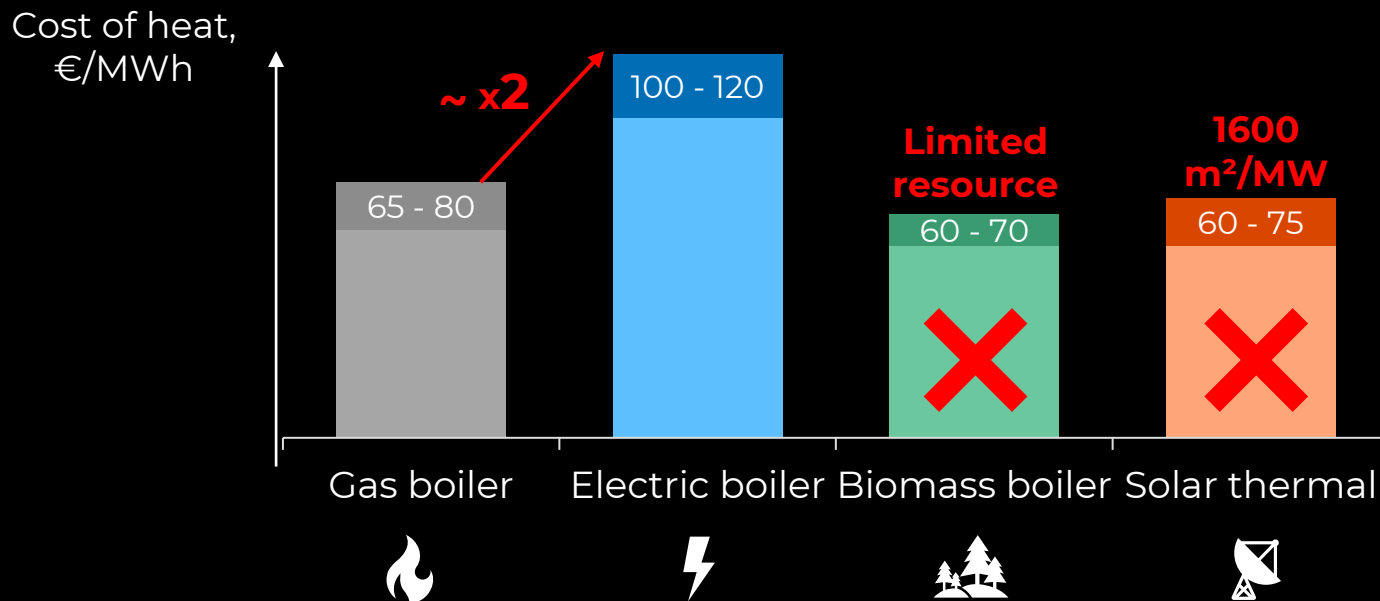
2: The global air traffic accounted for 2,6% of greenhouse gas emissions in 2018.

3: Canada and Australia accounted for respectively 1,7% and 1,2% of global CO₂ emissions in 2017.

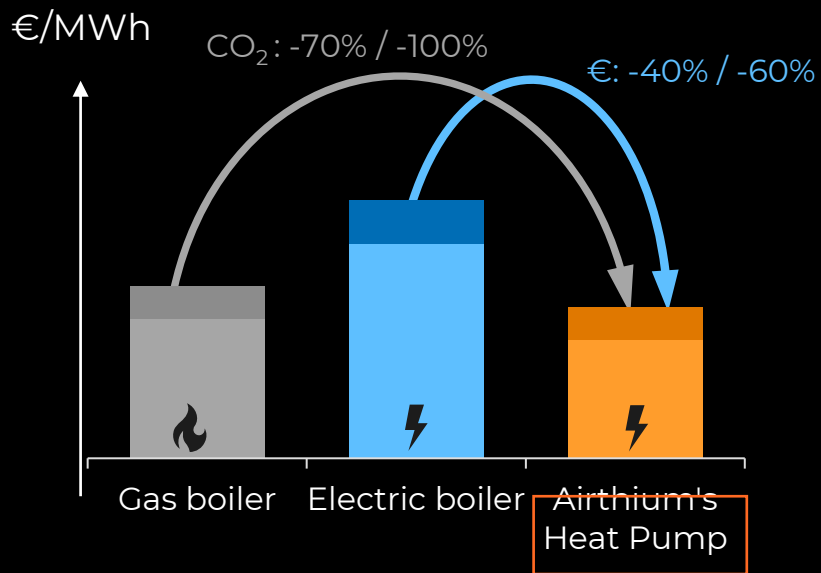
Affordable alternatives to fossil fuels are much needed but lack availability



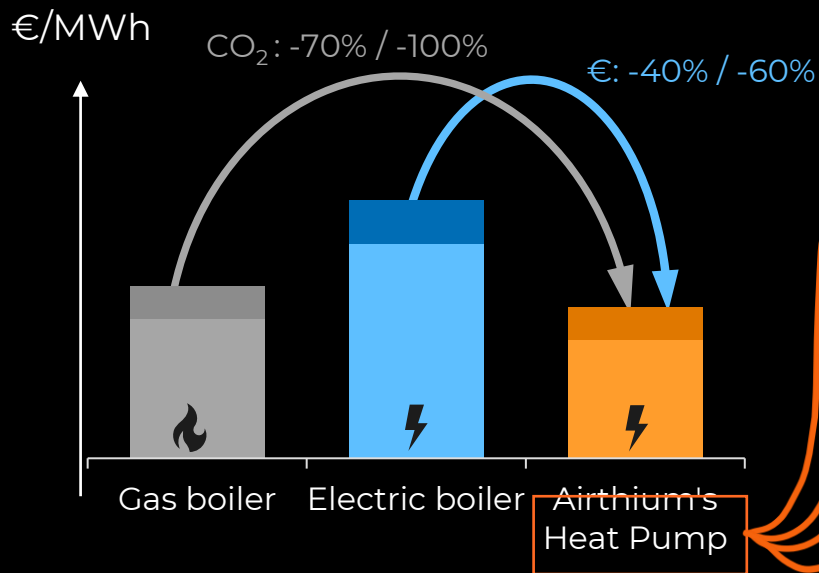
Affordable alternatives to fossil fuels are much needed but lack availability



Airthium's Heat Pump **cut the cost** of electrification



Airthium's Heat Pump **cut the cost** of electrification



For the first time at
Very High Temperatures

Airthium's Heat Pump	Commercial Industrial Heat Pumps
----------------------	----------------------------------

Higher process temperatures	550°C	150°C
Higher temperature lifts	300°C	80°C
Higher efficiency	86% Carnot*	<69% Carnot*
Lower operating costs	€	€€€

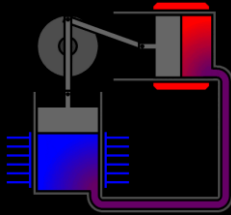
Breakthrough technology: our heat pump is **Hot, Efficient, Reliable and Safe**

	Airthium Heat Pump	Existing Heat Pumps	Technological enabler
01. Temperature	Up to 550°C	<i>~150°C</i>	Stirling cycle instead of the usual Rankine cycle
02. Carnot efficiency ¹	Up to 86%	<i><69%</i>	Patented fast near-isothermal compression core technology
03. Maintenance	3x less	<i>~10% of CAPEX per year</i>	Absence of sliding/rotating seals
04. Thermal fluid	Non-toxic Non-flammable	<i>Potentially toxic leakages</i>	Using helium , which is inert and has no global warming potential

¹: Carnot efficiency describes the maximum thermal efficiency that a heat engine can achieve as permitted by the Second Law of Thermodynamics.

