

TRAITEMENT DE FUMÉES COMME VECTEUR DE RÉCUPÉRATION DE CHALEUR INDUSTRIELLE

Webinaire de restitution d'étude
06/02/25



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 (Clémence) en cas de souci technique



Bon visionnage !

Sommaire

- Contexte de l'étude et réglementaire – *CETIAT*
- Grandes familles d'effluents et technologies associées – *CETIAT*
- Retour sur un projet de récupération de chaleur APH et traitement avec SCR dans une raffinerie de pétrole – *Axens*
- Les technologies de dépollutions avec récupération de chaleur – *CETIAT*
- Retour sur un projet de récupération de chaleur et traitement par solution sèche sur un incinérateur de déchets en Suisse - *Solvay*
- Les technologies à TRL >6 : Freins et besoins - *CETIAT*
- Retour sur un projet de laveur-condenseur de fumées de combustion biomasse – *IDEX*
- Recommandations et conclusions – *CETIAT*



L'houcine Bamghar
CETIAT



Benjamin Bruyere
CETIAT



Nicolas Lambert
Axens



Seung-Min Song
Solvay



Damien Levoy
IDEX



I. CONTEXTE

*Périmètre et objectif de l'étude,
réglementations, familles d'effluents et
technologies associées*

I. Contexte

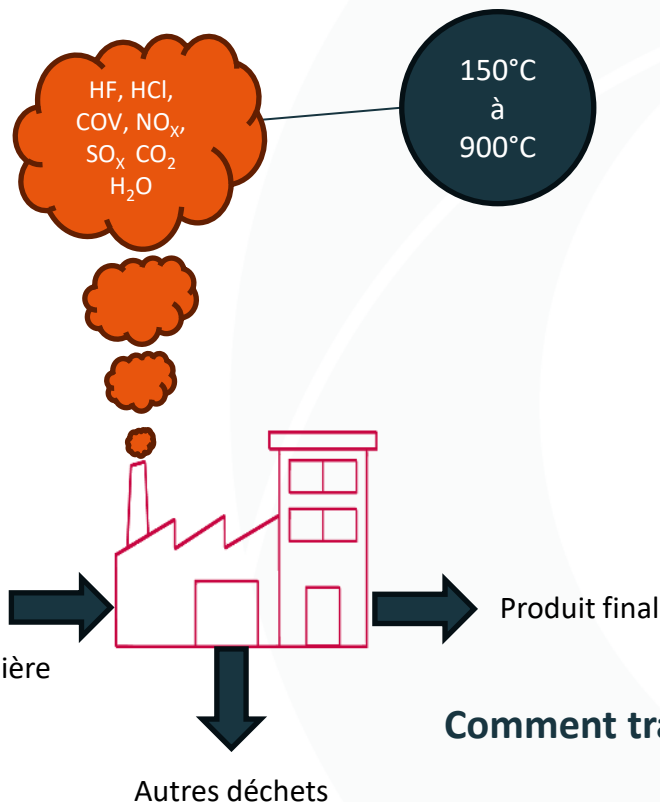
-  **OBJECTIF** - Réaliser un état de l'art des technologies de traitement des fumées permettant de valoriser la chaleur fatale



PHASES DE L'ETUDE

1. Enjeux et contexte de la récupération de chaleur sur effluents gazeux
2. Benchmark des solutions de traitement des fumées permettant la valorisation de chaleur fatale
3. Retours d'expériences d'industriels ayant implantés une solution de dépollution avec récupération

I. Contexte



Industrie :

- Émission de polluants
- Rejet d'énergie thermique (chaleur)

Objectifs :

1. Réduire les émissions de polluants dans l'environnement
2. Récupérer l'énergie perdue

Comment traiter les fumées industrielles pour mieux récupérer l'énergie perdue ?

Gisement : 99,6 TWh/an de chaleur fatale disponible (ADEME 2022)

I. Contexte

- **Contexte réglementaire :**

- Code de l'environnement
- Arrêté du 2 février 1998 relatif aux émissions de polluants atmosphériques (ICPE) mis à jour par l'arrêté du 28 février 2022
- La directive IED (Industrial Emissions Directive) 2010/75/UE
- Plan de Protection de l'Atmosphère (PPA)
- Le plan national d'allocations des quotas de CO2 (PNAQ) pour les émissions de CO2

- **Les sites concernés :**

- 600 000 industriels classés ICPE
- 1 500 sites PNAQ

I. Contexte

synthèse des polluants et des seuils d'émissions admissible en France

Polluants	Flux massique total	Concentration maximale admissible (mg.m ⁻³ , sauf spécifié)	Observations
Poussières	≤ 1kg.h ⁻¹	100	
	> 1kg.h ⁻¹	40	
Cadmium, mercure, thallium	> 1 g.h ⁻¹	0,2	Concentration totale (Cd + Hd + Tl)
Arsenic, sélénium, tellure antimoine	> 5g.h ⁻¹	1	Concentration totale (As + Se + Te)
Chrome, cobalt, cuivre, étain, manganèse, nickel, plomb, vanadium, zinc	> 25g.h ⁻¹	5	Concentration totale (Sb + Cr + Co + Sn + Mn + Ni + Pb + V + Zn)
Oxyde de soufre (SO _x)	> 25kg.h ⁻¹	300	Exprimé en SO ₂
Oxyde d'azote (sauf N ₂ O)	> 25kg.h ⁻¹	500	Exprimé en N ₂ O
Protoxyde d'azote (N ₂ O)			Valeurs limites précisées par arrêté préfectoral
Monoxyde de carbone			Valeurs limites précisées par arrêté préfectoral
Acide chlorhydrique (HCl)	> 1kg.h ⁻¹	50	HCl et autres composés inorganiques gazeux du chlore (exprimé en HCl)
Fluor (HF)	> 0,5kg.h ⁻¹	5	Séparément pour les gaz et aérosols
	> 0,5kg.h ⁻¹	10	Pour la fabrication d'acide phosphorique et de composés phosphorés
Composés organiques volatils non méthaniques (COV _{NM})	> 2kg.h ⁻¹	110	Utilisation d'une oxydation thermique
		20	Rendement < 98%
	> 2kg.h ⁻¹	50	Rendement > 98%
Mélange de COV _{NM}	> 0,1kg.h ⁻¹	20	Composés ou ensemble de composés listés en annexe III de l'arrêté du 2 février 1998
		110	Ensemble de composés
Odeurs			Débit d'odeurs précisé par arrêté préfectoral
Ammoniac	> 0,1kg.h ⁻¹	50	
Composés toxiques selon le code des déchets R45, R46, R49, R60, R61	> 2g.h ⁻¹	2	
Composés halogénés Dioxines et furannes	> 100 g.h ⁻¹	20 0,1 ng (TEQ N.m ⁻³)	

I. Contexte

Les familles d'effluents et les technologies associées

	← Traitement des poussières →					← Traitement des gaz →		← Traitement COV →	
	Cyclone Gravitaire	Filtre à manches	Médium filtrant	Electro-filtre	Laveurs	Injection neutralisant	Filtres actifs charb/calcaire	Oxydateur thermiques	Bio-filtres
COV									
Gaz acide									
Gaz combustion									
Poussières grossières									
Poussières fines									



RETOUR D'EXPÉRIENCE — RAFFINERIE DE PÉTROLE

Nicolas Lambert (Axens)

Webinaire ALLICE: Le traitement des fumées comme vecteur de récupération de chaleur industrielle

Rex #1: Combined APH + SCR DeNOx application

« One-stop shop » approach with European Refinery

Nicolas LAMBERT 

Axens
Powering integrated solutions

A Team of Experts: Flowvision A/S

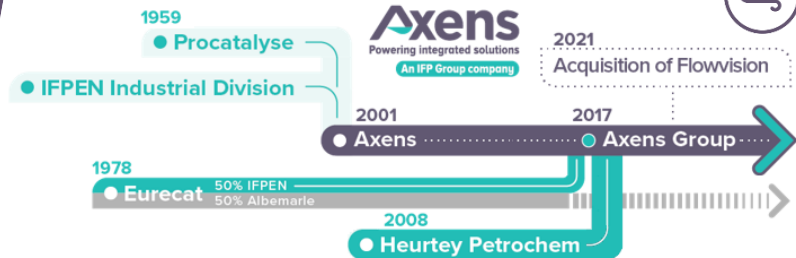
Subsidiary of IFPEN, Axens Group provides a complete range of solutions for the conversion of oil and biomass to cleaner fuels, the production and purification of major petrochemical intermediates, the chemical recycling of plastics, all natural gas treatment and conversion options, water treatment, as well as carbon capture & storage solutions.

Flowvision A/S (DK) was acquired in April 2021 to become the spearhead for Air Treatment activities:

- DeNOx, DeSOx and flue gas treatment specialists
- Multi-pollutant technologies: HCN, CO, VOCs, SOx, PMs, Acids...
- Markets addressed: Power, Refining/Petchem, Cement, WI...

⇒ www.axens.net

⇒ www.flowvision-energy.com



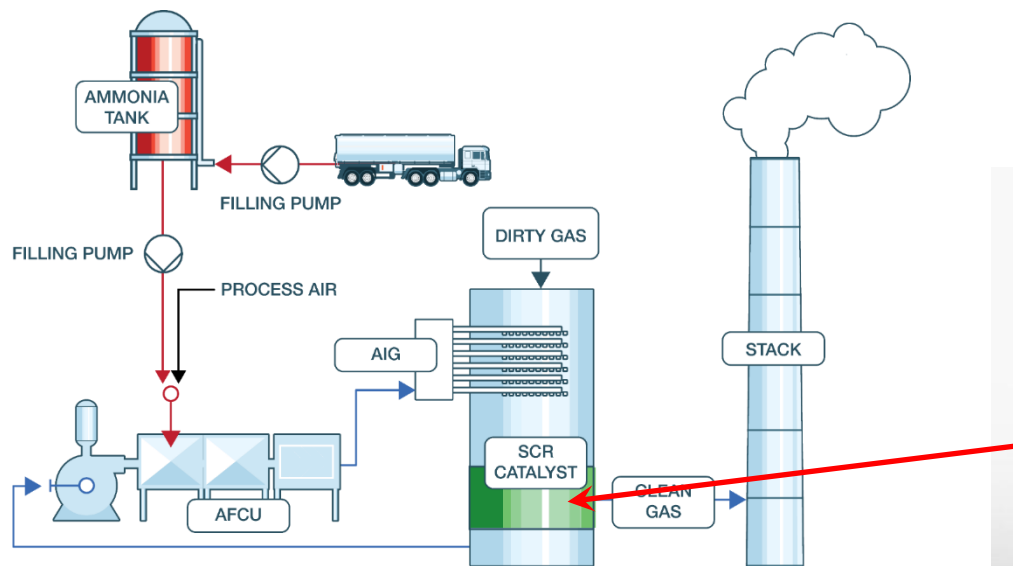
Amager Ressource Center, WtE plant. DeNOx supplied by Flowvision

Concept

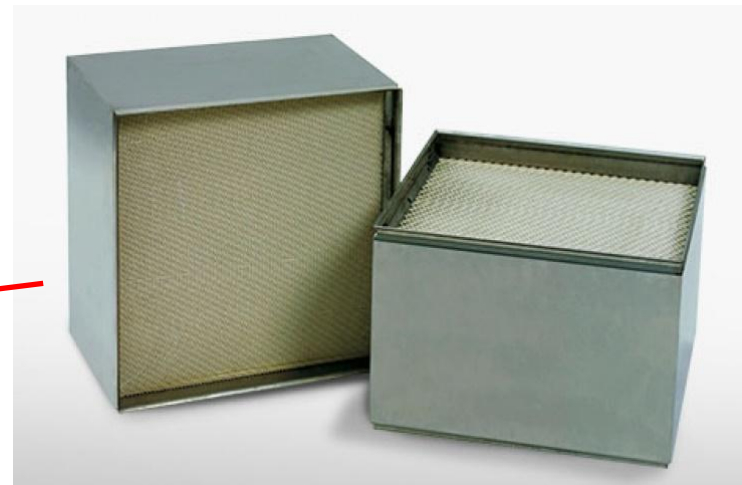
- Environmental targets will define an optimal temperature range for SCR (Selective Catalytic reduction) DeNOx within the typical operating window (~180-425°C).
- Historically, energy wasn't recovered below a certain threshold due to technical (e.g., corrosion under acidic dew point - ADP) or economic reasons (cheap energy, no incentive).
- APH (Air Preheaters) can be sectioned to:
 - ▶ meet SCR catalyst conditions;
 - ▶ improve energy recovery (reducing flue gas temperature to ~50-80°C), aiding carbon footprint reduction.



