28 ET 29 OCTOBRE
A DIJON

17ÈME COLLOQUE
CIBE
Energie des territoires
BOIS-ÉNERGIE

COLLOQUE

Le Bois-énergie : Une dynamique de l'innovation



AVEC LA CONTRIBUTION DE

FEDERREC HARGASSNER SAVEN

AVEC LE FINANCEMENT DE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

ADEME
AGENCE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

RÉGION BOURGOGNE FRANCHE COMTE

EN PARTENARIAT AVEC

atee ASSOCIATION TECHNIQUE ENERGIE ENVIRONNEMENT

BIOenergie international

CFP CHAUD • FROID • PERFORMANCE

FORESTOPIC

GC GÉNIE CLIMATIQUE MAGAZINE

LE JOURNAL DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

ThermPresse média

Innovation technologique

Un condenseur – laveur pour mieux récupérer la chaleur et capter les polluants

Programme R&D
Recup'EFFI financé à 70% par l'ADEME

idex
VALORISER LES ÉNERGIES

CEDEN
CABINET D'ÉTUDES SUR LES DÉCHETS ET L'ÉNERGIE

TERRAO
LA POLLUTION N'A PLUS D'AVENIR



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 :

CEDEN

TERRAO
LA POLLUTION N'A PLUS D'AVENIR

Laboratoire Cobra
Chimie Organique Bioorganique Réactivité et Analyse
C2I Orga
Centre d'Innovation et d'Ingénierie

idex
VALORISER LES ÉNERGIES

UMR 6614 CORIA
COMPLEXE DE RECHERCHE INTERPROFESSIONNEL EN AEROTHERMOCHIMIE

Installation caractérisée : Chaufferie bois de MADRILLET Energie

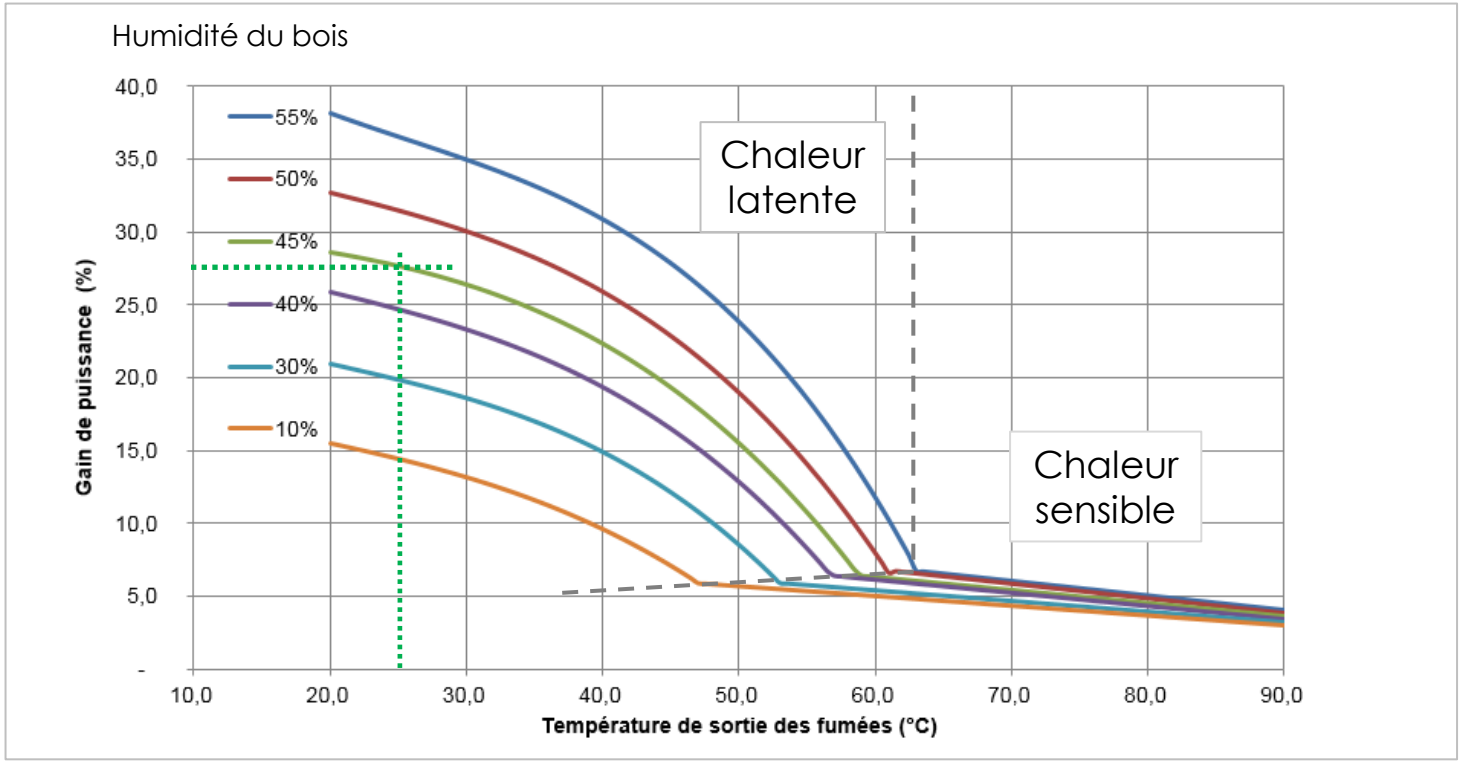
Projet d'extension signé en 2020 de 28 à 40 GWh/livrés/an