Disrupting state-of-the-art **Stirling engine** designs

Ideal Stirling cycle (heat pumping)



1. Isothermal compression
2. Isochoric heat release
3. Isothermal expansion
4. Isochoric heat harvesting

State-of-the-art

Inefficiencies

- Non-ideal compression and expansion: high temperature variations leading to entropic heat transfer
- Inefficient heat exchangers

High CAPEX

- Costly heat exchangers (HXs)

High maintenance cost

- Lubricant clogging of the regenerator
- Seals wear and failures

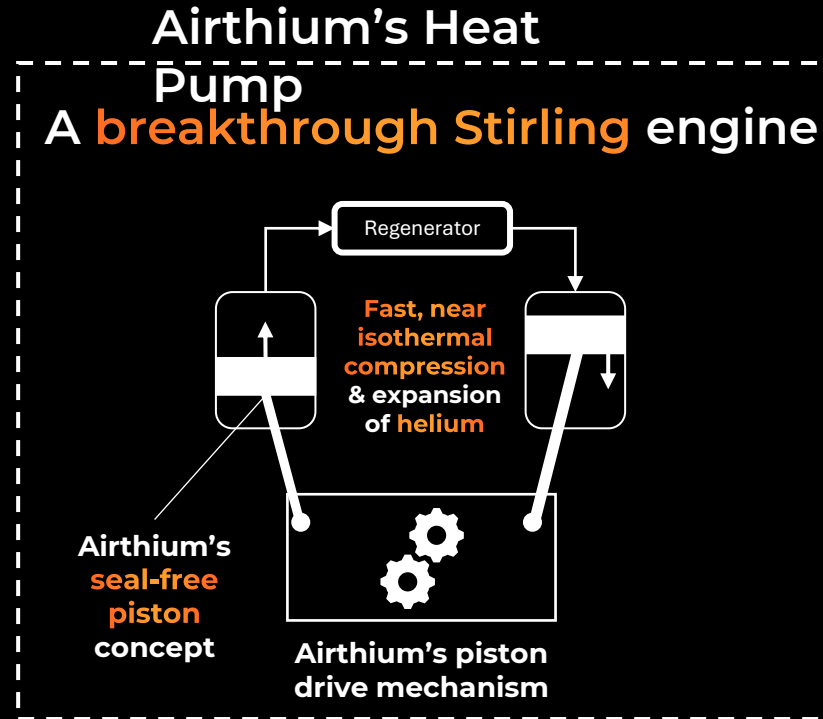
Airthium's solutions

**Fast, near-isothermal
compression &
expansion**

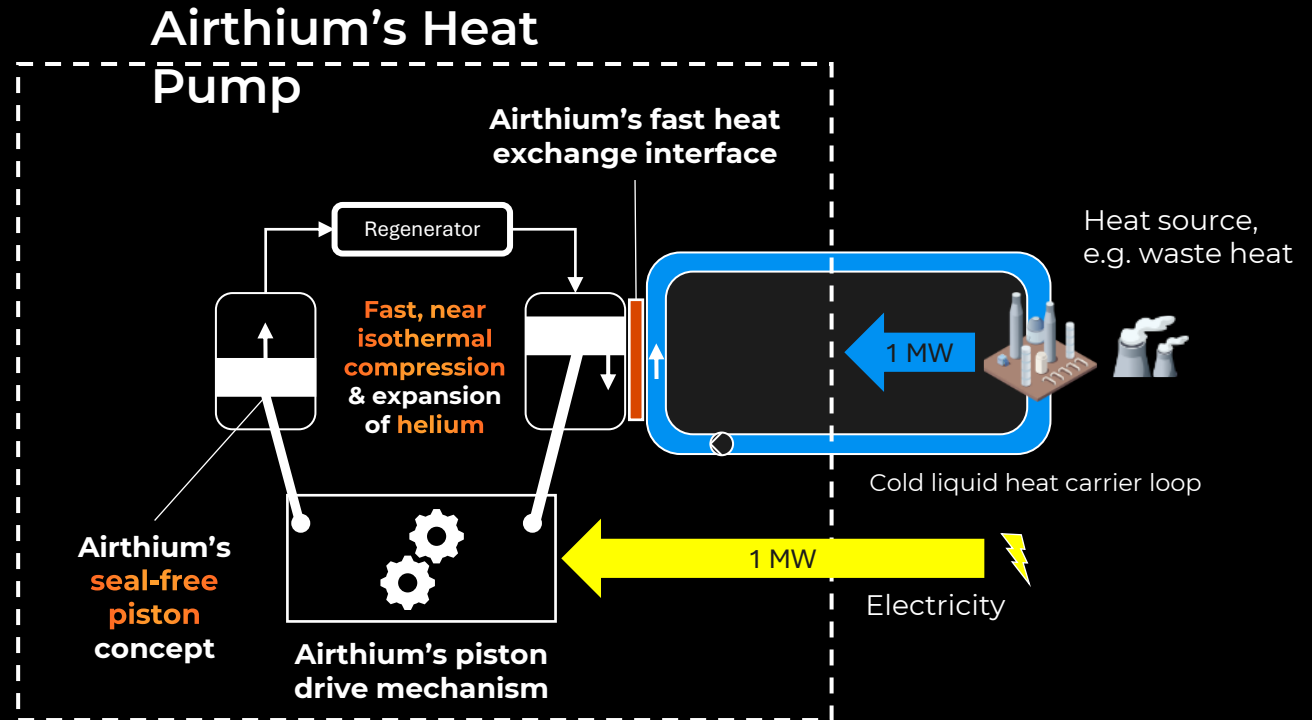
10x cheaper HXs

**Removal of sliding and
rotating seals**

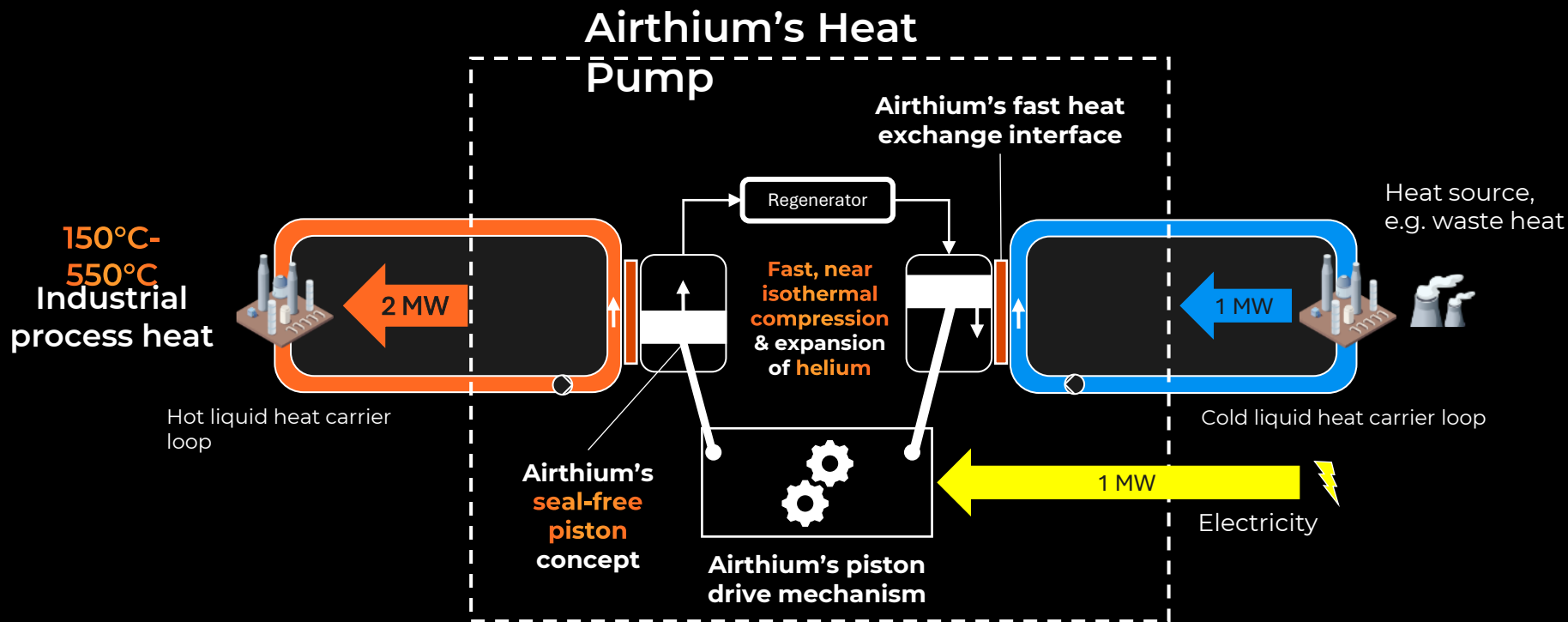
Working principle: a breakthrough Stirling heat pump