SCR DeNOx systems: Flowvision's core business



AIG = Ammonia Injection Grid
AFCU = Ammonia Flow Control Unit

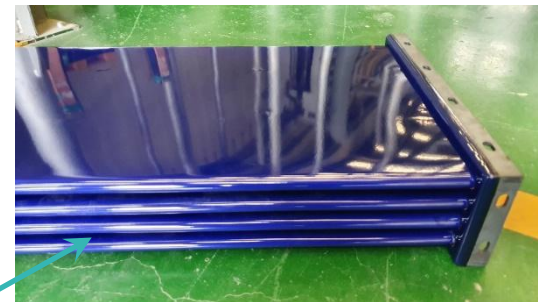


Source: Umicore.com



APH innovations

- Clear channel technology for enhanced heat transfer without plugging



- Enamel (glass) coating on plates or tubes to withstand corrosion (T. op. Max ~250°C with PTFE bushings / 400°C without)



- Plastic material in case of presence of HF (T. op. Max ~260-270°C)



Case Study: European Refinery (IT)

■ Context:

- ▶ Steam Methane Reformers (SMR) project
- ▶ 2 parallel trains, common ammonia management for SCR DeNOx

■ Objectives:

- ▶ NOx abatement to meet EU standards
- ▶ Energy conservation

■ Organization:

- ▶ Project handled by Flowvision for Axens Group
- ▶ « One-stop shop » approach proposed to customer (in addition to separate supplies for APH and SCR DeNOx) ⇒ **Option retained by EPC vs competitors**

Case Study: European Refinery (IT)

- Targets & orders of magnitude:
 - ▶ Flue gas: 51 t/h (wet) with 100 mg/Nm³ NO_x (3% O₂, dry)
 - ▶ « Clean » flue gas: no condensation of corrosive components

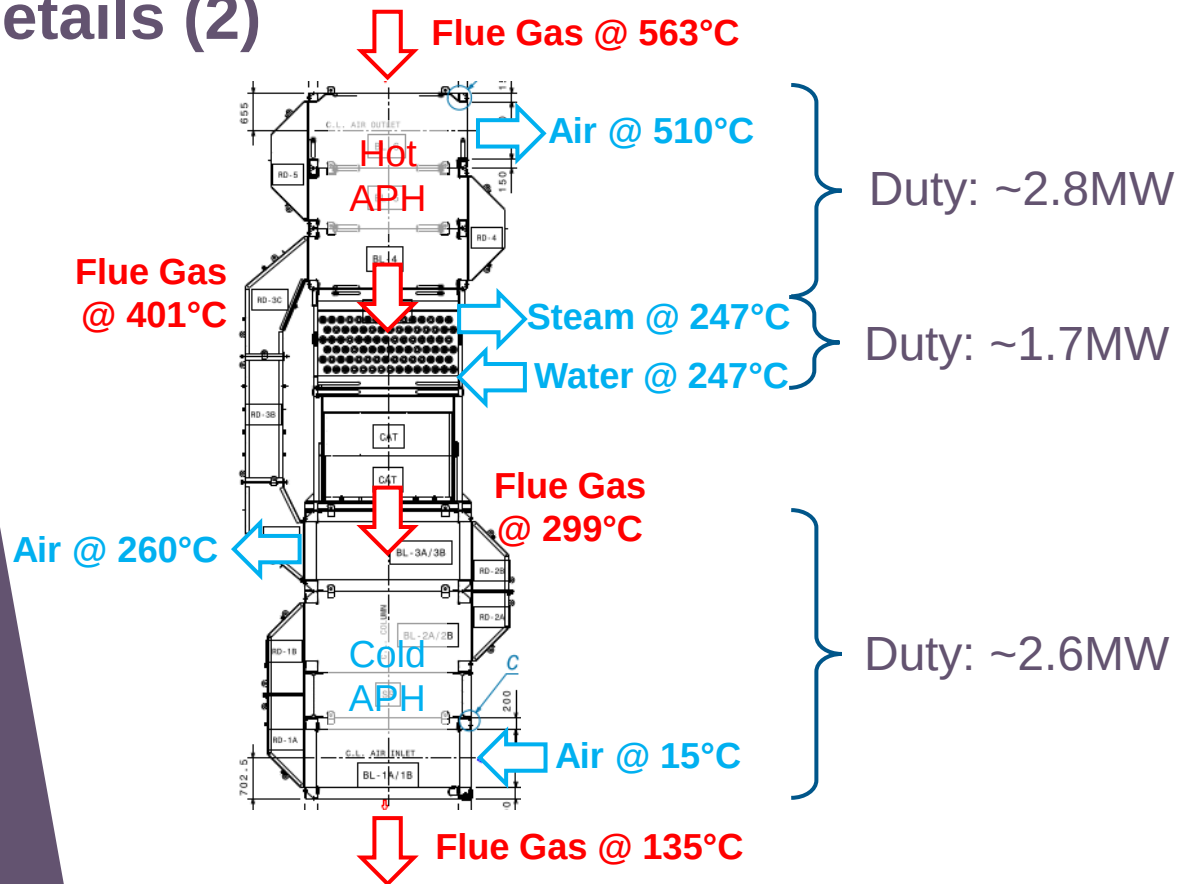
- ▶ Environmental specifications:
 - › 8 mg/Nm³ NO_x guaranteed (ammonia slip < 5 mg/Nm³)
 - › 4 years catalyst life guaranteed

- ▶ Energy preservation:
 - › 45 mmWC pressure drop through catalyst guaranteed
 - › Moderate energy recovery to limit CAPEX and plot space requirements
 - ⇒ Clean flue gas delivered « cold » at 135°C ⇒ **remaining potential !**

- < 10 months for delivery



Details (2)



Key figures:

- 58 t/h M/HPS generated
- FG/NG consumption spared:
 - 2 to 5 MEUR/yr
 - > 12ktCO₂eq/yr
- ROI:
 - < 1 yr
 - Cold APH (< 50% of total price)
« paying » the SCR & Hot sections

Project Pictures (1)

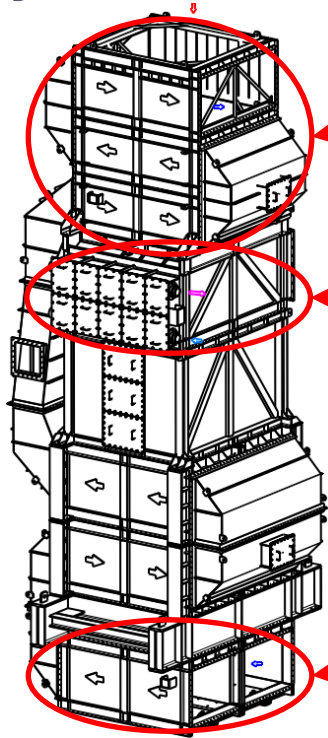


Ammonia Flow Control Unit



DeNOx catalyst
(1 module out of 60)

Project Pictures (2)



Hot APH
3 passes
Corten-A / Corten-A / SS304L



Boiler
SA-106 Gr. B



Cold APH
3 passes (Pass 1 shown)
DC-01

Project status

- Design complete
- APH manufactured
- Catalyst not produced (can be delivered under 6 months; action postponed to avoid damages due to improper storage)
- Skids manufactured
- All equipments on hold for delivery
- Plant mechanical completion expected around Y2025 end
- Start-up early 2026

Conclusion: Advantages of proposed approach

- Single source of supply, therefore less interface management by EPC / Customer (gain on manhours estimated by EPC at about 10%)
- Total height, weight and plot are optimized by combining systems, avoiding additional swages, tapering ducts and dead areas.
- Optimizing catalyst conditions maximizes performance and cycle length, reducing required volume and associated costs.
- Reduction of fuel consumed, thus reduction of carbon footprint & OPEX.

To go further: Application to Carbon Capture systems

- All technologies (amine/solvent, cryogenic, membrane) will require further abatement of pollutants and cooling to various degrees
- One solution does NOT fit all and constraints are to be accounted for
 - ▶ delivery of flue gas at low T $\Rightarrow$ constraint on SCR performance
 - ▶ co-pollutants $\Rightarrow$ additional treatments, ABS formation...
 - ▶ existing configuration $\Rightarrow$ redundancy, absence of usage of low-level energy...
 - ▶ customers' preferences
 - ▶ etc.
- Yet, « Plug 'n' Play » approach with combined equipment can remain valid where deep retrofits are not envisaged

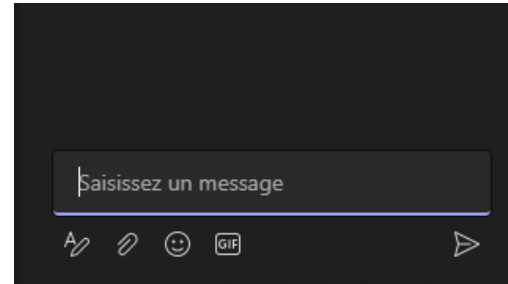
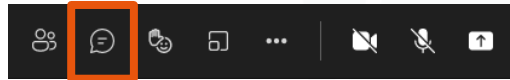


www.axens.net

Thank
you!

www.axens.net/markets/industrial-air-treatment

Des questions ?





II. LES TECHNOLOGIES DE DÉPOLLUTIONS AVEC RÉCUPÉRATION DE CHALEUR

II. Les technologies de dépollution avec récupération de chaleur

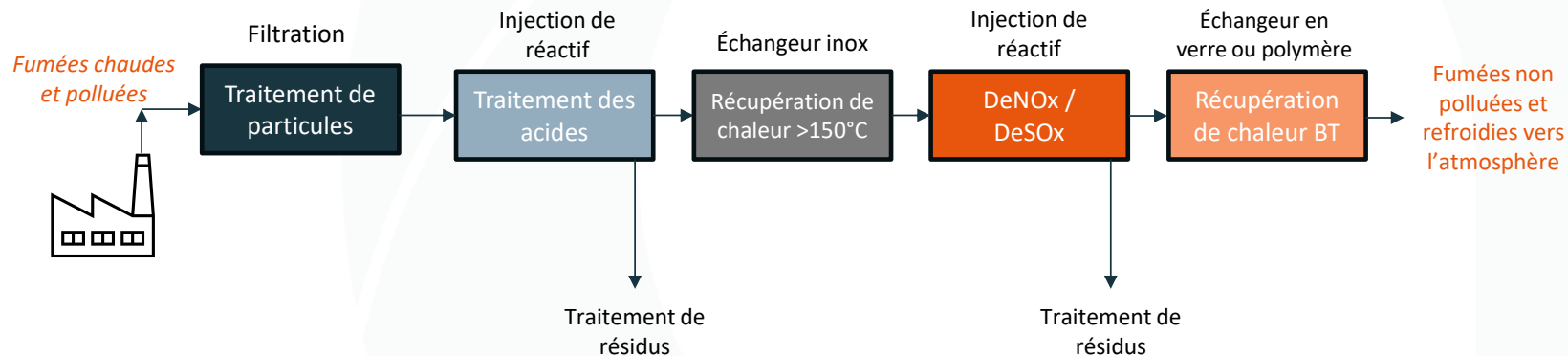
Entreprises consultées :

Entreprise	Commentaires
<i>Axens</i>	Traitement de fumées industrielles avec récupération de chaleur
<i>Terraos</i>	Traitement par lavage
<i>LAB</i>	Traitement des fumées solutions sèches et humides
<i>Terreal</i>	Utilisateur d'un système de traitement de fumée avec récupération de chaleur
<i>ALKEMI</i>	Solution de traitement des fumées pour incinérateurs
<i>TRIANON</i>	Fabricant d'échangeur thermique
<i>Solvair (SOLVAY)</i>	Fabricant de produit de traitement (bicarbonate de sodium)
<i>FIVES groupe</i>	Fabricant de machine et équipement de procédé industriel

Total des entreprises consultées : 8

Nombre de REX : 3

II. Les technologies de dépollution avec récupération de chaleur

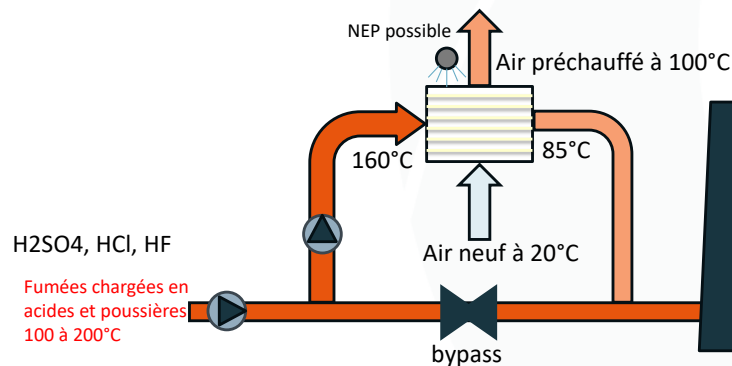


Plusieurs étapes sont parfois nécessaires pour traiter les fumées et récupérer l'énergie qu'elles contiennent

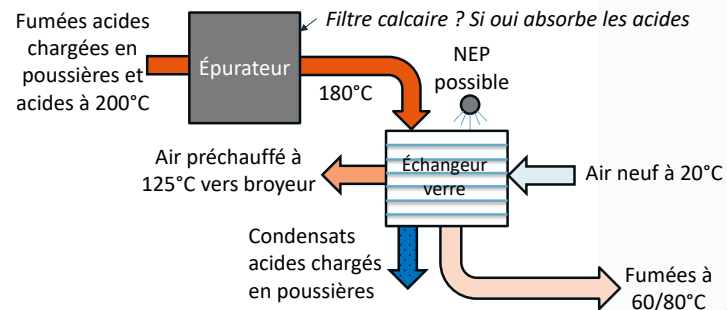
II. Les technologies de dépollution avec récupération de chaleur

Marchés cibles : verreries, biomasse, terre cuite chaudières fioul

Échangeur polymère sans dépollution



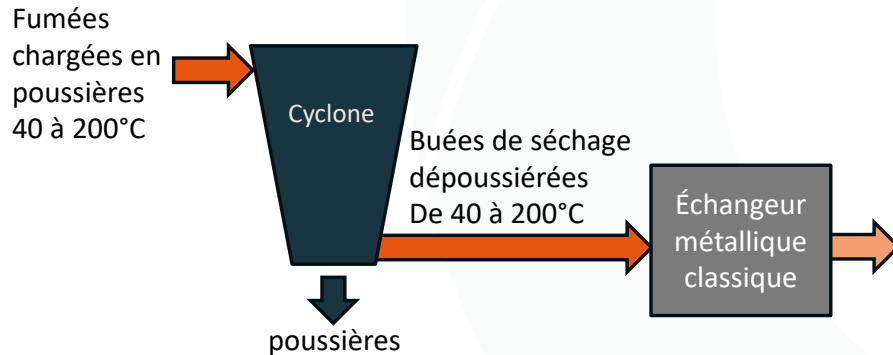
Dépollution + échangeur verre



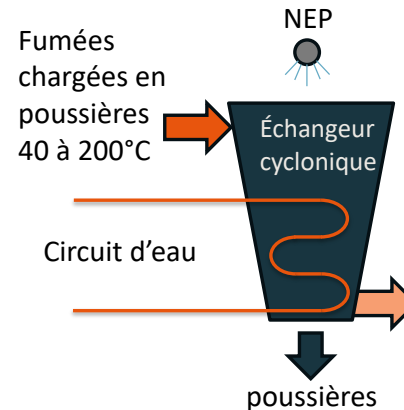
II. Les technologies de dépollution avec récupération de chaleur