- ❑ Réseau de chaleur de chaleur : passage de 5,8 à 10,0 kmL
- ❑ Maintien du taux EnR (90 %) par la mise en place d'un condenseur laveur (10 à 13 MW)
- ❑ Rénovation de toutes les sous-stations (Régulation, Vannes PICV…)

Sommaire

1) Qu'est ce que la condensation ?
2) Efficacité de la récupération thermique
3) Efficacité environnementale
4) Atouts , limites et perspectives

Rappel sur la condensation



1) Formule de la combustion

$$CH_{1,44}O_{0,66} + 9{,}8\ Air \rightarrow CO_2 + 0{,}72\ H_2O + 7{,}74\ N_2 + 1{,}03\ O_2$$

2) L'évolution de l'efficacité de de récupération de la chaleur est fonction de la **température de la source froide**, de **l'humidité du bois** et du **taux d'O2** dans les fumées

3) Plus **l'humidité du bois** est **forte**, plus le **point de rosée** est **élevé** : **H 50 % → $T_{rosée}$ = 61 °C**

H 35 % → $T_{rosée}$ = 55 °C

H 10 % → $T_{rosée}$ = 47 °C

4) Avec une source froide à 25 °C, le **gain de puissance pour un bois à 45 % d'humidité** de l'ordre de **+ 27,5%**

5) Très souvent, le condenseur permet aussi de **récupérer de la chaleur sensible** non valorisée des fumées

Condenseurs de fumées biomasse – patrimoine IDEX

Chaine de valorisation énergétique



Chaudière Biomasse (2)
10 MW

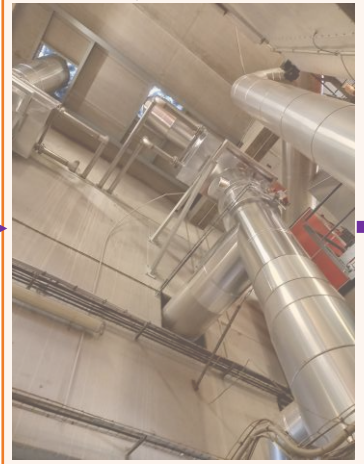
160 °C



Multicyclone (2) + Filtre à manches (2)

160 °C

+ 0,6 MW



Economiseur (2)