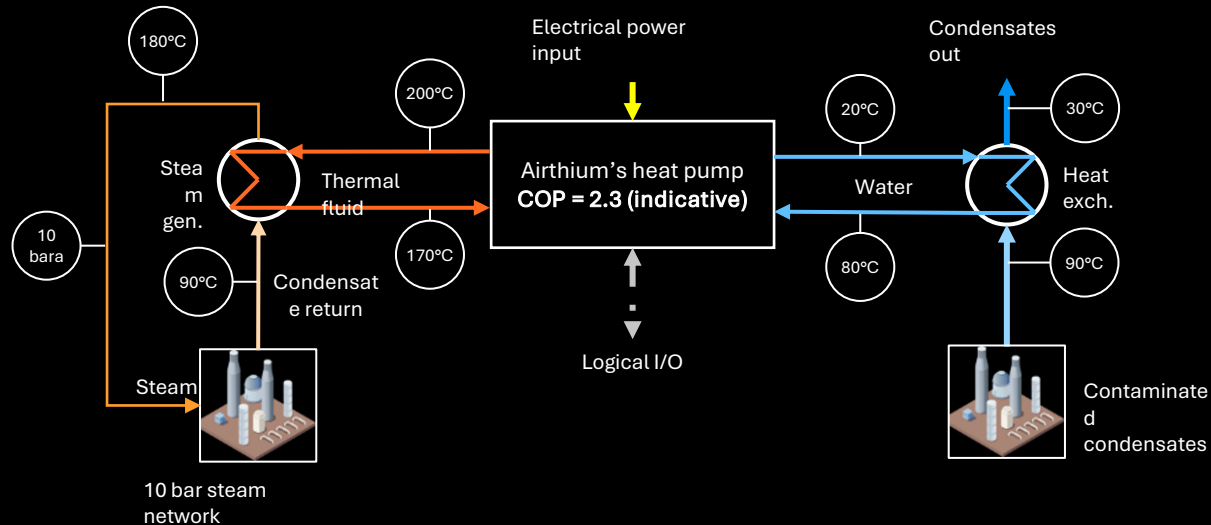
Working principle: a **breakthrough Stirling heat pump**



Working principle: a **breakthrough Stirling heat pump**

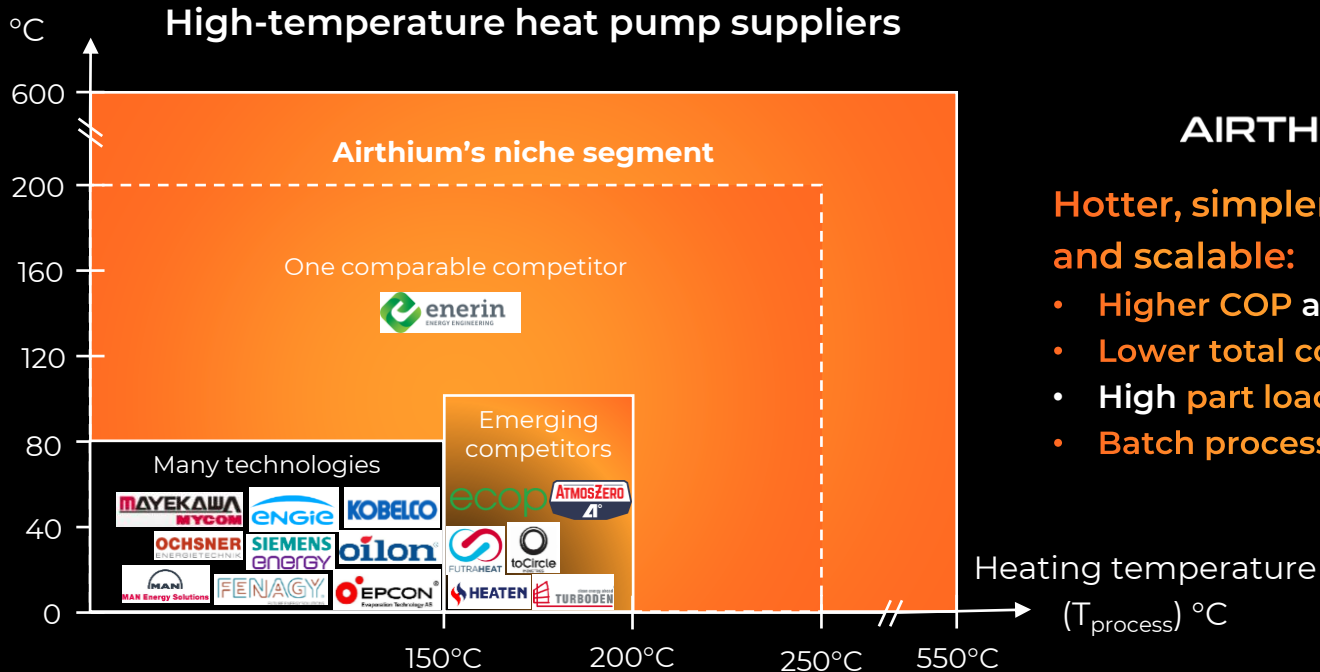


Case study: generation of 10 bar steam from condensates



A clear **competitive edge** on our niche segment

Temperature lift
($T_{\text{process}} - T_{\text{source}}$) °C



Hotter, simpler, versatile and scalable:

- **Higher COP** at same lift
- **Lower total costs, scalable**
- **High part load efficiency**
- **Batch process compatible**

A huge market showing a lot of traction

Airthium's 150 – 550°C segment:

TAM > 12 Bn € (Airthium estimate, very conservative)

CAGR (2023-2030) > 15% (McKinsey)

100 000's of

Industrial boilers

50 kW to 10 MW range



Industrial ovens

10 kW to 10 MW range



Traction

- Large pipeline with over 10 LOIs from customers in various sectors:



Food & beverage



Biotech



Energy services



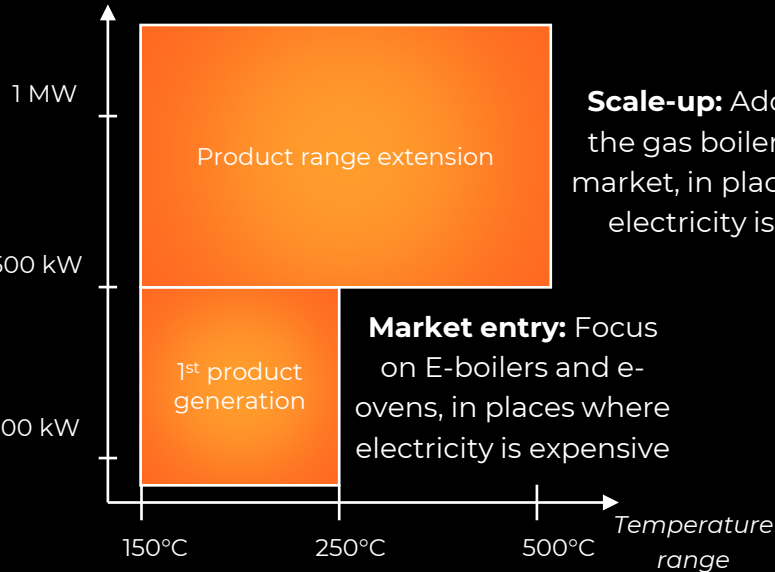
Carbon capture

- MoU with McCain Foods to install our TRL 7 pilot in their factory of Béthune (France)
- LOIs with industrial partners:
 - industrial boiler integrators
 - parts manufacturer

Low hanging fruits to enter the market, then scale

Staged go-to-market

Thermal capacity



Business model

- Heat pump manufacturer, technology provider
- Skid-mounted, containerized standard units
- Installed without floorplan changes and connected to existing heat network
- Possibly integrated into process heating equipment like ovens or furnaces (new or retrofit)
- Heat-as-a-Service to scale (possible partners identified)

With Airthium, customers **economically decarbonize** their process heat

Case study #1: Replacing the 200-kW electric oven of a German industrial bakery

Generation of 175 °C hot air for 6,300h/y



-41% in CO₂ emissions

-169 tons a year, Scope 2

-41% on the energy bill

From 183€ to 108€ per MWh_{th}

1.5 year of payback time

Case study #2: Replacing the 5 MW gas boiler of a French agrifood plant

Generation of 220 °C steam for 8,100h/y



-92% in CO₂ emissions

-8,000 tons a year, Scope 1

-15% on the energy bill

From 77€ to 55€ per MWh_{th}

4.4 years of payback time

*Both cases assume **no subsidy**.
Subsidies would significantly **reduce the payback time**.*

Assumptions: CAPEX: 500 €/kW-thermal; COP: 1.7; Electricity cost: 183 €/MWh;
CO₂ intensity of German electricity: 327 g/kWh.

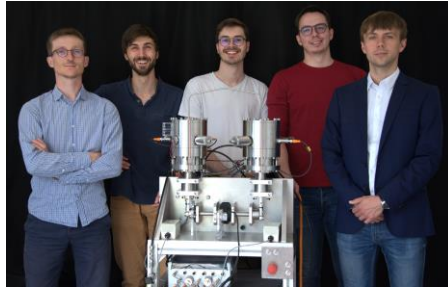
Assumptions: CAPEX: 500 €/kW-thermal; COP: 2; Gas cost: 60 €/MWh; Electricity
cost: 110 €/MWh; CO₂ cost: 80 €/t_{CO2}; CO₂ intensity of French electricity: 35 g/kWh

Achievements : from an idea to TRL 5, onwards

→ *To industry*



- Simulations and basic experiments
- Two pivots: fluid (helium) and market (heat pump)
- Funding: ~\$1m



- Full, cold heat pump prototype results
- Theoretical & numerical calculation results
- Funding: ~\$3m



- Representative (power x40), hot ($>200^{\circ}\text{C}$) prototype
- First patent pending, more being filed
- Funding: ~\$6m

Airthium has a skilled team backed by seasoned advisors



17 Team members



6 Advisors



Andrei KLOCHKO
CEO/CSO, Co-founder

Ph. D. plasma physics,
Ecole Polytechnique



Ex-Sales Director EMEA
Intelsat. Entrepreneur



Franck LAHAYE
COO, Co-founder

An expert team

Including 9 PhDs

7 Mechanical Engineers
2 Simulation Engineers
3 Business developers
1 Office manager

1 Data scientist
2 Physicists
1 CFO

Finance Advisors



PF INVEST

Co-founder
PF Invest



President
French Tech Austin

Business Advisors



Philippe
KAVAFYAN



Former CEO
Aker Offshore Wind



CEO
RioTinto Aluminium

Technical Advisors



Jonathan
HOWES



Former CTO
Isentropic Ltd.