Marchés cibles : malteries, séchoirs, agroalimentaire

dépollution par cyclone puis échangeur classique

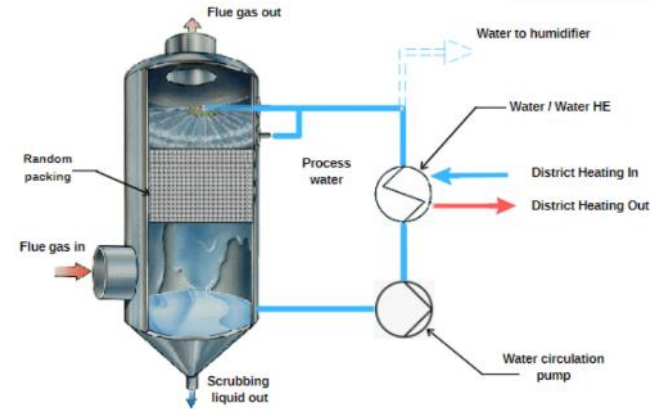
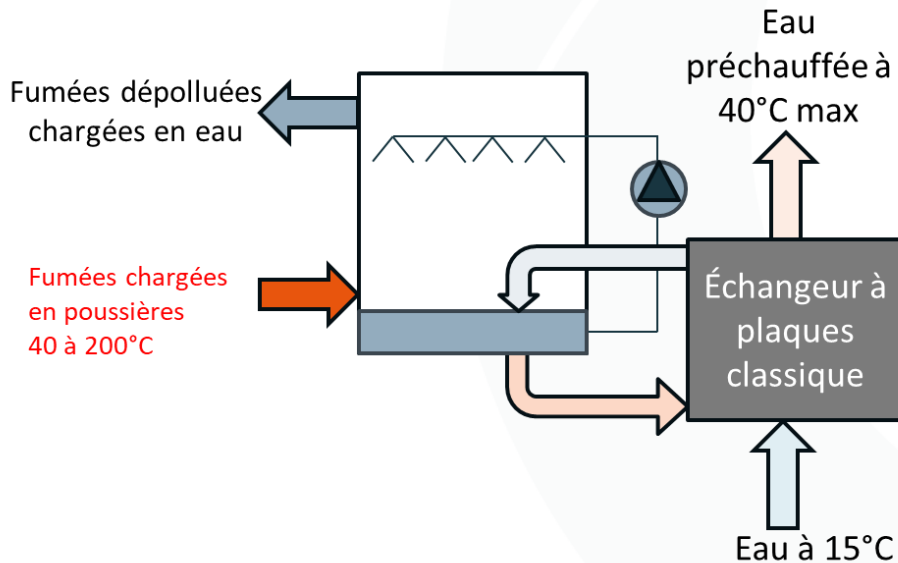


Dépollution et échange combiné avec échangeur cyclonique



II. Les technologies de dépollution avec récupération de chaleur

Fumées acides et empoussiérées : laveur avec récupération de chaleur

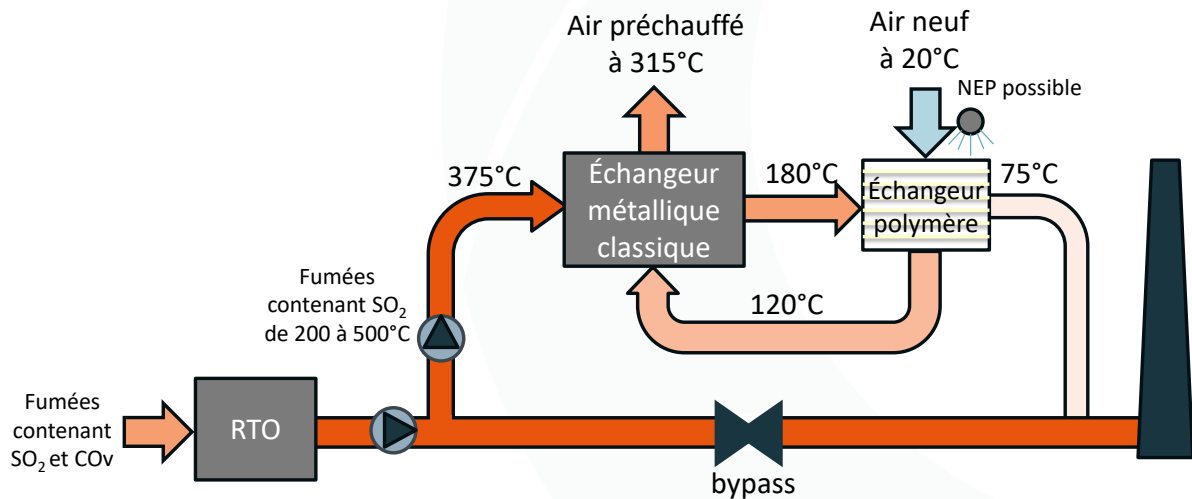


**Water / District Heating Water
Heat Exchanger**

Source : LAB

II. Les technologies de dépollution avec récupération de chaleur

Fumées contenant des acides et COV :



Récupération de chaleur :
Chauffage de l'air de 20°C à 315°C

II. Les technologies de dépollution avec récupération de chaleur

3 technologies font l'objet de fiches technologiques incluses dans le rapport d'étude

**FICHE TECHNOLOGIQUE n°2**

ÉCHANGE ET DÉPOLLUTION PAR CONDENSATION ÉCHANGEUR VERRE

Étude sur le traitement des fumées comme vecteur de récupération de chaleur

Principe de fonctionnement

Le verre possède une très bonne tenue à la corrosion sulfurique, ce qui permet son utilisation industrielle dans la récupération d'énergie sur des gaz à des températures inférieures à la température de condensation acide.

Cet échangeur peut permettre une diminution des acides et des poussières uniquement si la récupération d'énergie fait descendre la température des fumées en dessous de leur point de condensation.

Cet échangeur peut fonctionner à des températures allant jusqu'à 300°C, mais pour permettre la condensation et ainsi réduire la teneur en polluants des fumées, la température en sortie doit être abaissée à moins de 100°C.

Le type d'échangeur majoritaire est à tubes à courant croisé. De forme parallélépipédique, il se compose d'une armature métallique et de faisceaux de tubes en verre d'une longueur généralement de moins de 5 m. Le fluide primaire chaud principalement gazeux et chargé en polluants circule à l'intérieur des tubes en verre perpendiculairement au fluide secondaire qui peut être liquide ou gazeux.

Avantages

- ↑ Très résistant à tout type de gaz sauf HF
- ↑ Échange thermique meilleur qu'un échangeur polymère
- ↑ En cas de diminution des polluants par récupération en dessous de la température de rosée des fumées, condensats auto nettoyants
- ↑ Surface lisse et facilement auto nettoyante

Inconvénients

- ↑ Risque de casses et de débris de verre
- ↑ Longueur limitée (4-6m maximum)
- ↑ Aux hautes températures, arrêt

Indices

Performance	CAPEX (investissement)
	
Conso électrique	OPEX (maintenance)
	

Fabricants

- flucorres**: fabricant suisse d'échangeurs de chaleur résistants à la corrosion. Propose aussi des échangeurs en fluoropolymère.
<https://www.flucorres.ch/>
- Air Fröhllich**: fabricant suisse d'échangeurs sur mesure. Propose aussi des échangeurs polymère en PFA.
<https://efe.swiss/?lang=en>

Contraintes d'exploitation / intégration dans l'industrie

Gamme de température entrée/sortie de l'effluent gazeux primaire :



Débit admissible jusqu'à 300 000 m³/h.

Gamme de température entrée/sortie du fluide de récupération (air, eau ou vapeur) :



Pour condenser et donc diminuer la teneur acide des fumées, une récupération de l'énergie en dessous de la température de condensation est indispensable.

- Matériaux :**
 - Verre pour fumées chargées en poussières et acides sauf acide fluorhydrique (HF)
 - Verre doublé de fluoroplastique pour fumées chargées en poussières et corrosives contenant des traces d'acide fluorhydrique (HF). Type d'échangeur moins onéreux que des échangeurs polymère.

Le verre présente un bon état de surface qui limite l'accrochage des dépôts et qui permet de retrouver l'état initial après un simple lavage. Cet échangeur est particulièrement adapté aux environnements difficiles et convient pour des échanges entre gaz ou liquide en condensation ou en évaporation.

- Manutention :** Technologie répandue avec plusieurs fournisseurs restants de niche, principalement axés sur les procédés de maitlage.
- Encombrement :** Longueur limitée à 4m, agrandissement de l'échangeur possible que dans le sens de la largeur.
- Équipements annexes nécessaires :** Alimentation et évacuation en eau pour les nettoyages.
- Maintenance :** Remplacement périodique des tubes brisés et inspections et nettoyages nécessaires.

Applications et secteurs industriels :

- NOx
- SOx (Très bonne tenue à la corrosion sulfurique)
- HCl
- HF : L'acide fluorhydrique est hautement corrosif, au point qu'il dissout même le verre. Concentration maximale acceptable de 1mg/lit³ si concentration supérieure, doublage des tubes en fluoropolymère nécessaire
- Pousssières : dépolluissage si condensation des fumées. Les gouttes de condensation peuvent capter les pousssières en coulant le long des tubes.
- COV

is opérant à basse température. chauffage d'air sur séchoir. 3 par exemple)





RETOUR D'EXPÉRIENCE — INCINÉRATEUR DE DÉCHETS

Seung-Min Song (Solvay)



Alliance - Webinar February 6th, 2025

Seung-Min Song
SOLVAir® Market Development Manager

SOLVAir®

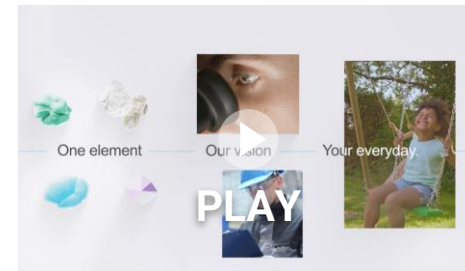
SOLVAY

We are Solvay

We are Solvay, a pioneering chemical company with a legacy rooted in the groundbreaking soda ash process innovation of our founder Ernest Solvay. We are **essential chemistry**, reinventing industrial processes to better manufacture technologies that are essential to multiple markets.

Since 1863, we have harnessed the power of chemistry to make **progress** possible, creating innovative, sustainable solutions that address the world's most essential needs. We are a part of people's daily lives—purifying the air we breathe, conserving food resources, protecting health and well-being, producing eco-friendly clothing, making car tires more sustainable, and enabling battery recycling and high-performance semiconductor chip manufacturing.

As a **world-leading company**, holding number one positions across all our markets with **sustainability and excellence** embedded in our operations and values, we are committed to driving the transition toward a **carbon-neutral future** by 2050.



+9,000

Employees



€4.9bn

Net
sales



€1.2bn

Underlying
EBITDA



45

Production
sites



6

Major R&I
centers



41

Countries

SOLVAir Solutions key enabler for heat recovery in Waste to Energy (WtE).

Highly polluted raw gases

Mandatory: to remain always > the acid dew point (i.e: Sulfuric acid > 140°C)

Challenges: high pollutants levels in the flue gas which

Strict regulations

Regulations **sets ultra low emission limits and maximize energy recovery**

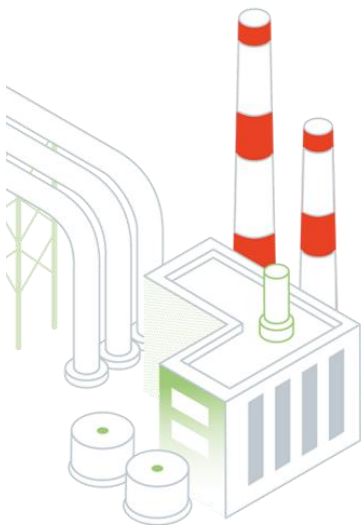
WtE plants: often located near urban areas for **district heating**

Why SOLVAir ?

- **Very efficient acid mitigation** (>99,9%)
- In a **wide temperature range**, from 80 to 800°C
- **No water required**, which maintains the flue gas at high temperature
- **Enables higher energy efficiency**

SOLVAir solutions for energy recovery and low emissions in WtE are applicable to other industries

SOLVAir®: Global flue gas cleaning brand



Effective solutions to meet the **most stringent regulations**

High pollutants mitigation from exhaust gases

+20 types of industries

+120 countries

+500 customers

Partnership with EPCs, technology suppliers and consulting companies

+30 years of technical experience and **30** experts at your service

Strong expertise conception, implementation and optimization

SOLVAir® Solutions achievable and demonstrated acid mitigation performances

High mitigation rate for all pollutants required by most stringent regulations:

Acid removal on bag filters

SO_3 , SO_2 , HCl > 99,9%

At low stoichiometric ratios (1,05-1,20).

SOLVAir® process included in BAT Reference Document for **Waste Incineration** (2019) and in **Large Combustion Plants** (2017) among others.