110 °C

+ 2 MW



Condenseur TERRAO (2)

30 °C

25 °C

30 °C



Groupe Froid Trane (3)

+ 3 MW

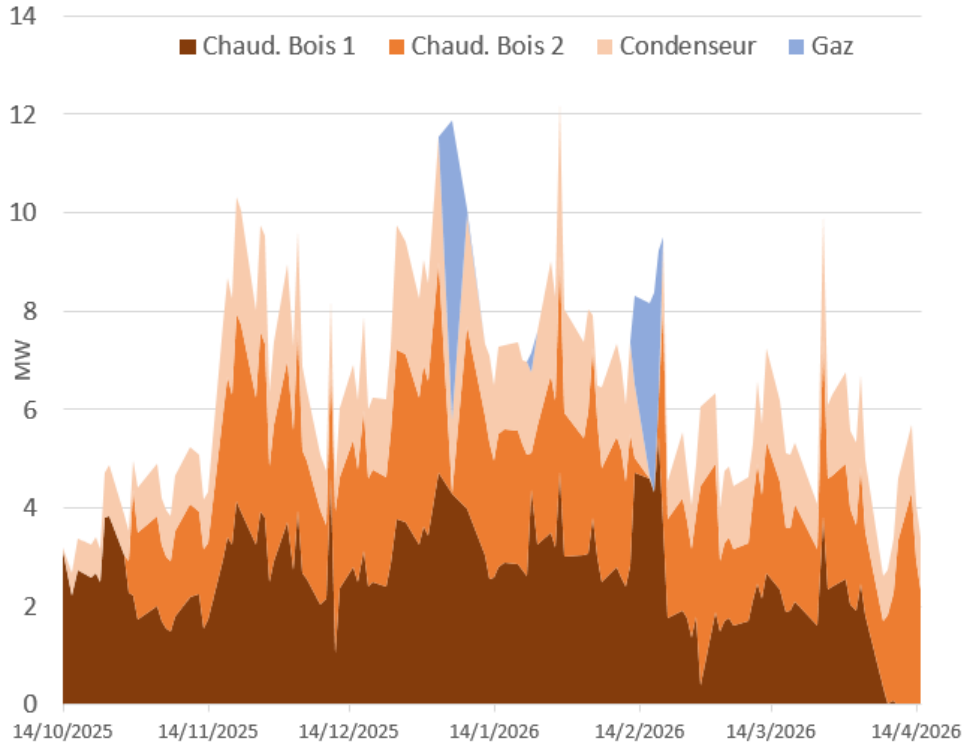
70 °C

55 °C

+ 3,6 MW

Madrillet Energie - Efficacité de la récupération thermique

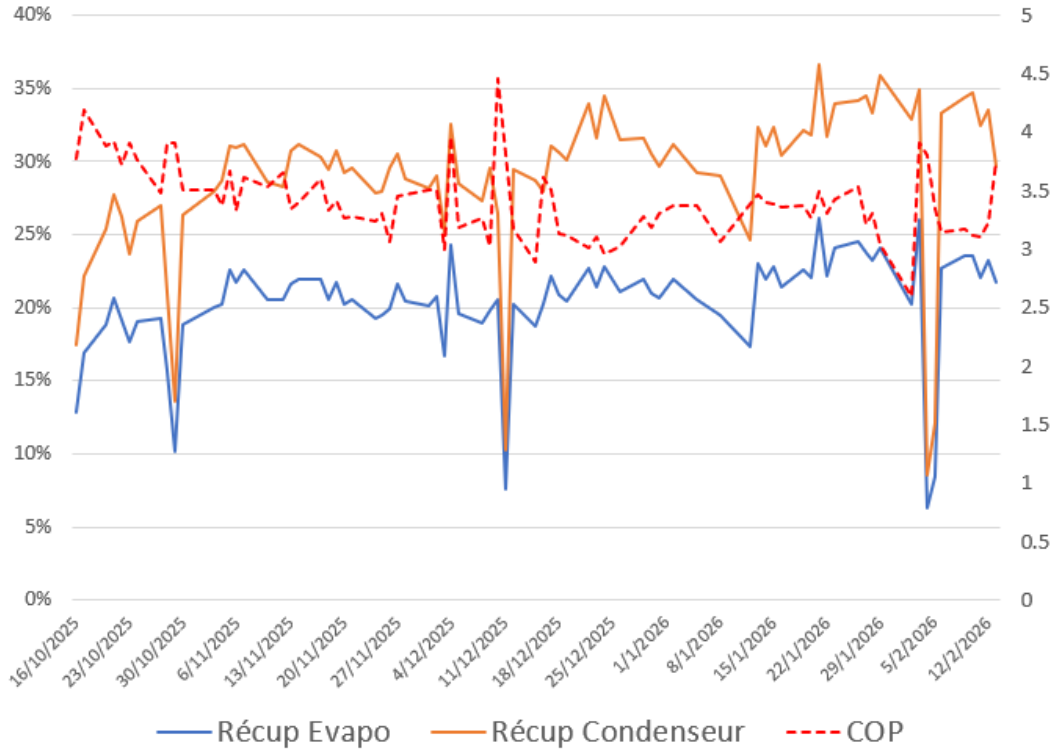
Contribution à la production thermique – 2025/2026



Mixité de production