Laurent
CARLIER

CEO
LCI Group

Project roadmap

TECHNOLOGY

COMMERCIAL

TRL 5 ✓

Representative prototype
fully qualified
Additional patents filed

TRL 6 ✓

Industrial prototype
qualified in the lab

TRL 7 ✓

Industrial prototype
demonstrated at a
customer's site

S2
2024

S1
2025

S2
2025

S1
2026

S2
2026

S1
2027

S2
2027

S1
2028

S2
2028

First contract

With a customer for the
installation of a
demonstrator

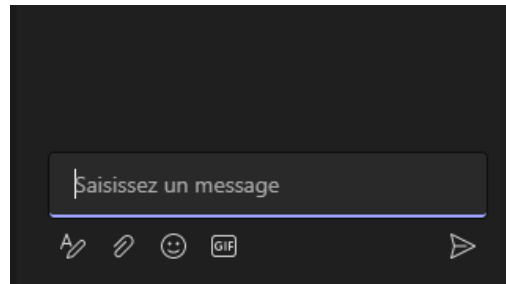
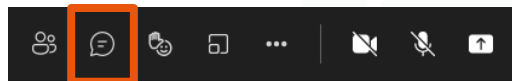
MoU for FOAK
installation

Contact



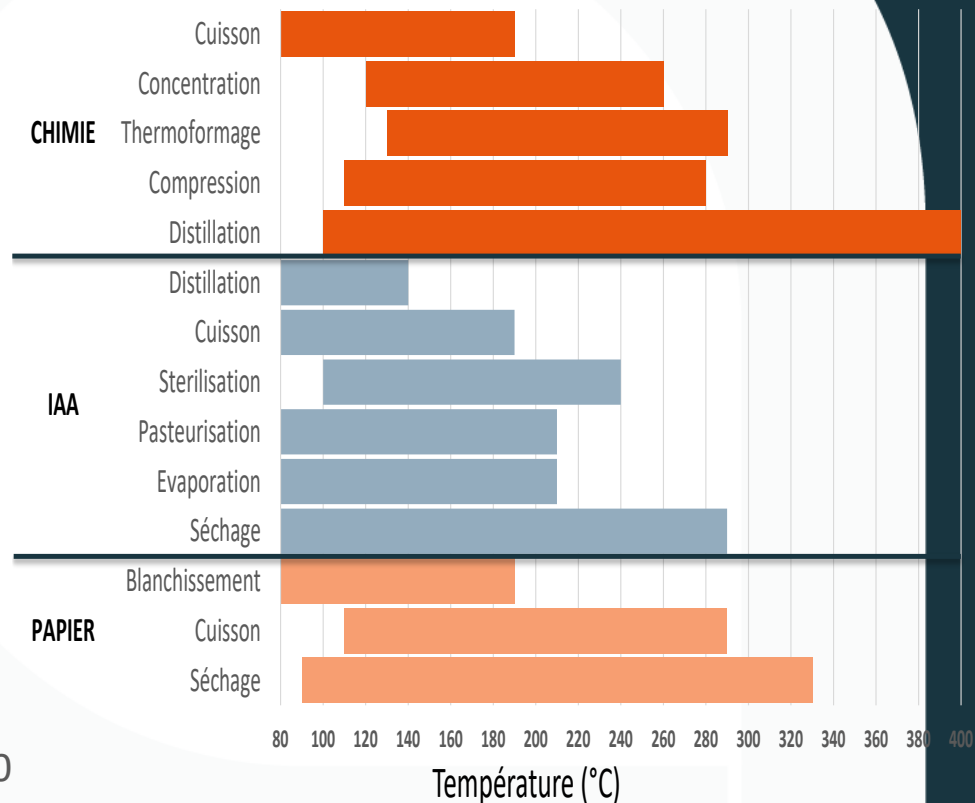
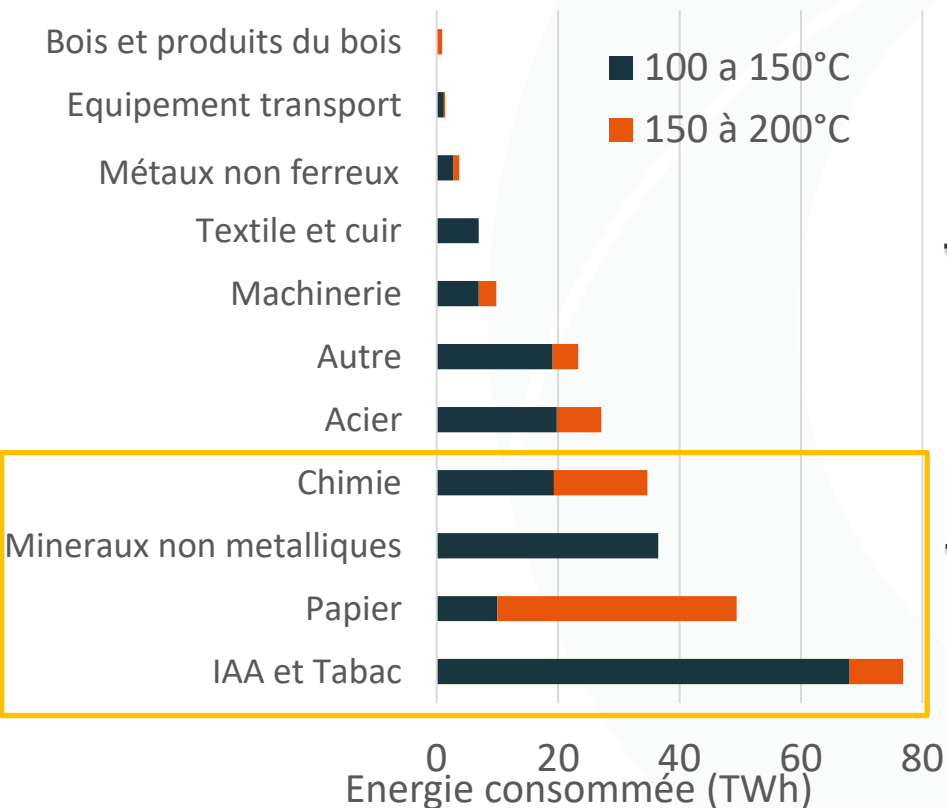
charles.lhuillier@airthium.com

Des questions ?