Achievable emission limits

SO_3 < 0,1 mg/Nm³

SO_2 < 2 mg/Nm³

HCl < 2 mg/Nm³

HF < 1mg/Nm³

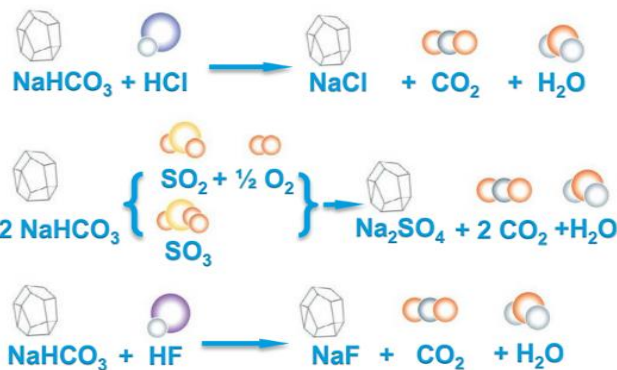
normalized conc. dry, 11% O₂

SOLVAir®: sodium bicarbonate based sorbent



www.solvairsolutions.com

1. Coarse bicarbonate: SOLVAir® S300
2. Ready-to-use bicarbonate: SOLVAir® SB 0/3 and SOLVAir® S350
3. Mixture with carbon-based additive: SOLVAir® S350AC



Sodium bicarbonate is:

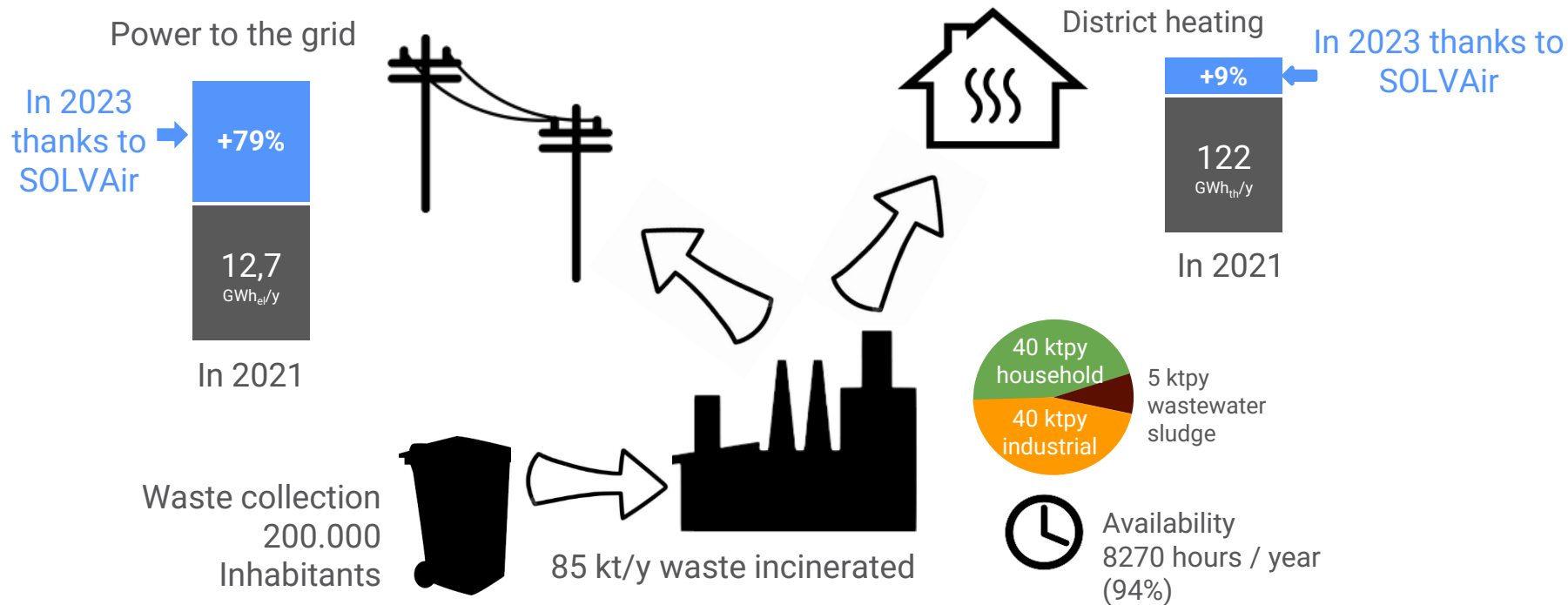
- Neutral
- Non Corrosive
- Non Irritant
- Non Toxic
- Non Flammable



© HKH Sankt-Gallen

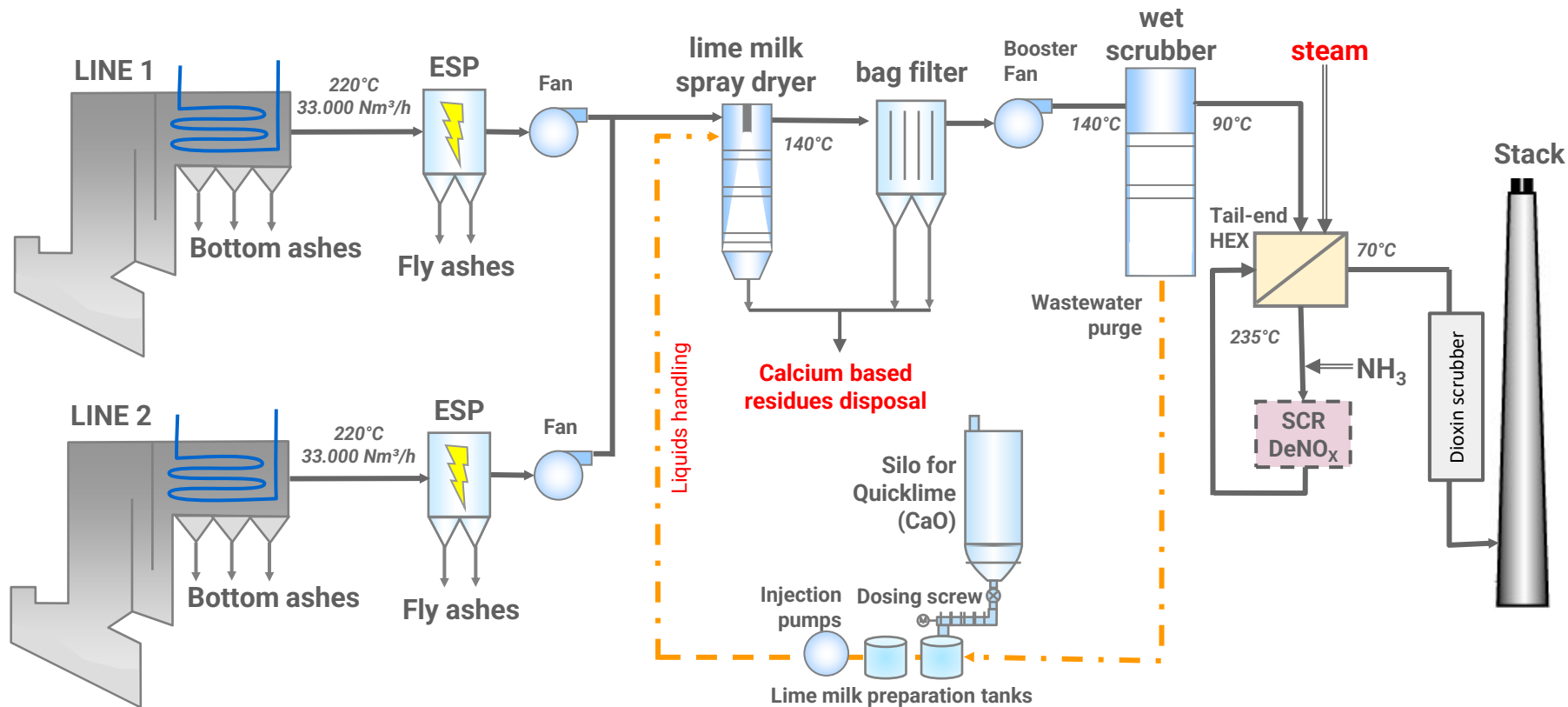
CASE STUDY: KHK Sankt-Gallen (Switzerland)

KHK Skt. Gallen, Switzerland: Key figures



KHK Skt. Gallen, Switzerland

Former flue gas treatment situation before 2022

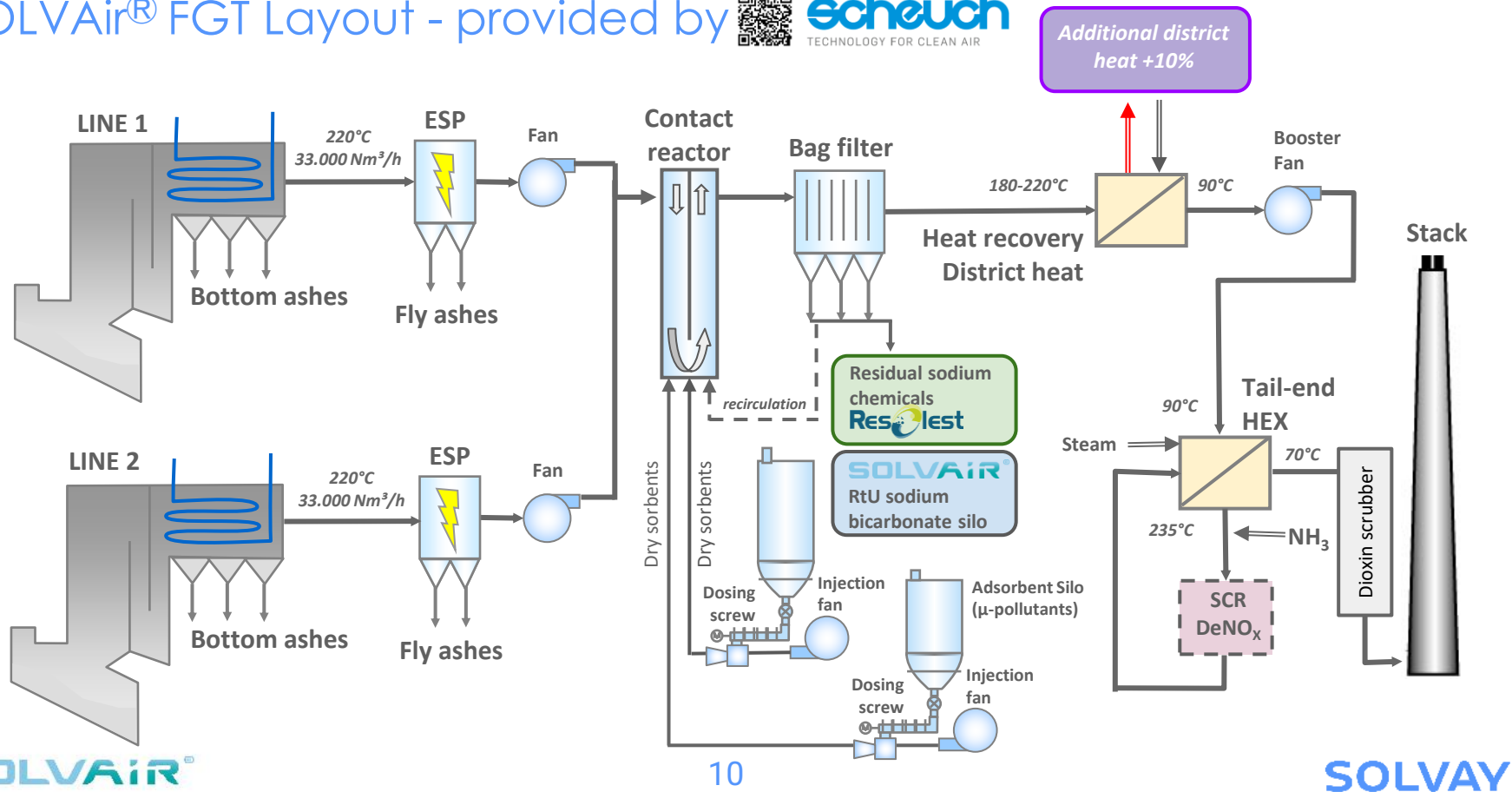


KHK Skt. Gallen, Switzerland

SOLVAir® FGT Layout - provided by



echeuch
TECHNOLOGY FOR CLEAN AIR



SOLVAir™

10

SOLVAY



EDILIANS

CASE STUDY: Edilians

SOLVAir® Solutions meet all types of industries' challenges



Achievable mitigation:

- > 99,9 % SO_x
- > 99,9% particle matters
- 0 waste, residue or pollutants released

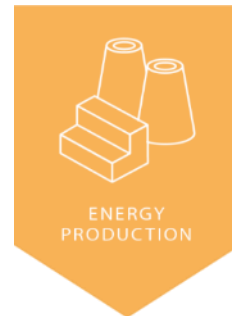


Achievable mitigation:

- > 99,9% of HCl - SO_x on FF
- > 95% for SO₂ and HCl with ESP
- Suitable for Carbon Capture



- To meet the most stringent regulation
- To capture peaks of pollutants thanks to quick chemicals reactions
- Discreet plants for urban implementation
- High energy efficiency and recovery



- Easy to implement
- Very flexible for stop and go and to adapt to a wide range of pollutant content
- Low CAPEX

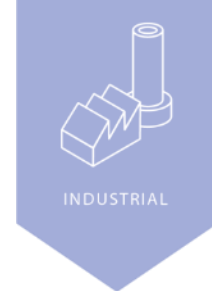


SOLVAir Industrial references

SOLVAY

Salonit, Slovenia

Cement manufacturing



Key figures – April 2021

- Up to 99% SO₂ mitigation
- Less than 6 months between trial tests and full operation
- Up to 100% switch to alternative fuels made possible

Salonit's need

- Use of alternative fuels while curbing emissions
- Reduce maintenance costs
- Ensuring compliance with EU regulations

SOLVAir® answer

- SOLVAir® Ready-to-use solution adaptable to Salonit's bypass solution

Benefits

- **Substituted of 100% of its energy with alternative fuels**
- **Reduction of 99% of its SO₂ emissions**

Voestalpine plant, Austria

Sintering manufacturing



INDUSTRIAL



Key figures – 2025

- 16 years of collaboration with SOLVAir®
- 8 400 operating hours per year
- The only sinter strand in Europe with SCR deNO_x catalyst
- Under 350 mg/Nm³ SO_x emissions, 100 mg/Nm³ NO_x emissions, 0.1 ng/Nm³ dioxin emissions

Company's need

- Even better acid gas mitigation
- To comply with much stricter local emissions limits due to the plant's proximity to the city of Linz

SOLVAir® answer

- Use of SOLVAir® products, better than the lime-based systems previously used

Benefits

- High SO_x mitigation rates and up to 60% for SO₂
- Efficient removal of heavy metals, acid and organic compounds
- Acceptance among the people of the neighboring city of Linz

Solvay Soda Ash plant in Spain

Industrial boilers



ENERGY
PRODUCTION



Key figures - 2021

- 1.1 kg of sodium bicarbonate consumed per ton of steam produced
- Dust in exhaust: under 5 mg/Nm³, dry, 6% O₂
- SO₂ in exhaust: 190 mg/Nm³, dry, 6% O₂