Performance de récupération thermique sur condenseur



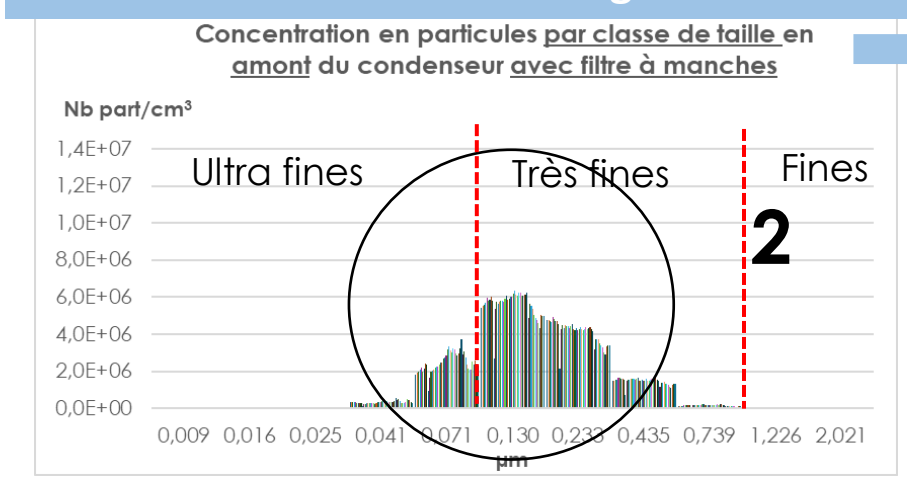
Taux moyen de récupération : **22%**
Taux moyen de valorisation énergétique via GF : **31 %**
Coefficient de performance (COP) : **3,3 en moyenne**

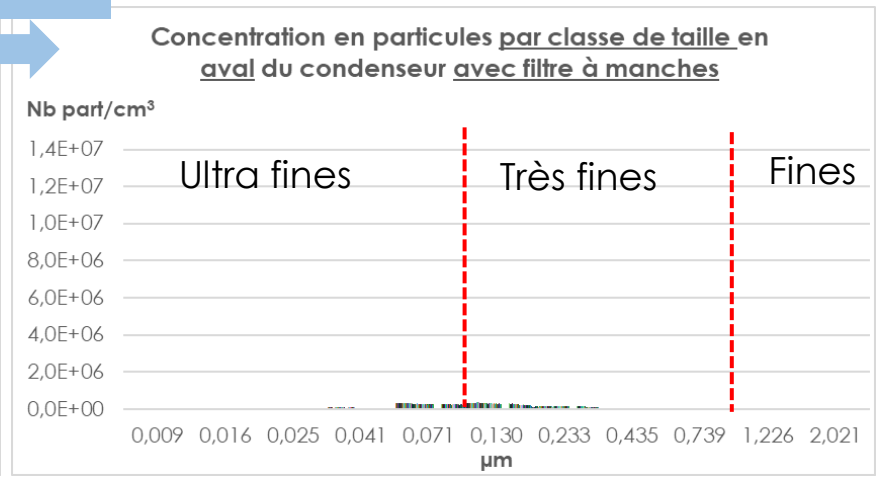
Levier d'optimisation technico-économique