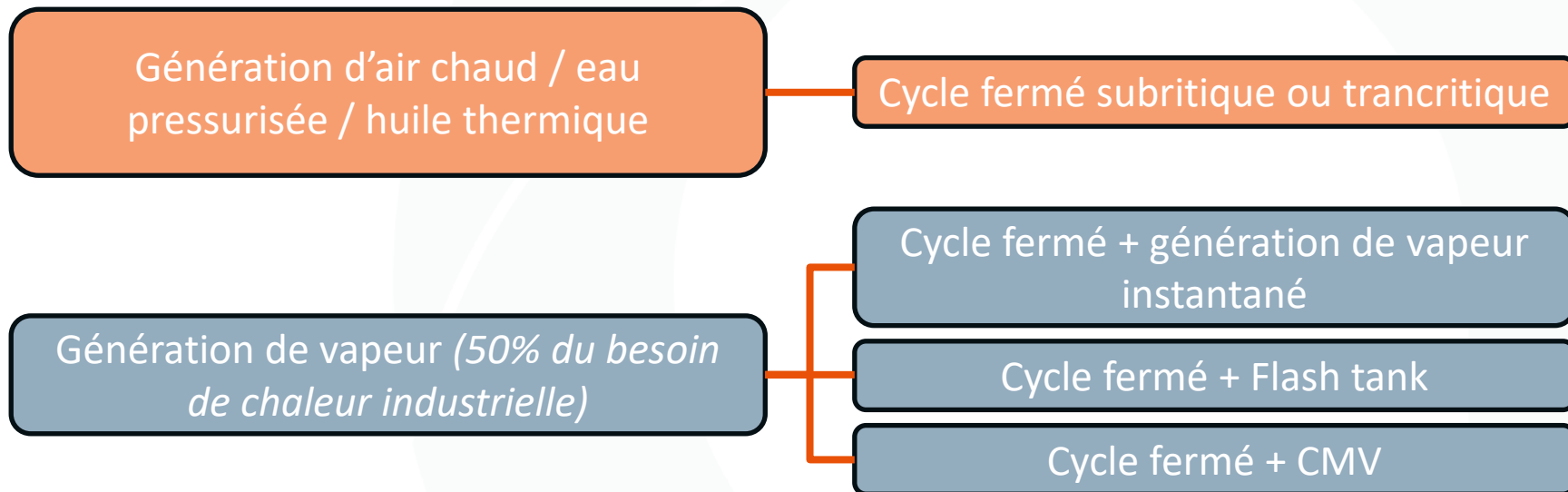


Présentation des architectures de PAC THT

Besoin de chaleur et classification des PAC THT

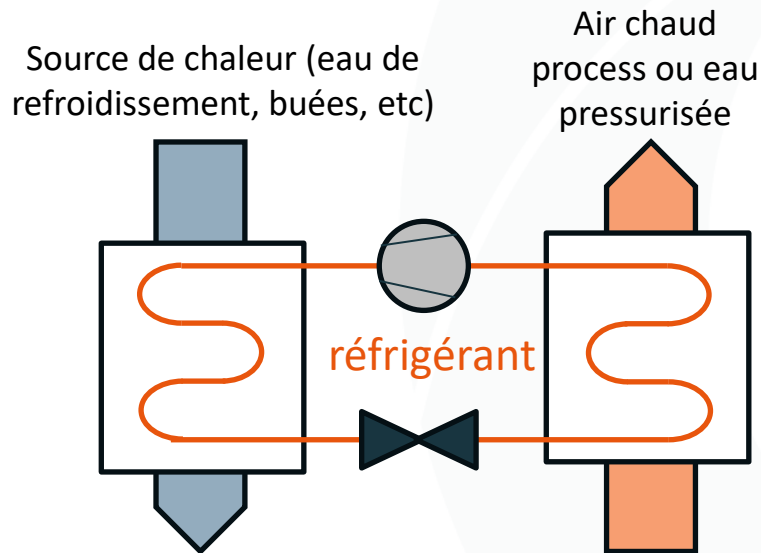


Besoin de chaleur et classification des PAC THT



Production d'air chaud boucle fermée

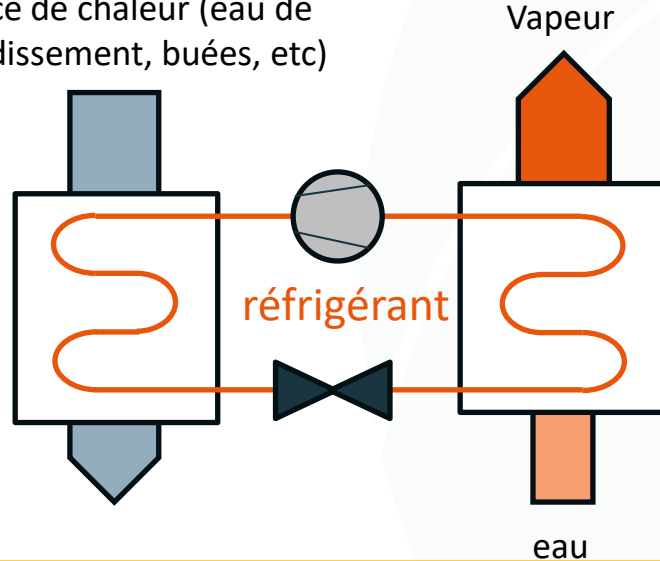
Subcritique ou transcritique



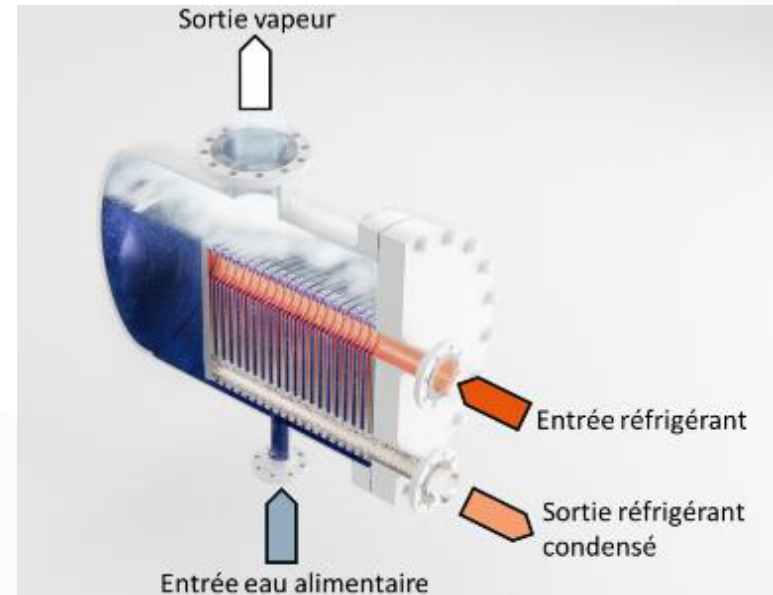
- Secteurs ciblés :
 - Séchage (Papeterie, Agroalimentaire, terre cuite)
 - Cuisson dans l'Agroalimentaire
 - Distillation
- Températures de service
 - T° max : 138°C
 - T° moy : 120°C

Production de vapeur boucle fermée + génération de vapeur instantanée

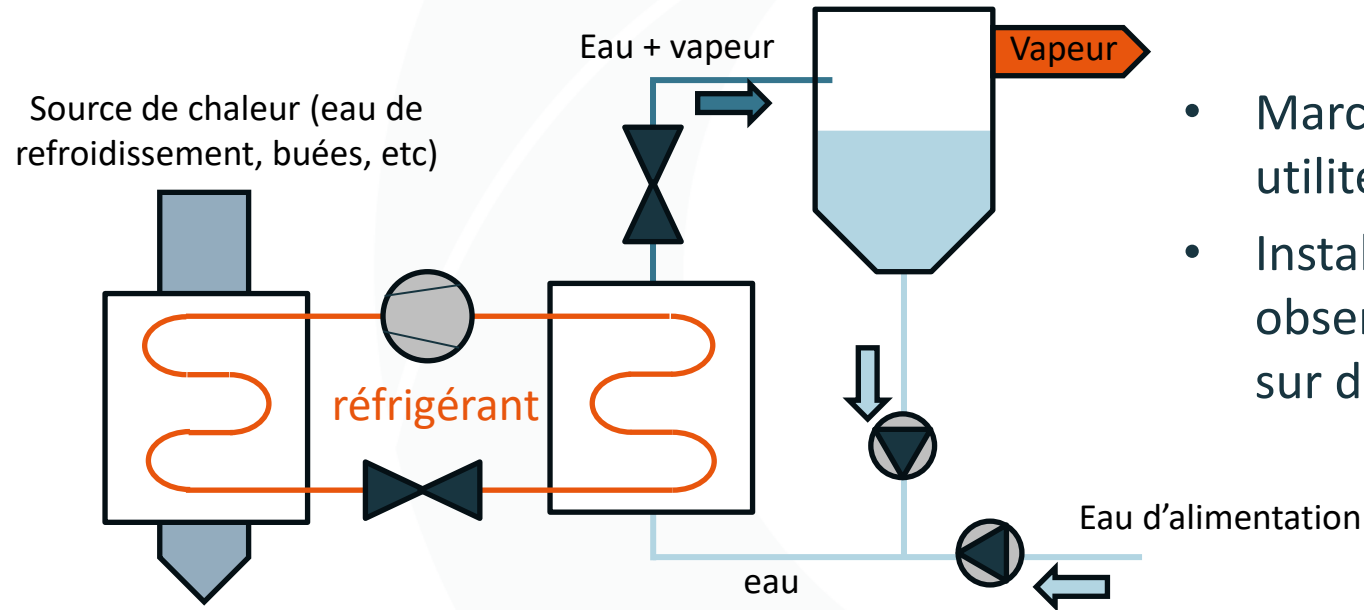
Source de chaleur (eau de refroidissement, buées, etc)



- Système de génération de vapeur majoritaire
- Générateur de vapeur plate and shell
 - 145°C en moyenne
 - P inférieur à 1MW