Company's needs

- Mitigate SO_x and dust in order to reach compliance

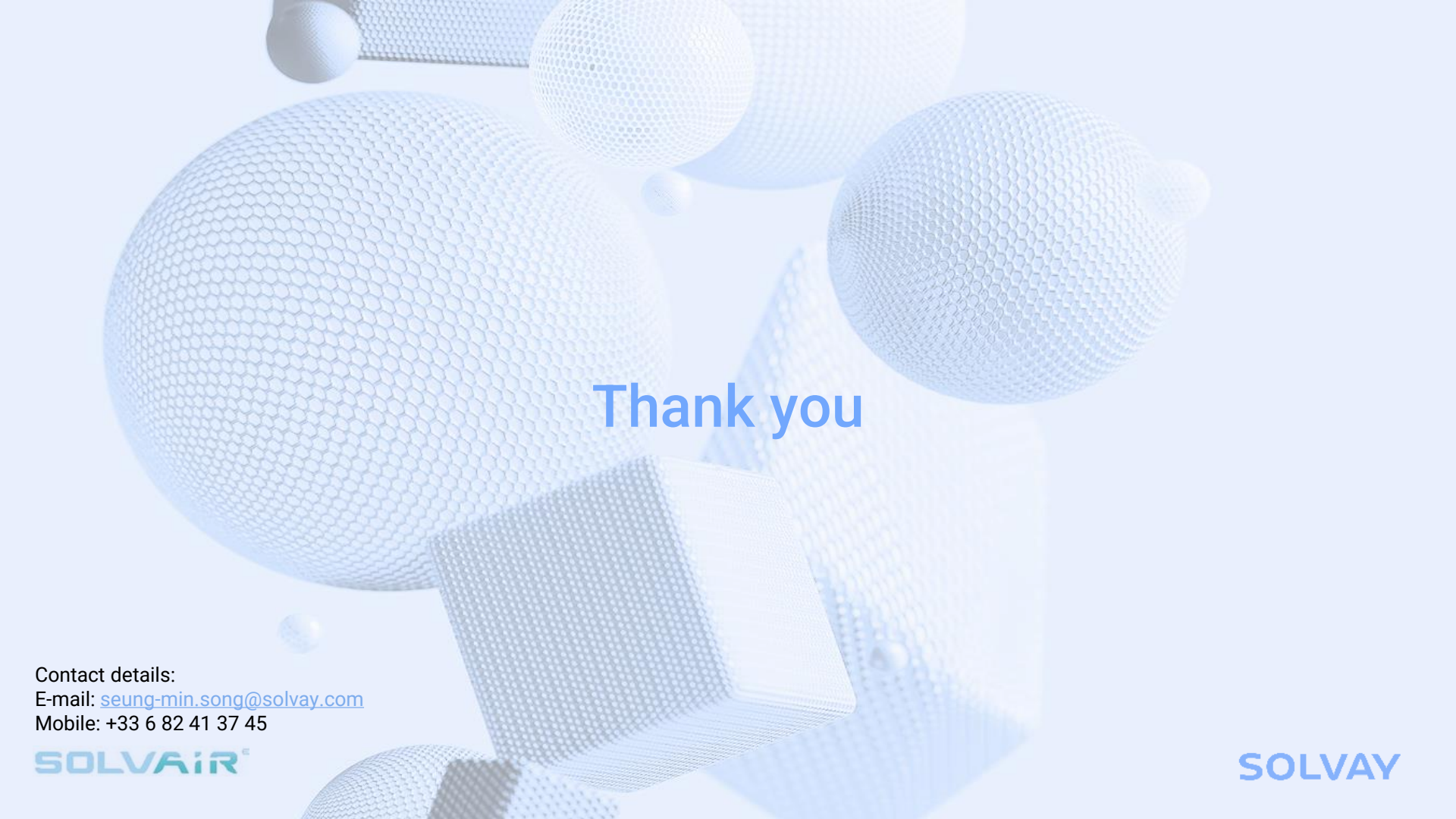
SOLVAir® answer

- Initially equipped with electrostatic precipitators to remove the dust from their flue gases, the boilers were retrofitted in 2018 with a desulfurization system

Benefits

Successful rates achieved:

- 5 mg/Nm³ for dust (legislation: 10 mg/Nm³)
- 190 mg/Nm³ for SO₂ (legislation: 200 mg/Nm³)

The background of the slide is a light blue gradient. It features several 3D-rendered objects: a large sphere with a hexagonal mesh pattern on the left, a smaller sphere with a similar pattern at the top center, another sphere with a hexagonal pattern on the right, and a cube with a hexagonal pattern in the foreground. There are also some smaller, solid blue spheres scattered around.

Thank you

Contact details:

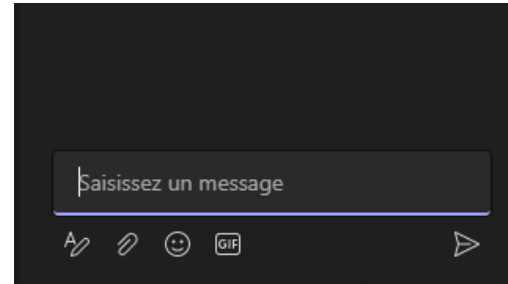
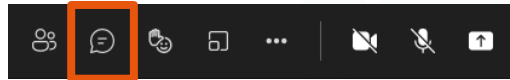
E-mail: seung-min.song@solvay.com

Mobile: +33 6 82 41 37 45

SOLVAIR®

SOLVAY

Des questions ?





III. LES TECHNOLOGIES À TRL>6

Freins de développement et besoins industriels

III. Les technologies avec TRL >6

Besoins industriels

- Filtrer et traiter les fumées sans abaisser le niveau de température
- Répondre aux exigences réglementaires
- Réduire la consommation énergétique du site
- Réduction des coûts de production
- Volonté RSE

Freins de développement

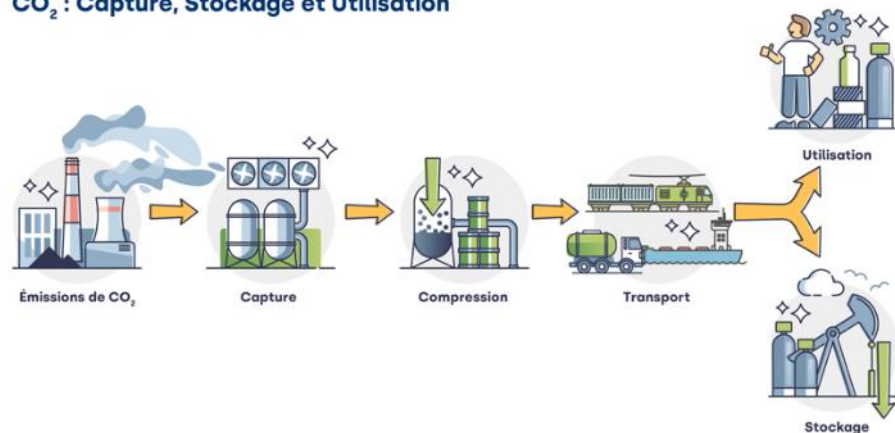
- Développement matériel doit être réalisé en collaboration entre les spécialistes du traitement de fumées et les énergéticiens
- Le traitement de fumées et la récupération de chaleur sont réalisés au cas par cas
- Temps de retour sur investissement trop long
- Manque de puits de chaleur pour valoriser la chaleur récupérée

III. Les technologies avec TRL >6

Solutions en voie de développement :

- **Captage et stockage de CO₂**

CO₂ : Capture, Stockage et Utilisation



Objectifs :

- -45% des émissions industrielles entre 2015 et 2030
- Neutralité carbone en 2050
- Déploiement des CCUS dès 2030 en industrie
- 2040 : étendre les solutions aux autres secteurs
- Soutien de l'état des premiers projets de capture et de stockage (CCS) dès 2025

Selon l'AIE, le CCUS permettra de **réduire de 10% les émissions CO₂** dans le monde

-> État des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France publié en juin 2024



RETOUR D'EXPÉRIENCE — LAVEUR-CONDENSEUR DE FUMÉES DE COMBUSTION BIOMASSE

Damien Levoy (IDEX)

Efficacité d'un laveur - condenseur de fumées de combustion de biomasse

Programme Recup'EFFI financé par l'ADEME



Présentation d'IDEX et de CEDEN



Présentation IDEX

Depuis plus de 60 ans, Idex développe, conçoit, finance, construit et exploite des infrastructures énergétiques locales et bas carbone de fourniture de chaleur et d'électricité pour les bâtiments, les villes & l'industrie.



2.3 Mds € de
CA en 2023

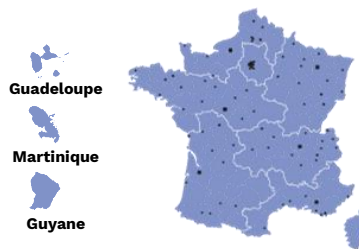


6.100
employé(e)s



> 300 M€/an
d'investissements

110 agences locales
en France



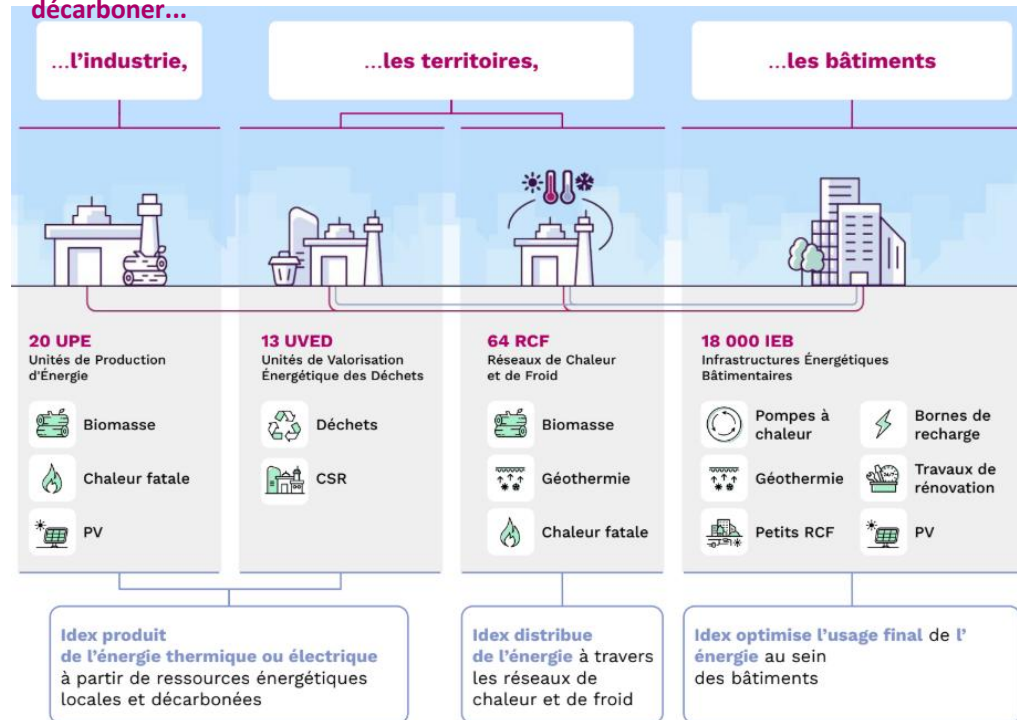
International



1 600 MWth / 250 MWeI : puissances installées

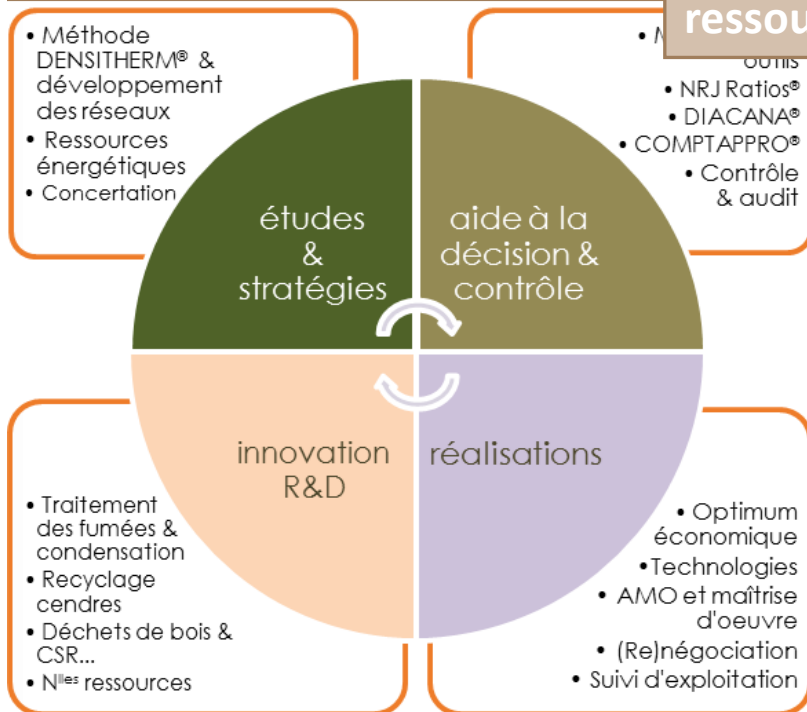
800 ktCO₂eq/an : émissions évitées

Plate-forme intégrée qui déploie plus de 300 m€ de CAPEX par an pour décarboner...