- ❑ **Abaissement des températures de retour réseau et régime plus bas (passage de 30 °C à 27 °C, voire 25 °C)**
- ❑ **Contrôle de combustion (abaissement du taux d'O_2)**

Madrillet Energie – Efficacité environnementale sur les particules inférieures à 10 µm

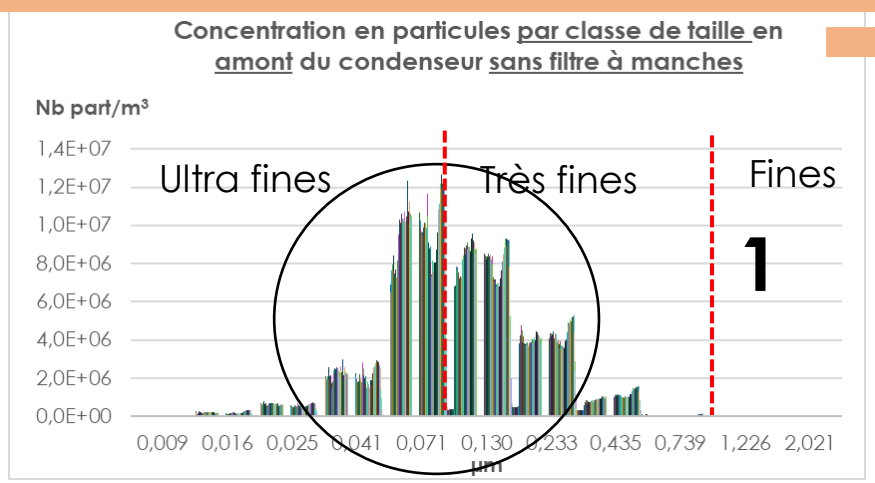
Avec filtre à manches dans la gamme

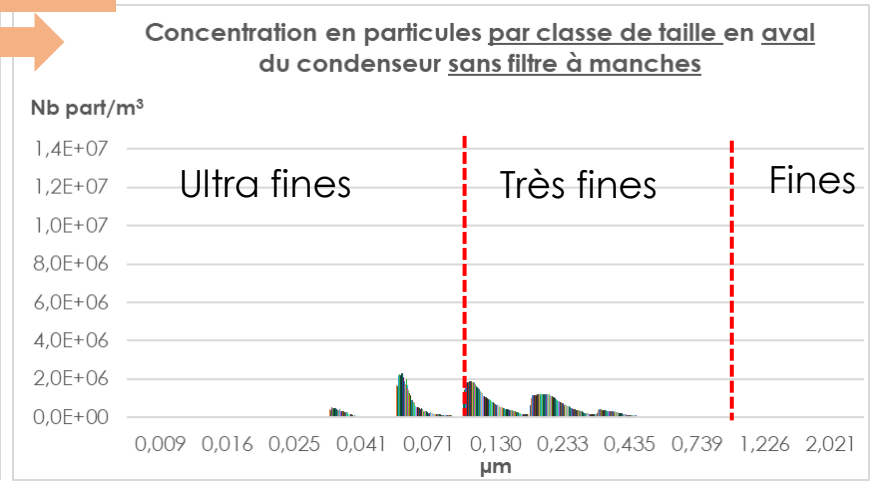




3

Sans filtre à manches dans la gamme





Les particules sont classées par **taille granulométrique** :

- Les très grosses : > 10 µm
- Les grosses : 2,5 – 10 µm
- Les fines : 1 – 2,5 µm
- Les très fines : 0,1 – 1 µm
- Les ultrafines : < 0,1 µm

Les **ultrafines** sont les plus **nocives pour la santé humaine**.