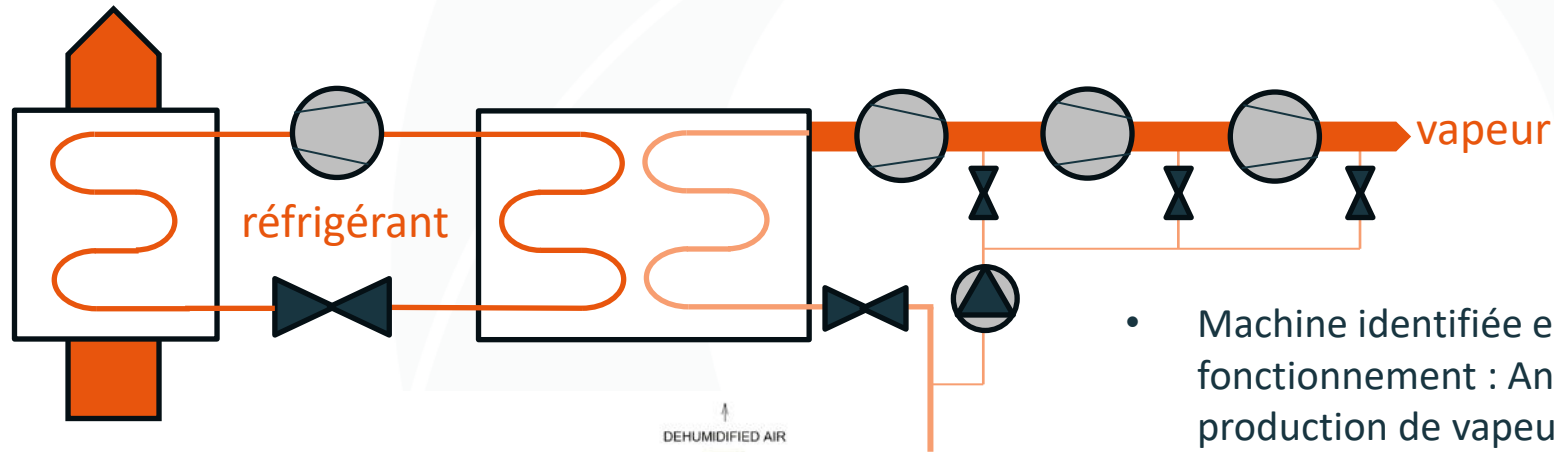
Production de vapeur boucle fermée + flashtank



- Marché cible : utilités vapeurs
- Installation observée surtout sur démonstrateur

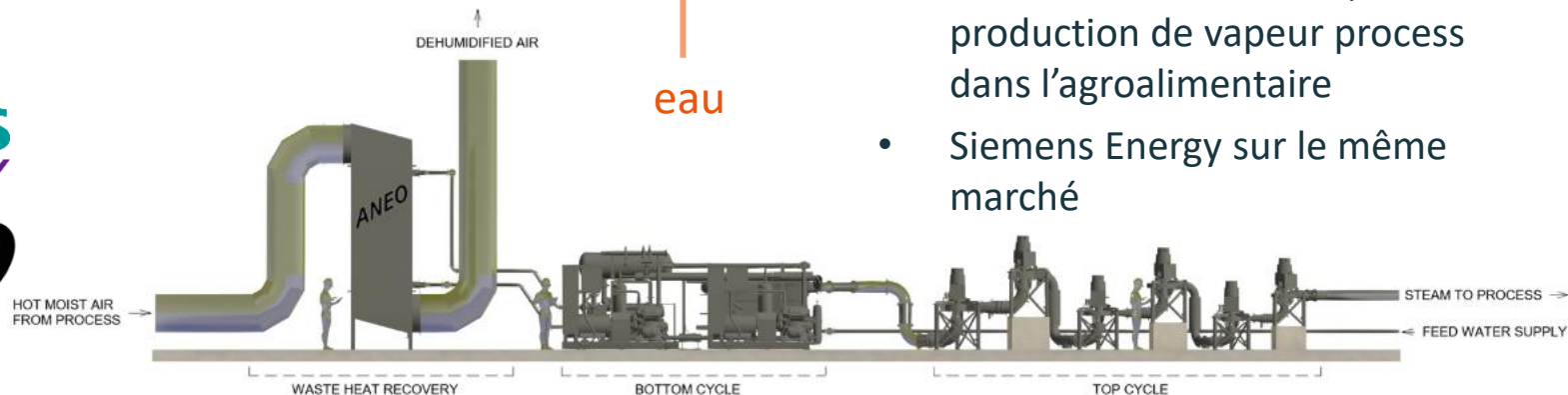
Production de vapeur cycle combiné

Cycle fermé + Recompression Mécanique de Vapeur (CMV)



- Machine identifiée en fonctionnement : Aneo, production de vapeur process dans l'agroalimentaire
- Siemens Energy sur le même marché

SIEMENS
energy
ANEO



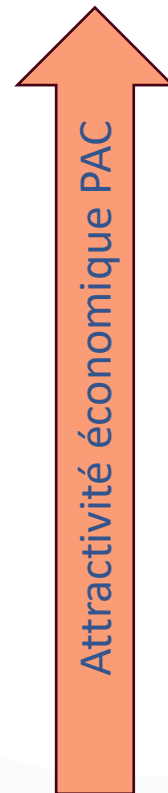
Éléments sur la rentabilité à l'échelle européenne et point sur les projets Européens

Rentabilité économique des PAC THT

- Dépend du ratio électricité électricité/gaz par pays
- Proposition d'une formule de calcul de COP minimal de rentabilité :

$$COP_{min} = \frac{\text{Prix de l'électricité}}{\text{Prix du gaz}} * \text{rendement chaudière}$$

- Hypothèse : Rendement chaudière gaz = 90%
- COP min France =(0,17/0,08)*0,9=1,97
- Attention ne prends pas en compte le CAPEX nécessaire!

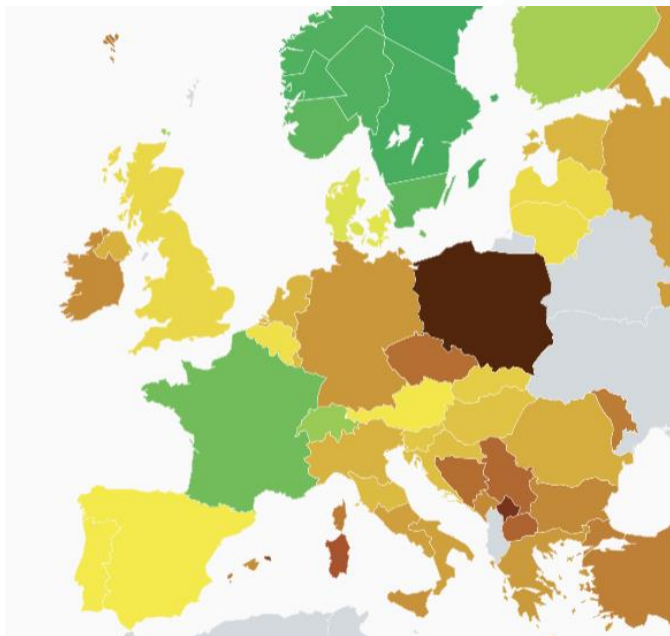


	Pays	€/kWh elec	€/kWh gaz	Ratio elec/gaz
1	Suède	0,10	0,13	0,8
2	Finlande	0,09	0,10	0,9
3	Portugal	0,09	0,06	1,5
4	Pologne	0,15	0,09	1,8
5	Slovaquie	0,18	0,10	1,9
6	Luxembourg	0,17	0,09	1,9
7	Danemark	0,11	0,06	1,9
8	Lettonie	0,12	0,06	1,9
9	Tchéquie	0,14	0,07	2,1
10	Allemagne	0,15	0,07	2,1
11	Estonie	0,12	0,06	2,2
12	France	0,17	0,08	2,2
13	Espagne	0,12	0,06	2,2
14	Slovénie	0,15	0,07	2,3
15	Lithuanie	0,13	0,05	2,3
16	Roumanie	0,13	0,05	2,4
17	Pays bas	0,16	0,07	2,5
18	Hongrie	0,20	0,08	2,5
19	Bulgarie	0,12	0,05	2,6
20	Grèce	0,14	0,05	2,6
21	Irlande	0,19	0,07	2,6
22	Italie	0,17	0,06	2,7
23	Autriche	0,17	0,06	2,8
24	Belgique	0,16	0,05	2,9
25	Croatie	0,19	0,06	3,0

Source : extraction EUROSTAT 2023 consommateurs d'énergie non résidentiel entre 500 MWh et 2 000 MWh d'électricité et entre 2 778 MWh et 27 778 MWh de gaz