Cabinet d'études sur l'énergie
et les déchets, créé en 2006

Spécialisé dans la valorisation
énergétique et agronomique des
ressources



1. Une équipe pluridisciplinaire de **10 ingénieurs et techniciens.**
2. Implanté à Rouen, Rennes et Saint-Brieuc
3. Notre rayon d'intervention : **Grand Ouest, Ile de France et Nord de la France**
4. Une extension de l'activité à l'**ensemble des énergies renouvelables thermiques** (hydrothermie, géothermie, combustibles solides de récupération, chaleur fatale d'incinération et Data Center).
5. Une attention particulière accordée à l'**écoute** et à la **compréhension des besoins.**
6. Un **retour d'expérience** reconnu à l'échelle nationale.
7. Une **indépendance des opérateurs énergétiques.**

5-6 févr/feb 2025 Nantes FR

Programme R&D Récup'Effi

Objectifs du programme :

Caractériser la technologie TERRAO du point de vue de :

- i) La performance énergétique
- ii) Les incidences sur la qualité des émissions atmosphériques
- iii) Les voies de développement en France

Financement ADEME (AMI APRED - 2021)

Un consortium de 3 partenaires et de 2 organismes de recherche :



Sommaire

- 1) Rappels sur la condensation
- 2) Exemples de condenseurs sur le patrimoine IDEX
- 3) Efficacité de la récupération thermique sur lavage de fumées – Madrillet Energie (unité Terrao)
- 4) Performance du lavage de fumées – Madrillet
- 5) Perspectives

Rappel sur la condensation

Les condenseurs de fumées jouent 2 rôles principaux :

- ❑ Récupération de la chaleur sensible et latente par condensation de l'eau présente dans les fumées
- ❑ Lavage des fumées

L'eau des fumées provient de 2 sources distinctes :

❑ L'eau produite par la combustion : $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66} + 9,8 \text{ Air} \rightarrow \text{CO}_2 + 0,72 \text{ H}_2\text{O} + 7,74 \text{ N}_2 + 1,03 \text{ O}_2$ Avec $\lambda=2$

❑ L'eau contenue dans le combustible : $m_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{H_B}{1 - H_B}$

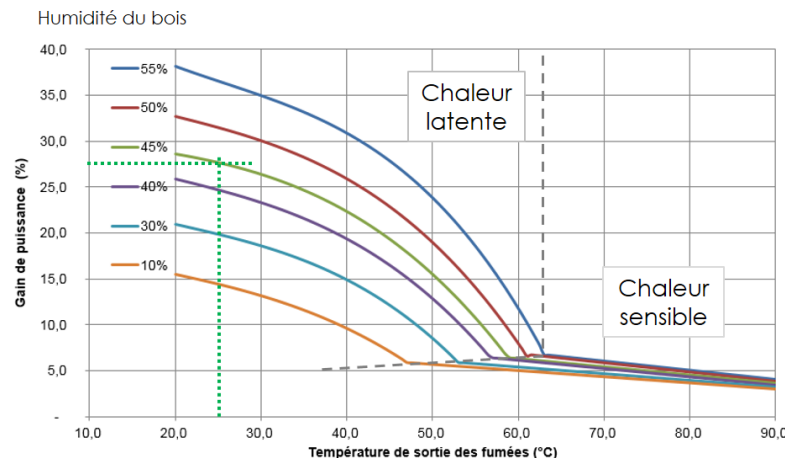
⇒ La combustion de 1 000 kg de bois à 45 % d'humidité, dans des conditions optimales, entraîne l'émission de 744 kg de vapeur d'eau

Le condenseur permet de récupérer tout ou partie de l'énergie consommée pour vaporiser cette eau :

Puissance therm. utile : $P = m * PCI_H * n$

Chaleur latente récupérable : $PCI_H = PCI_S \times \frac{100 - H_B}{100} - X_v \frac{H_B}{100}$

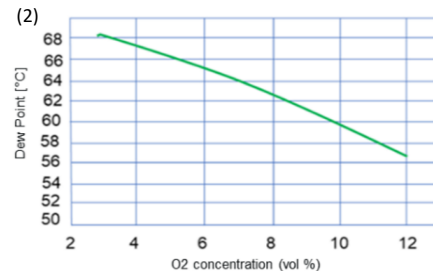
$$PCI_S = PCS - X_v \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{2M_H} \times \frac{H}{100}$$



Rappel sur la condensation

L'efficacité de la condensation des fumées dépend de plusieurs paramètres :

- **Disponibilité d'un usage thermique BT (source chaude) pour l'abaissement de la T° des fumées en deçà du point de rosée**
⇒ Eventuellement appuyé par une machine thermodynamique
- **T° des fumées**
⇒ Appui éventuel d'un économiseur avant condenseur avec attention au point de rosée des acides
- **Teneur en eau des fumées liée à la humidité de la biomasse**
⇒ Plus l'humidité du bois est forte, plus le point de rosée est élevé
- **Taux d'O₂ mesuré dans les fumées**
- **Design du condenseur** notamment qualité d'échanges fumées / eau



Condenseurs de fumées biomasse – patrimoine IDEX

Lieu	Soissons - Presles	Soissons - Ciseleurs	EGMI - Givors	Madrillet Energie
Chaudières biomasse	Weiss - 4,5 MW	VAS - 5,5 MW	Weiss - 4,2 MW	Weiss - 2 x 5 MW
Traitement fumées	MC + FAM	MC + FAM	MC + FAM	MC + FAM
Marque Condenseur	Condens HR Oy	VAS	Scheuch	Terrao (Starklab)
Voie	humide	humide	humide	humide
P Économiseur	non	oui	220 kW	2 x 250 kW (retirés)
P Condenseur (45%H)	825 kW	1 250 kW	640 kW	2 x 1 600 kW
ICPE 2921	oui	oui	oui	non
TFP	non	Shuangliang (absorption)	Carrier (compression)	Trane (compression)
P (cond. TFP)		3 000 kW	720 kW	3 x 1520 kW
Année mise en service	2012	2025	2021	2024
Investissement	400 k€	1 200 k€	450 k€	2 600 k€
Récupération (hors PAC)	14% en moy. saison	19% (estimé)	9% en moy. sur saison	14% moy. saison



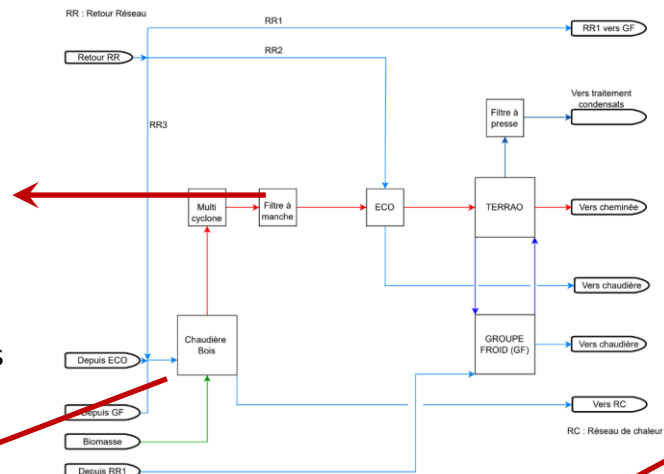
La performance intrinsèque des équipements de condensation est difficilement comparable, puisque les conditions opératoires sont spécifiques à chaque site.

Condenseurs de fumées biomasse – patrimoine IDEX

Présentation de la chaufferie biomasse Madrillet Energie à St Etienne du Rouvray :



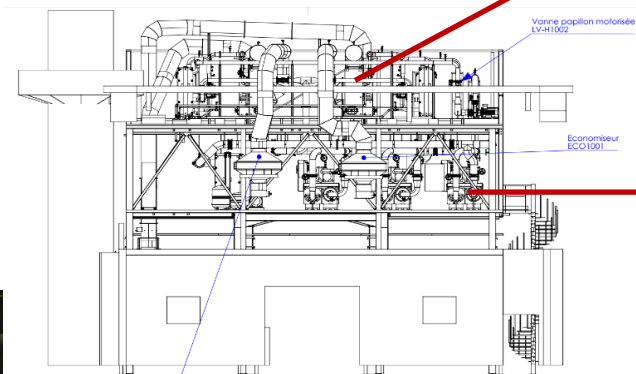
Filtre à manches



1 des 2 laveurs condenseurs Terrao



1 des 2 chaudières Weiss – 5 MW



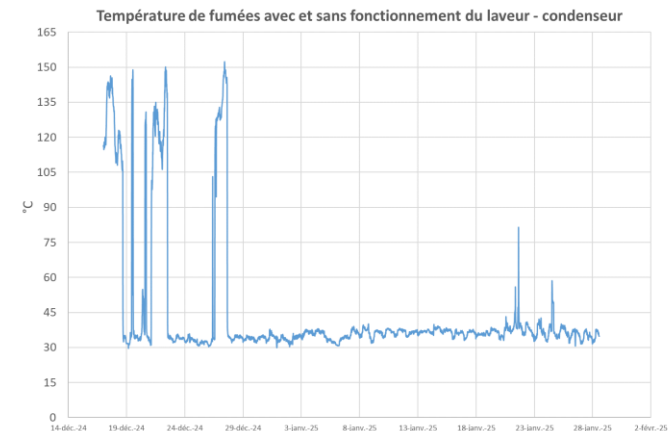
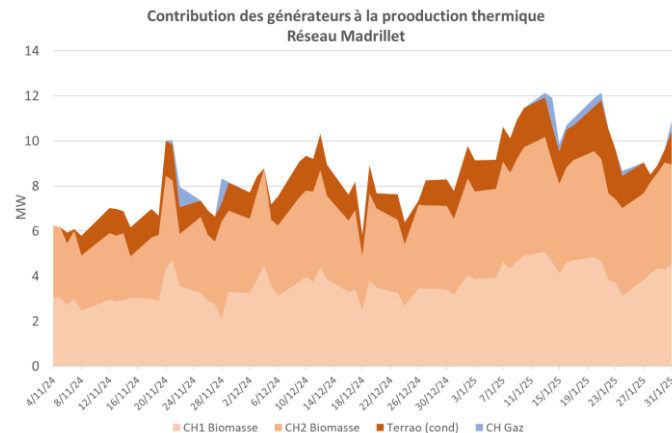
1 des 3 thermo-frigo pompes Trane

Madrillet Energie - Efficacité de la récupération thermique

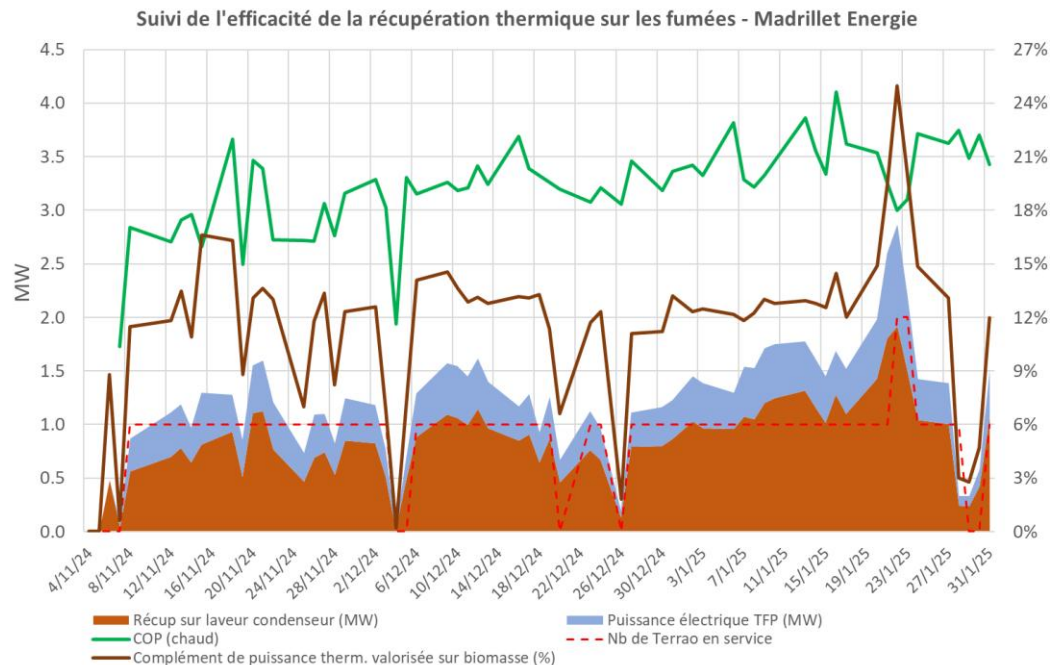
- Installation du laveur-condenseur de fumées : fin 2023
- Mise en route et test sur Q1 2024
- Mise en service industrielle sur la saison de chauffe 24/25
- Optimisation des T° de retour réseau (vannes auto-équilibrantes)
- Réglage de la combustion pour minimiser le taux d'O2 sortie chaudière (5%)
- Colmatage ancien filtre à manches pour limiter les airs parasites
- Modification des économiseurs



- Régime d'eau évaporateur : 25-35°C
- Régime d'eau condenseur TFP : 55-65°C
- La récupération thermique a permis de limiter considérablement les appels des chaudières gaz de secours !



Madrillet Energie - Efficacité de la récupération thermique



Le laveur-condenseur a permis de récupérer jusqu'à **25% d'énergie complémentaire sur les fumées**, soit **près de 35% au condenseur de la TFP** !

- Un arbitrage doit être trouvé entre le taux de récupération et le coût de l'énergie récupérée :

$$P_{elec} < P_{biom} * \frac{(1+e)*COP*(x\%+(1-x\%)*R_{appoint/biom})}{\eta-f*(1+e)*COP}$$

Avec :

$$e : Q_{eco}/Q_{cond}$$

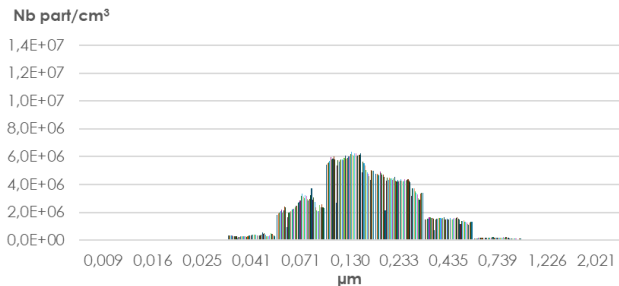
$$R_{appoint/biom} : P_{appoint}/P_{biom}$$

- L'efficacité de la récupération thermique est directement liée à la maîtrise opérationnelle, tant technique que financière.

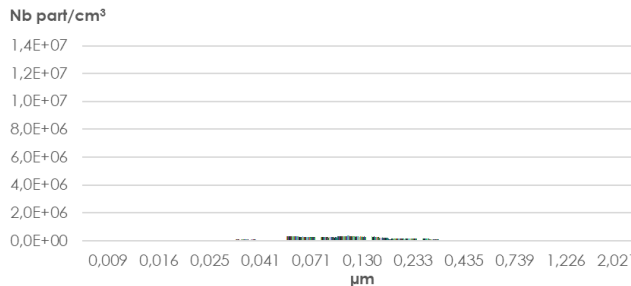
Madrillet Energie – Efficacité sur le nombre de particules

Avec filtre à manches dans la gamme 0-10 μm

Concentration en particules par classe de taille en amont du condenseur avec filtre à manches

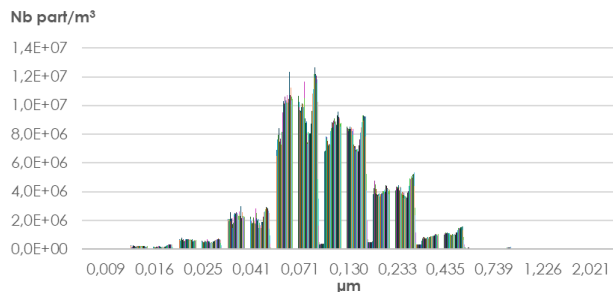


Concentration en particules par classe de taille en aval du condenseur avec filtre à manches

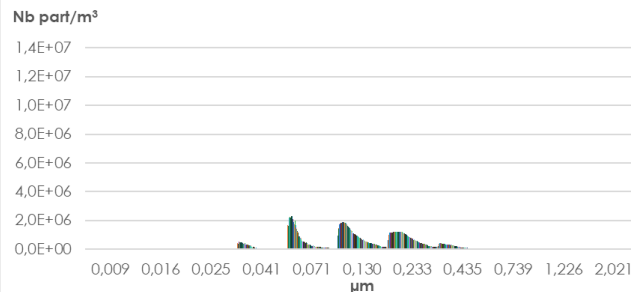


Sans filtre à manches dans la gamme 0-10 μm

Concentration en particules par classe de taille en amont du condenseur sans filtre à manches



Concentration en particules par classe de taille en aval du condenseur sans filtre à manches



Les particules sont classées en trois principales catégories :

- Les grosses : $>50 \mu\text{m}$
- Les fines : de $2,5$ à $10 \mu\text{m}$
- Les ultrafines : $<2,5 \mu\text{m}$

Les ultrafines sont les plus nocives pour la santé humaine.