- Ces graphiques mettent en lumière l'efficacité des systèmes de traitement des fumées pour les particules de moins de 10 µm

Madrillet Energie – Efficacité environnementale sur les particules fines et ultra fines

Emissions particulaires totales (en mg/Nm³ à 6% O_2)

Avec filtre à manches

68 → FAM → 4,3 → Condenseur → 2,2

Abattement total de **97 %**

Sans filtre à manches

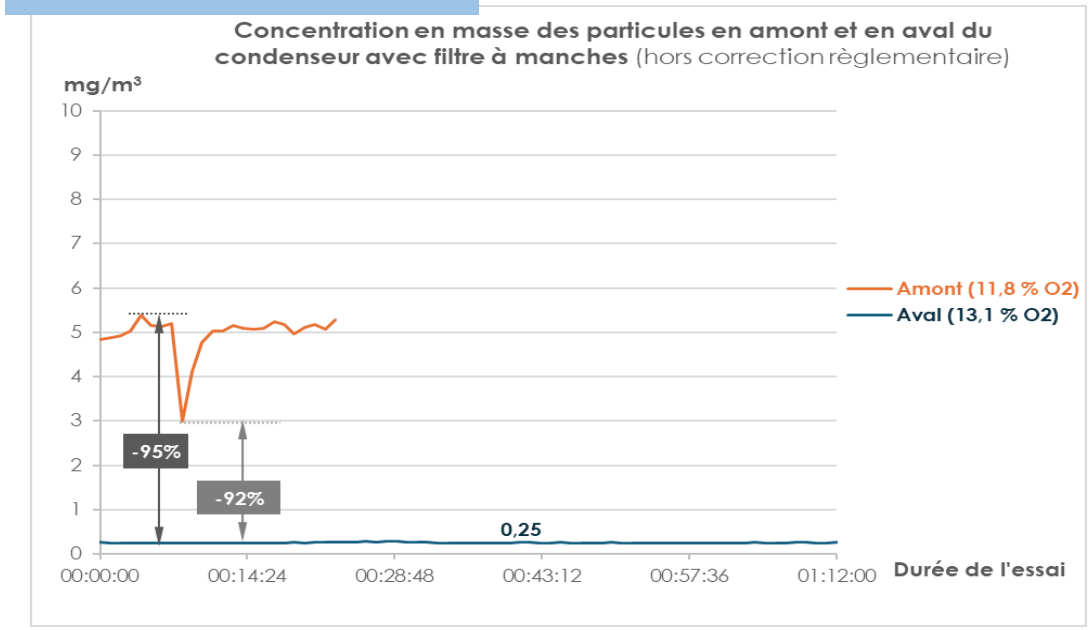
68 → Condenseur → 14

Abattement total de **80%**

Appareil de mesure : un ELPI (dénombrement jusqu'à 10 µm) et un PPS (masses 0-10 µm).