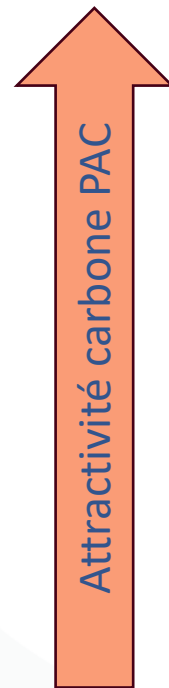
Intérêt environnemental des PAC THT

- Mix énergétique français très décarboné favorisant les électrifications



Emission électricité 2023 source : electricitymap

Emission gaz naturel Europe source : base-empreinte.ademe

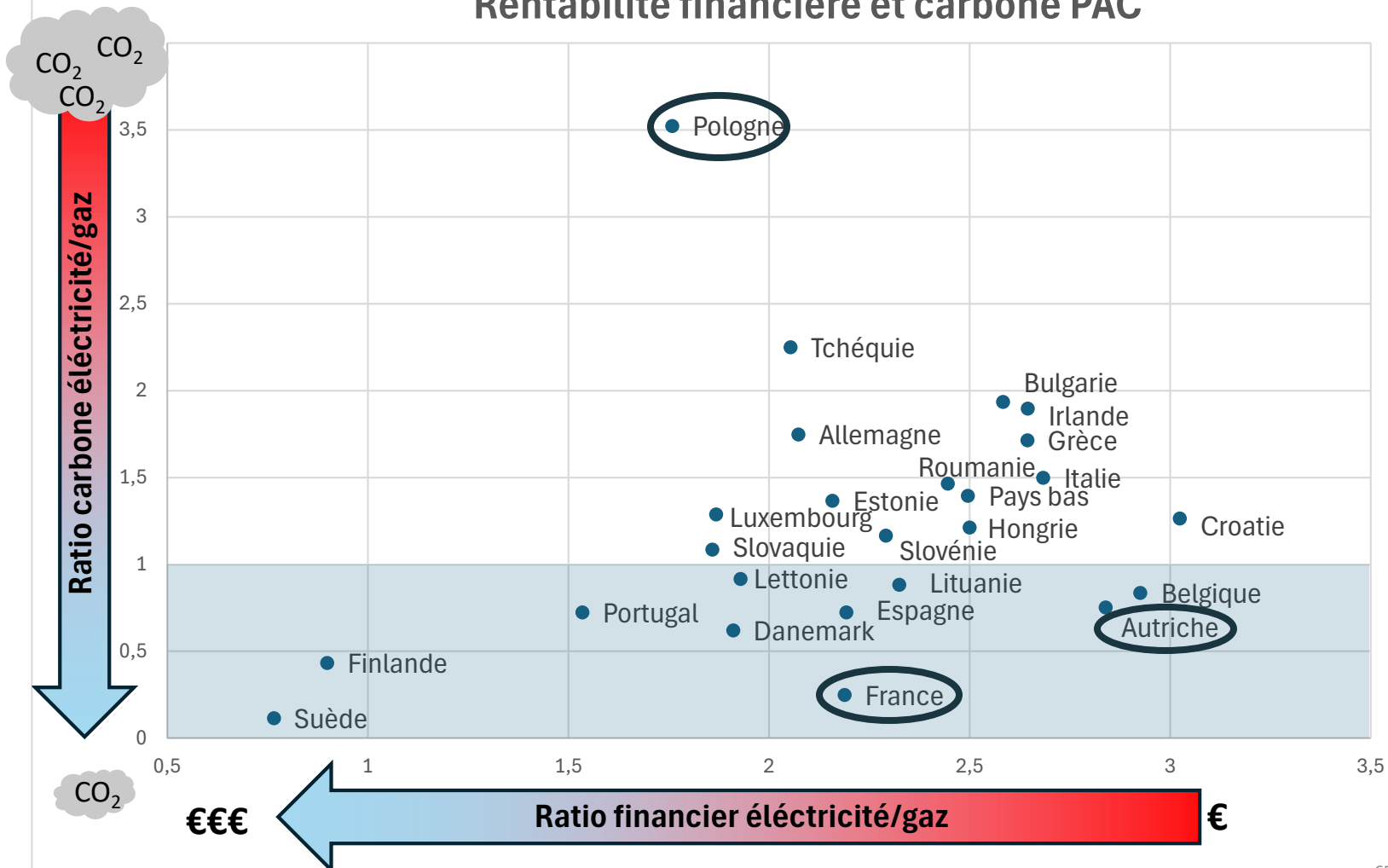


		g CO2/kWh elec	g CO2/kWh gaz	Ratio elec/gaz
1	Suède	24	213	0,1
2	France	53	213	0,2
3	Finlande	92	213	0,4
4	Danemark	132	213	0,6
5	Espagne	154	213	0,7
6	Portugal	154	213	0,7
7	Autriche	160	213	0,8
8	Belgique	178	213	0,8
9	Lituanie	188	213	0,9
10	Lettonie	195	213	0,9
11	Slovaquie	231	213	1,1
12	Slovénie	248	213	1,2
13	Hongrie	258	213	1,2
14	Croatie	269	213	1,3
15	Luxembourg	274	213	1,3
16	Estonie	291	213	1,4
17	Pays bas	297	213	1,4
18	Roumanie	312	213	1,5
19	Italie	319	213	1,5
20	Grèce	365	213	1,7
21	Allemagne	372	213	1,7
22	Irlande	404	213	1,9
23	Bulgarie	412	213	1,9
24	Tchéquie	479	213	2,2
25	Pologne	750	213	3,5

Rentabilité économique et environnementale

- La viabilité d'un projet défini par un critère économique et un critère environnemental
 - Dépend du ratio **prix** électricité/gaz
 - Dépend du ratio CO2 électricité/gaz
- En France (données 2023) :
 - électricité 2,2 fois plus chère que le gaz (14^{ème} position)
 - **mais** électricité 4 fois moins émissive que le gaz (2^{ème} position)
- Résultats variant d'une année à l'autre suivant le contexte énergétique