Ces graphiques mettent en lumière l'importance des ultrafines comprises entre $0,5$ et $0,05 \mu\text{m}$. Les fines et les grosses particules qui forment l'essentiel de la masse ne figurent pas sur ces représentations.

Le filtre à manches présente une efficacité relative (a priori, +/- 50% d'abattement) sur les ultrafines.

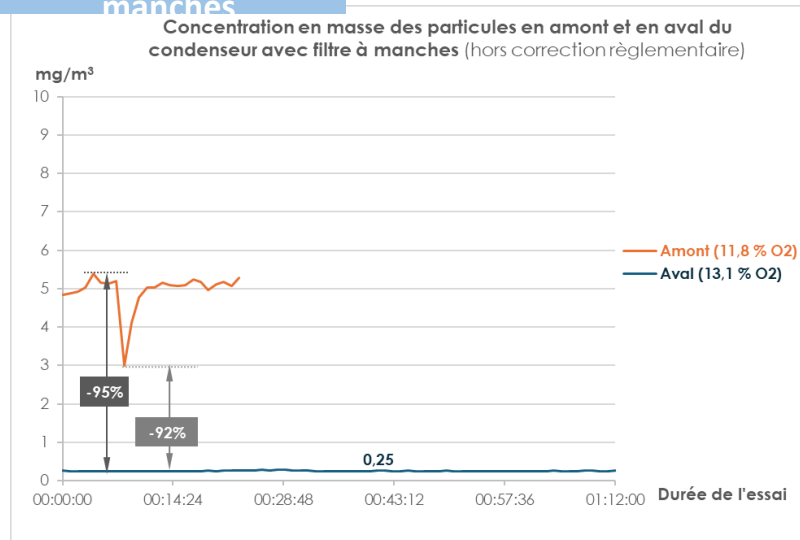
En revanche, les **ultrafines** sont **efficacement piégées** par le **condenseur laveur**, même dans le cas d'un **bypass du filtre à manches**.

Madrillet Energie – Efficacité sur la masse des particules

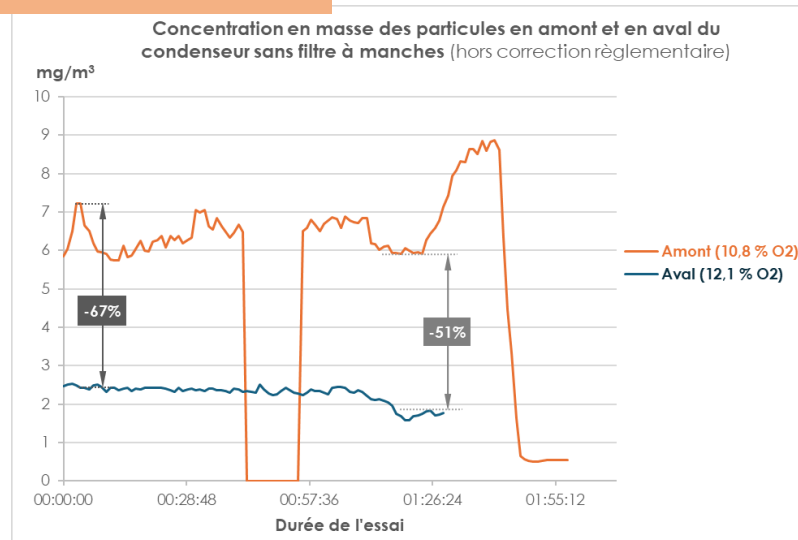
Deux matériels ont permis de caractériser les particules : l'ELPI (dénombrement jusqu'à $10\text{ }\mu\text{m}$) et le PPS (masses $0\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$). Le premier a permis d'évaluer la distribution granulométrique des particules, ainsi que leur volume. Le second a permis d'évaluer la densité des particules.

Les résultats ci-dessous résultent d'un traitement conjoint

Avec filtre à
manches



Sans filtre à manches



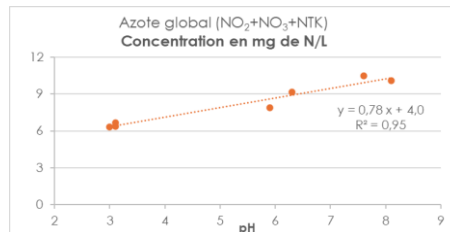
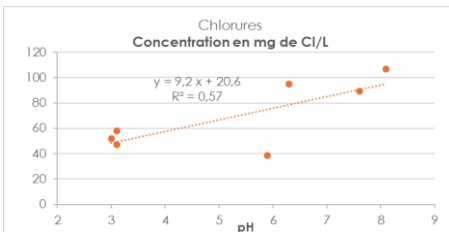
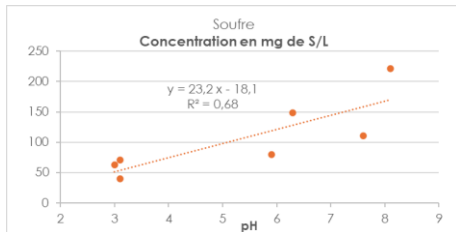
En présence d'un filtre à manches, le condenseur laveur permet d'abattre de 92 à 95 % des particules supplémentaires, ce qui amène le niveau des rejets exceptionnels inférieurs à 1 mg/Nm^3 de fumées.

En l'absence de filtre à manches, le niveau d'abattement est ramené entre 51 et 67 %. Les émissions atmosphériques se situent entre $2\text{ et }3\text{ mg/Nm}^3$ de fumées, ce qui demeure une efficacité remarquable.

Madrillet Energie – Composition des condensats

Les substances dans les condensats témoignent de l'efficacité du TERRAO sur le traitement des fumées

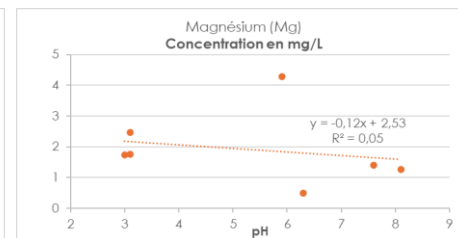
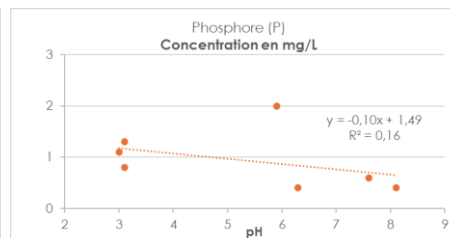
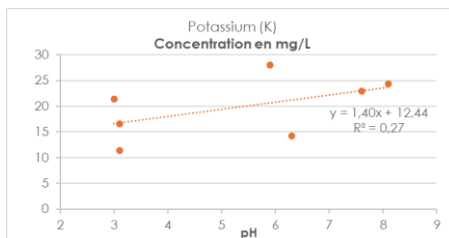
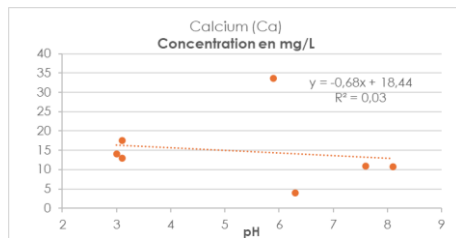
- Des concentrations de **certaines substances** (solubles) **croissent avec l'augmentation du pH**. Comme l'hydrogène, elles contribuent à l'acidification des condensats.



Taux d'abattement dans les fumées

- SO_2	17 à 65%
- HCl	13 à 95%
- NOx	11 à 14%

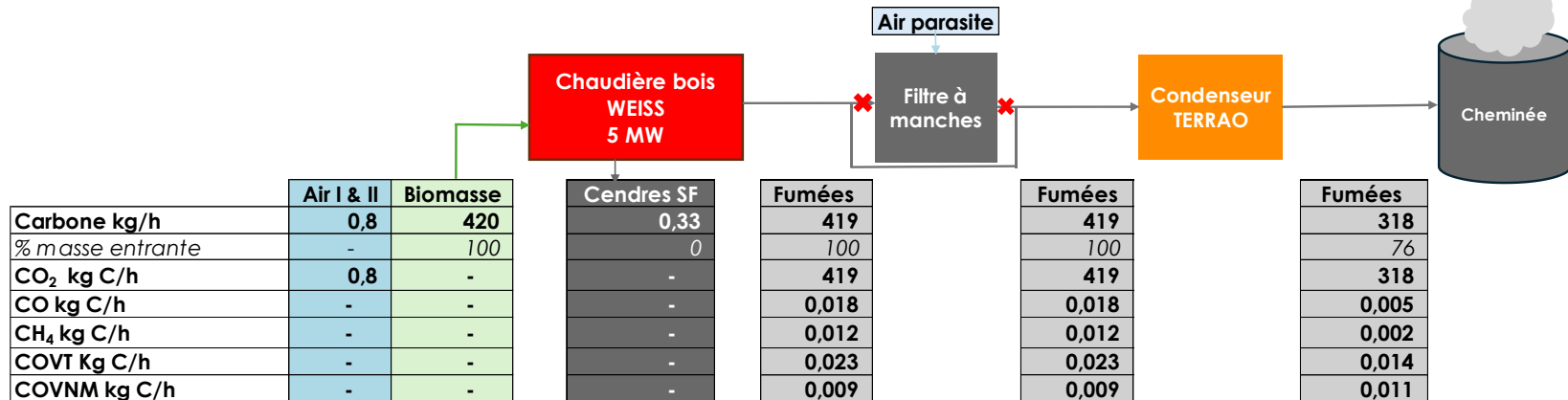
- D'autres ne **semblent pas sensibles à l'évolution du pH** (substances particulières, captées par le filtre à manches)



Les condensats transitent dans un **filtre à presse** où la **pollution particulaire** est captée dans un **gâteau** (30 à 35% de MS) évacué en décharge. L'**effluent, composé d'eau et d'acides**, est rejeté dans le **réseau d'assainissement** après neutralisation. Il est très **peu chargé** ($\text{DCO} < 10 \text{ mg O}_2/\text{L}$) et **particulièrement biodégradable** ($\text{DCO}/\text{DBO}_5 = 1,5$)

Madrillet Energie – Captation du carbone et des polluants carbonés

Le bilan carbone du système durant la journée où le filtre à manches a été by-passé



Le condenseur laveur permet de **capturer 20 à 24 %** du carbone contenu dans les fumées, soit la **mobilisation 720 tonnes CO₂ par an** pour l'installation de **MADRILLET Energie**, soit **60 kg/tonne de bois à 40% d'humidité**

Abattement dans les fumées

- CO 50 à 67%
- CH₄ 80 à 100%

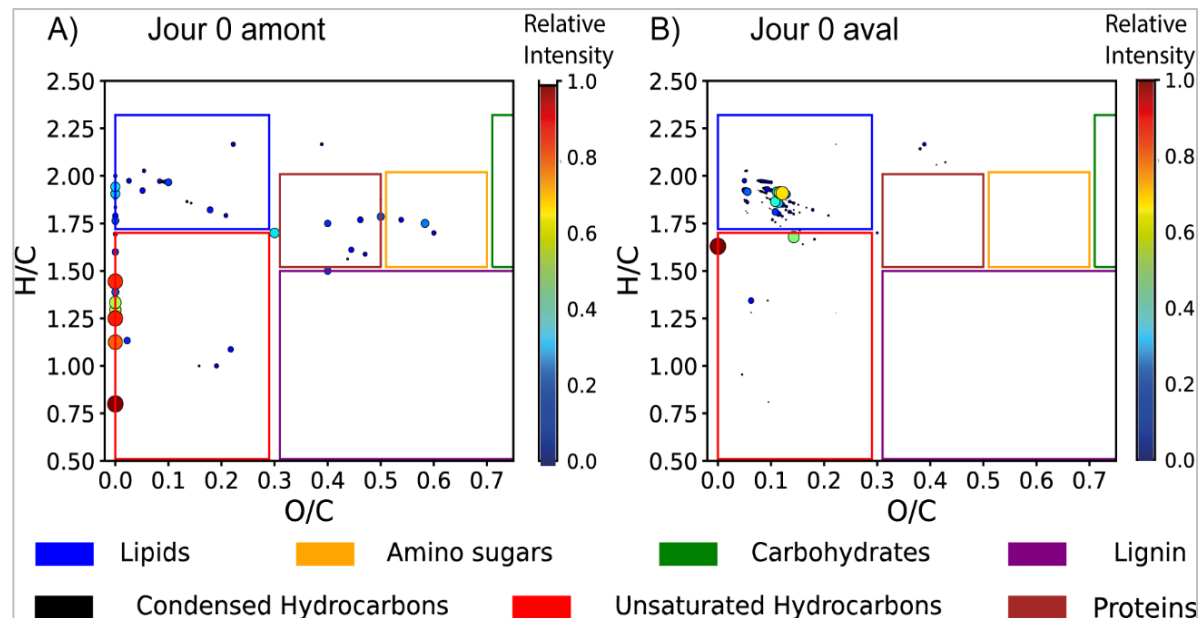
Le carbone capté est :

- soit stocké en décharge (gâteau de filtration),
- soit transformé en station d'épuration en boues biologiques (pollutions fortement biodégradables) valorisées en agriculture (apport de matières organiques au sol, substitution d'engrais minéraux et énergivores du commerce) ou méthanisées (production de méthane) ou incinérées dans une unité de valorisation énergétique (production de chaleur et/ou d'électricité)

Madrillet Energie – Captation du carbone et des polluants carbonés

Les **diagrammes de Van Kervelen** sur les **fumées** (avec filtre à manches) ont pour objectif de **caractériser qualitativement les molécules carbonées** selon leur **teneur en H et en O**

Fumées – Amont et aval du condenseur



La **combustion** est de **très haute qualité**.