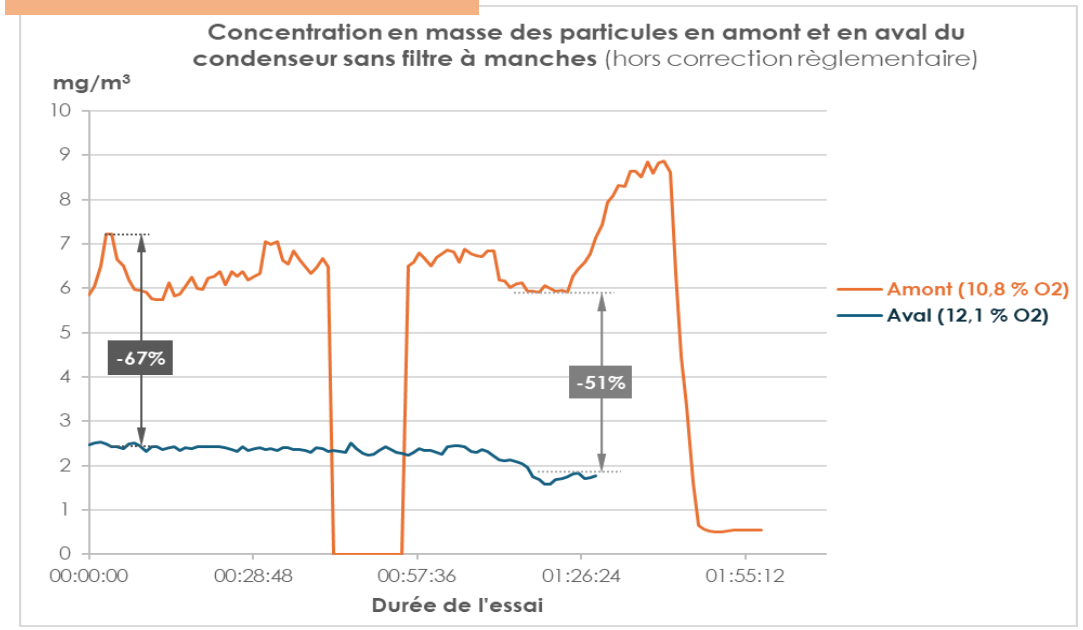
Efficacité du condenseur sur les particules inférieures à 10 µm