Rentabilité financière et carbone PAC

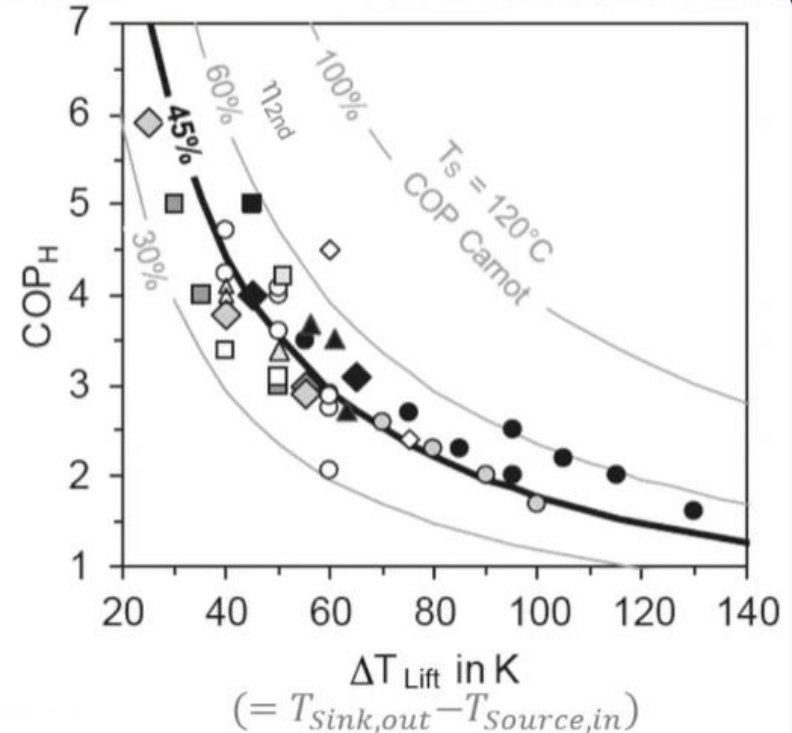


Formule généraliste des performances des PAC

Performances des PAC

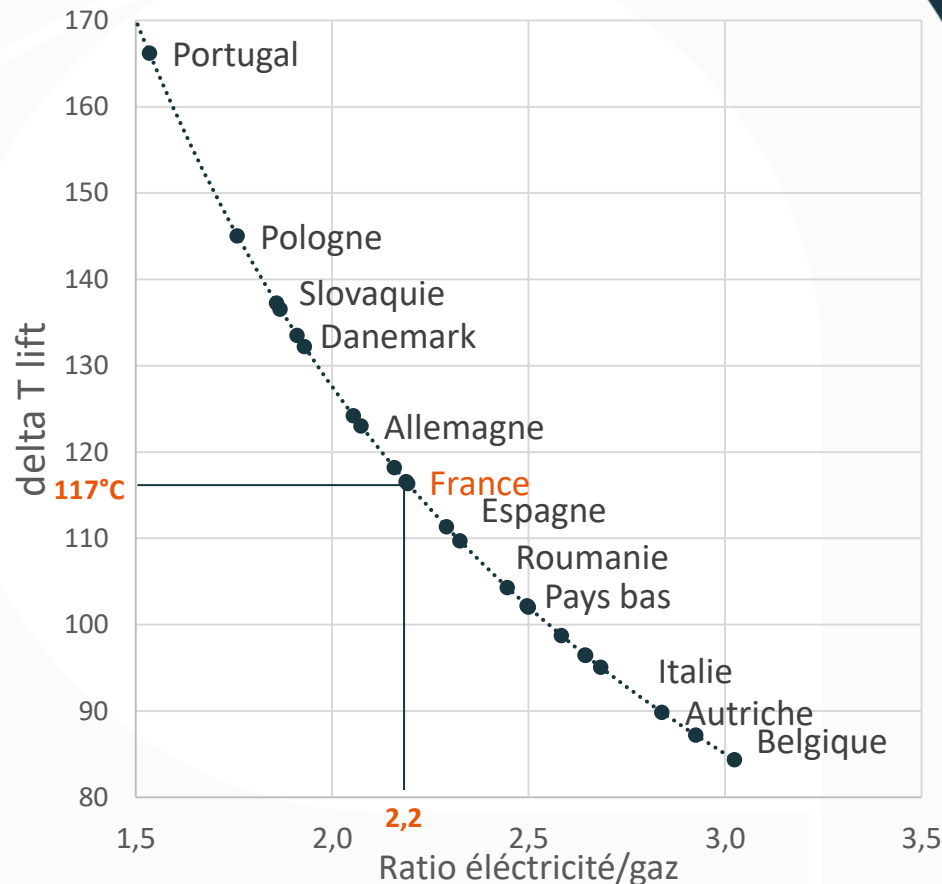
- Proposition d'une formule généraliste du COP en fonction du ΔT lift pour les PAC THT
- Carnot Moyen : 45%
- Formule généraliste pour dimensionner des projets :

$$COP = 68,455 * \Delta T_{lift}^{-0,76}$$



Seuil de rentabilité DT lift PAC THT pays par pays

- Utilisation de la formule généraliste Cop en fonction du dT lift
- Finlande et suède <170°C, hors graphique
- Exemple projet de récupération de chaleur en France :
 - Chaleur fatale à 40°C :
 - Fourniture vapeur 150°C (5bars) possible



PAC THT en fonctionnement ou en construction

- 21 pacs en projet, en construction ou en fonctionnement
 - Majorité de HFO
 - T° moy : 140°C , T_{max} : 180°C
 - P_{moy} : 1 500 kW chaud
 - **Entre 800 et 1 300 €/kW chaud installé**
- Des projets européens sources de retour d'expérience :



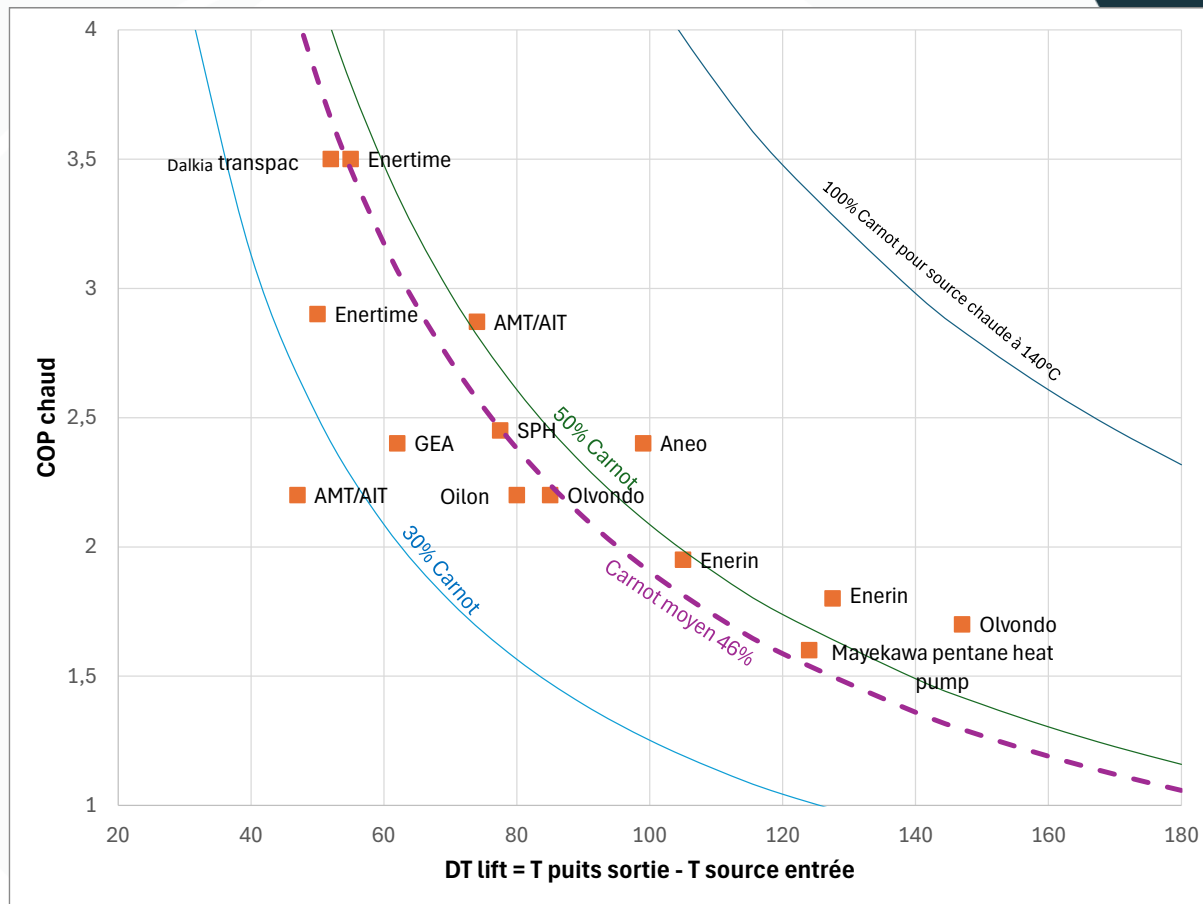
Synthèse des projets en Europe

- 8 machines dans les pays scandinaves, soit presque la moitié du parc identifié
- Secteurs industriels représentés :
 - Papier-carton : 3
 - Agroalimentaire (Petfood et Laiterie) : 8
 - Chimie/pharmaceutique : 4



COP en fonction du ΔT lift par rapport au rendement de Carnot

- Synthèses des machines en fonctionnement et en projet communiquant le COP
- Points de vigilance :
 - Graphique illustratif
 - COP déclaratifs
 - Carnot pour T source chaude = 140°C

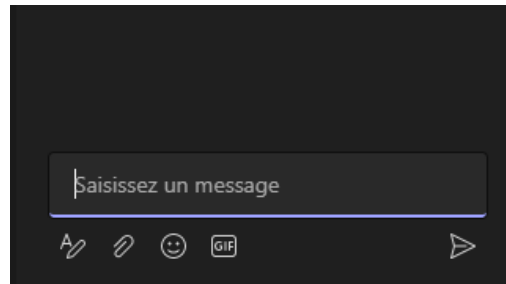
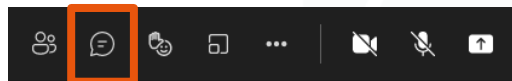


Conclusion

Conclusion

- De nombreuses évolutions par rapport à l'étude de 2021
- Une émergence de multiples acteurs
 - des produits différenciés couvrant des secteurs différents
 - des technologies variées
- Températures de service de plus en plus en plus hautes
- Un contexte européen favorisant les implantations par rapport au rapport gaz/élec avantageuses (pays scandinaves)
- Des investissements lourds portés par des projets européens
 - des compléments de chaleur mais peu de remplacement
 - aides au CAPEX mais pas à l'OPEX

Des questions ?



Merci pour votre attention !

Prochains rendez-vous ALLICE :

Rencontre
partenaire



5 décembre

Energy Class Factory
(Lyon)

Webinaire
adhérents

12 décembre

Freins et leviers du
déploiement des PAC dans
l'industrie

Webinaire
adhérents

17 décembre

Disponibilité future de
l'hydrogène

Webinaire
adhérents

16 janvier

Intégrations
technologiques de PAC
pour l'industrie

Webinaire
adhérents

6 février

Traitement de fumées

Réunion des
adhérents
ALLICE

25 mars

Visite site TERREAL
(Chagny)

Rencontre
partenaire



3 avril

Forum national des
co-entreprises du
PEXE (Paris)

Rencontre
partenaire

3 avril

Visite du LRGP
(Nancy)

Réunion des
adhérents
ALLICE

12 juin

Club PRIME
Réunion plénière