Très peu de molécules ont été identifiées sur le diagramme de gauche.

Néanmoins, le **condenseur laveur** a pour effet de **capter les**

- **Les HAP,**
 - **Les sucres,**
 - **Les acides aminés & protéines**
- du bois** encore présentes dans les fumées après le filtre à manches.

Facteurs favorables à la mise en place d'un condenseur

- **Amélioration du rendement chaudière** par l'abaissement des T° de fumées jusqu'au point de rosée (récupération de la chaleur latente de vaporisation de l'eau contenue dans les fumées)

- **Sur un nouveau projet :**

- Autorise l'accès à une ressource en biomasse plus humide
- Réduit le flux de bois consommé de 15 à 20% (egain d'intérêt compte tenu de la pression croissante sur les ressources biomasse - cf. Fonds Chaleur 2025)
- Optimisation financière (CEE et subvention Fonds Chaleur maintenue à 15 €/MWh)

- **Sur une chaufferie existante :**

- Amélioration du taux EnR&R
- Décalage d'investissements dans de nouveaux moyens de production (extension de réseau avec maintien du taux EnR&R)

- **Amélioration la qualité des émissions**

- Abattement complémentaire des polluants dans le cadre d'une mise en conformité (installations avant 2014)
- Traitement complémentaire (Filtre à manches ou à l'Electrofiltres) pour des déchets de bois, et d'une façon générale, ou les installations de grande importance (20-50 MW et 50 MW et plus)
- Pourrait permettre d'éviter un système de DéNOx type SNCR dans certains cas de figure

Les problématiques environnementales

● La condensation ...

- ... produit de l'oxygène (+10 à 11 %)
- ... capte simultanément 20 à 24 % de du CO₂

} La proportion d'O₂ dans les fumées augmente

Conséquences :

Les teneurs en polluants contenus dans les fumées sont ramenées à 6% d'O₂. Dans des fumées dont le taux d' O₂ est élevé (+1,7%), les teneurs en NO_x, CO, SO₂, particules... corrigées **augmentent de 12 à 13%**.

Solutions :

Corriger les teneurs sur la base du taux d'O₂ en amont du condenseur ou raisonner en flux horaire

- La condensation permet de **capter 20 à 24 % de du CO₂ contenu dans les fumées**. Elle contribue donc à la **réduction des émissions de gaz à effet de serre**, et à ce titre, devrait bénéficier d'un soutien spécifique. L'installation de **MADRILLET Energie** permettrait d'économiser **14 400 t de GES sur 20 ans**. À raison de 80 €/t CO₂, cette contribution pourrait être valorisée à hauteur de **1 150 000 €**, soit **44% du montant de l'investissement**.

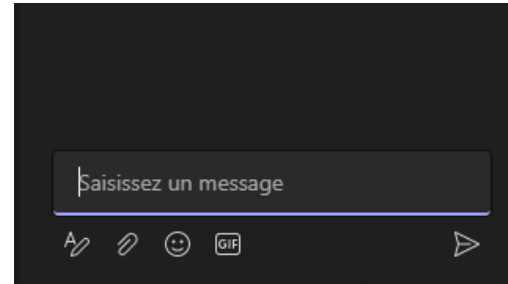
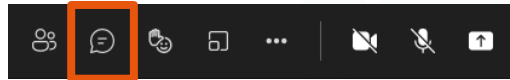
Solutions :

Aide spécifique à l'investissement (subvention du Fonds Chaleur, fiche CEE à créer...) ou **Quotas attribués**

Points de vigilance à la mise en place d'un condenseur

- Emprise foncière (optimisée si pris en compte dès la conception de la chaufferie)
- Disponibilité d'une source froide pour la condensation des fumées sur la période de fonctionnement de la chaudière biomasse
- CAPEX et OPEX associés à l'équipement, incluant le système thermodynamique pour refroidir les fumées, le cas échéant, ainsi que la reprise du circuit de fumées (point d'attention sur l'économiseur et le point de rosée acide)
- Rubrique 2921 pour la plupart des condenseurs par voie humide (pulvérisation d'eau dans les fumées)
- Optimisation plus complexe du fonctionnement du système, fonction des prix de l'électricité (si TFP à compression) et de l'énergie d'appoint biomasse d'une part, et de la bonne régulation de la combustion et des boucles évaporateur / condenseur de la TFP
- Qualité de l'instrumentation, sur les circuits eau / fumées et biomasse, et de la supervision
- Echéances contractuelles DSP (amortissements ou VNC)
- Evolution des prix de l'électricité et fiscalité associée
- Gestion du panache du fait de l'humidité relative élevée des fumées

Des questions ?





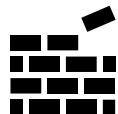
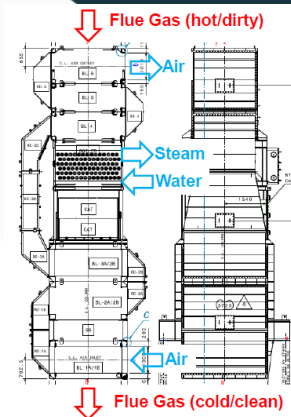
IV. LES RETOURS D'EXPÉRIENCE DE L'ÉTUDE

IV. Les retours d'expérience de l'étude



1. Industrie pétrolière – Axens

- Traitement de fumées : DeNO_x avec solution catalytique SCR (injection NH_3)
- Récupération de chaleur : $7,1 \text{ MW}_{\text{th}}$ → Chauffage de l'air de 15°C à 500°C + production de vapeur à 247°C



2. Industrie tuile et brique – site Terreal à CHAGNY

- Récupération de chaleur avec échangeur en verre/teflon : 2 MW_{th} → chauffage air de 15°C à 125°C

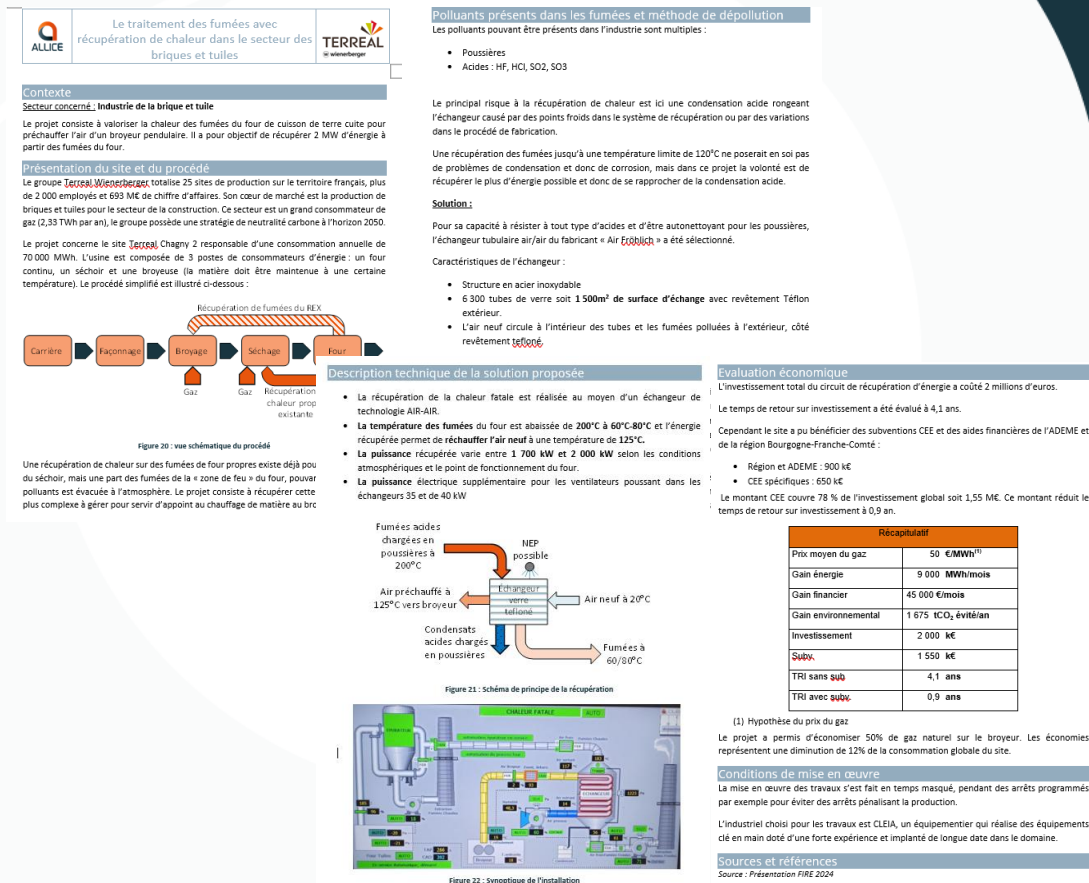


3. Incinérateur de déchets ménagers – KHK St Gallen - SOLVAIR

- Traitement des fumées avec récupération de chaleur supplémentaire → 100 GWh de chaleur économisée

IV. Les retours d'expérience de l'étude

Chaque REX fait l'objet d'une fiche REX incluse dans le rapport d'étude





V. CONCLUSIONS

V. Conclusion

Le choix de la technologie dépend de :

- Du type de polluant – acide, COV, poussières...
- Du niveau de température
- De la quantité d'énergie à récupérer
- De la présence d'un traitement d'eau
- Des puits de chaleur

Poussières	Acides	Composés Organiques Volatils (COV)
IAA : - Séchage - Cuisson	Acide chlorhydrique (HCl) - Valorisation Énergétique des déchets (UVE) - Ciment - Centrales électriques	IAA : - Séchage - Cuisson
Métaux : - Fusion - Traitement thermique	Oxydes de soufre (SOx) - Combustibles fossiles : fioul, charbon - Terre cuite - Ciment, chaux - Four verrier - Isolant (laine de verre par ex.) - Céramique - Métal	Métaux : - Traitement de surface - Peinture et polymérisation d'éléments métalliques
Matériaux non métalliques - Terre cuite - Ciment - Isolant (laine de verre par ex.) - Verre	Acide fluorhydrique (HF) - Terre cuite - Email - Four verrier	Matériaux non métalliques Isolant (laine de verre par ex.)
Autre Combustion biomasse		Autre - Utilisation de solvants : peintures collages, etc. - Combustion biomasse - Chimie

IAA	Cuissons, fritures	RTO T° sortie 300°C min	
	Séchage		Cyclone, Tmax 500°C
Matériaux	Terre cuite		Voie sèche + filtre à manche 200°C max
	Verre	RTO + Voie sèche + filtre à manche 200°C max	
	Laine de verre, de roche	RTO + Laveur T° sortie 50°C max	
	Chaux, ciment		Voie sèche + filtre à manche 200°C max
Métaux	Fusion		Electrofiltres, voie sèche + filtre à manche
	Peinture sur métal	RTO T° sortie 300°C min ou filtre à charbon actif	
	Traitement thermique		
	Traitement de surface		
		COV	Poussières Acides

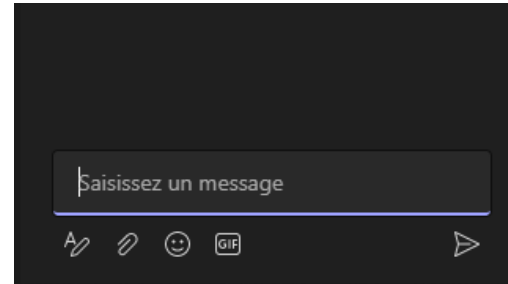
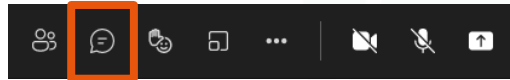
Regroupement des polluants en 3 familles

- Poussières
- Acides
- COV

V. Conclusion

- **Traitement de fumées uniquement :**
 - Protection de l'environnement (règlementaire)
 - Protection des personnes (règlementaire) → Nécessaire et obligation de traiter avant rejet dans l'atmosphère
- Récupération de chaleur « facultatif » dans la majorité des cas
- **Traitement de fumées + récupération de chaleur :**
 - 1. Volonté de l'industriel d'optimiser sa production
 - 2. Retour sur investissement intéressant dans quelques cas ($TRI < 5\text{ans}$)
 - 3. Volonté politique de l'industriel et de la ville à fournir de la chaleur excédentaire au réseau de chaleur urbain
- **Freins à la mise en œuvre de récupération chaleur :**
 - Coût d'installation et d'exploitation important
 - Traitement de fumée complexe pour certaine industrie → Risque de corrosion, colmatage...
 - Retour sur investissement trop important ($>15\text{ans}$)

Des questions ?



Actualités ALLICE

Vos prochains rendez-vous ALLICE :



7 mars

RDV Européen



13 mars

Journée technique
Décarbonation
Axelera - Tenerrdis -
Allice (Lyon)



20 mars

Décarbonation des
procédés de cuisson
et de séchage -
volet 2



25 mars

Visite site
TERREAL
(Chagny)



1 avril

Visite du LRGP
(Nancy)



3 avril

Forum national des
Eco-entreprises du
PEXE (Paris)



14-15 mai

MIX.E Salon du mix
énergétique neutre
(Lyon)



23 mai

RDV Européen



12 juin

Club PRIME
Réunion plénière



23-24 Sept

Congrès biennal
2025 (Paris)



20 novembre

Club PRIME
Réunion plénière

MERCI À TOUTES ET À TOUS !

Etude réalisée par :

- L'Houcine Bamghar, Benjamin Bruyere (CETIAT)

Etude pilotée par :

- Ilyas GAIN-NACHI – Alliance ALLICE - ilyas.gain-nachi@alliance-alice.com





Contacter ALLICE

contact@alliance-allice.com

+33 (0)4 72 44 49 11

www.alliance-allice.com

Alliance ALLICE
Chez CETIAT
25 Avenue des Arts
69100 Villeurbanne
FRANCE