Avec filtre à manches



Abattement de **92 à 95 %**

Sans filtre à manches



Abattement de **51 à 67%**

Madrillet Energie – Efficacité environnementale sur les autres polluants

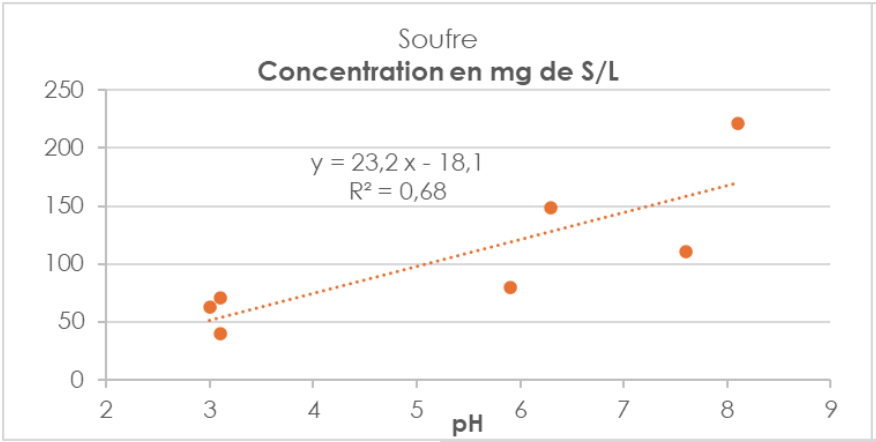
❑ Dans les Fumées

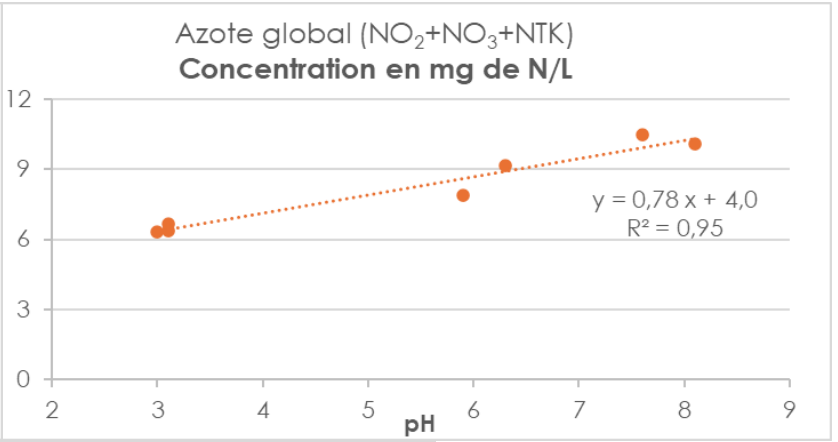
Taux d'abattement

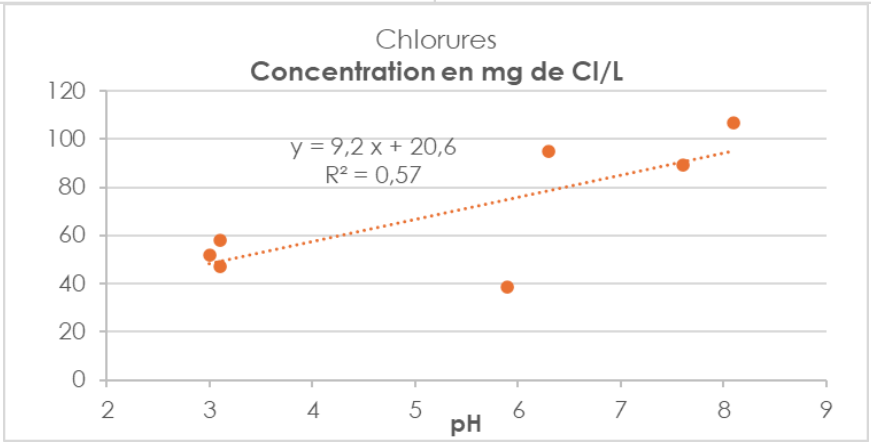
- SO_2 17 à 65%
- HCl 13 à 95%
- NOx 11 à 14%
- CO 50 à 67%
- CH_4 80 à 100%
- COVT 26 à 50%

❑ Dans les condensats

- Des concentrations **croissantes avec l'augmentation du pH**







Bilan et perspectives

Facteurs favorables à la mise en place d'un condenseur

❑ Amélioration du rendement et valorisation de la biomasse

- Récupération des chaleurs sensible et latente des fumées ; davantage de chaleur renouvelable pour une même quantité de bois.
- Réduction des consommations de bois

❑ Sur une chaufferie existante

- **Amélioration du taux EnR&R** et report possible d'investissements de production lors d'extensions du réseau
- **Abattement complémentaire des polluants** pour contribuer au respect de seuils d'émission plus exigeants
- **Valorisation des équipements existants** sans remplacement systématique des chaudières

❑ Sur un nouveau projet

- **Acceptabilité sociale** : très faibles émissions de poussières par l'association filtre à manches (FAM) et condensation.
- **CAPEX** : possibilité d'optimiser le FAM (objectif amont 20 plutôt que 5 mg/Nm³), sous réserve des garanties en cheminée
- **OPEX :** réduction des achats de bois et des appoints fossiles ; dimensionnement optimisé dès la conception
- **Optimisation financière (CEE et subvention Fonds Chaleur)**

Bilan et perspectives

Les problématiques environnementales

- **La condensation …**
  - **… produit de l'oxygène (+10 à 11 %)**
  - **… capte simultanément 20 à 24 % de du CO_2**

} **La proportion d'O_2 dans les fumées augmente**

Conséquences :
Les teneurs en polluants contenus dans les fumées sont ramenées à 6% d'O_2. Dans des fumées dont le taux d' O_2 est élevé (+1,7%), **les teneurs en NO_x, CO, SO_2, 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 CO_2 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 CO_2, **cette contribution pourrait être valorisée à hauteur de 1 150 000 €, soit 44% du montant de**

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