

**Quel est l'intérêt de récupérer la
chaleur latente des fumées issues de
la combustion du bois ?
Caractérisation de la technologie
TERRAO**

**Déc.
2025**

Projet Récup'EFFI

Sommaire

1	Présentation du Programme RécupEFFI	2
1.1	Contexte.....	2
1.2	Présentation de la chaufferie biomasse de MADRILLET Énergie (76)	2
1.3	Principe du système de condensation des fumées et de valorisation énergétique	3
2	Démarche expérimentale et méthodologie.....	5
2.1	Organisation des essais.....	5
2.2	Paramètres analysés.....	5
3	Résultats principaux.....	5
3.1	Performance énergétique du condenseur.....	5
3.2	Efficacité environnementale du condenseur	6
3.2.1	Amélioration de la qualité des émissions	7
3.2.2	Captation du carbone et production d'oxygène.....	10
3.3	Gestion des effluents et sous-produits.....	10
4	Enseignements du programme Récup'EFFI	11
4.1	Atouts de la technologie TERRAO	11
4.2	Perspectives de déploiement et axes de recherche futurs	12
4.3	Points de vigilance.....	12
5	Conclusion	13

1 Présentation du Programme Récup'EFFI

1.1 Contexte

La combustion du bois génère d'importantes quantités de vapeur d'eau, issues à la fois de l'humidité intrinsèque du combustible et de sa dégradation thermochimique. Dans les chaufferies biomasse conventionnelles, l'essentiel de la **chaleur sensible est récupéré** par l'échangeur de la chaudière, et parfois, par un économiseur. En revanche, la **chaleur latente contenue dans la vapeur d'eau des fumées est le plus souvent perdue**.

La condensation des fumées permet de récupérer cette énergie et d'améliorer significativement le rendement global des installations biomasse. En 2020, la France comptait **36 unités de condensation** installées en aval de chaudières bois, deux grandes familles de technologies étant développées :

- Les procédés **par voie sèche**, reposant sur des échangeurs air/eau ;
- Les procédés **par voie humide**, mettant en œuvre des échangeurs eau/eau.

Usuellement, les technologies par voie humide s'appuient sur une pulvérisation des condensats dans les fumées. Il en résulte un abaissement de la température et une saturation en eau des fumées, ce qui conduit à un changement d'état de l'eau qu'elles contiennent.

La technologie **TERRAO**, développée par la société STARKLAB, appartient à cette seconde catégorie. Elle présente un **caractère innovant** par l'**échange turbulent des fumées dans un lit de condensats**. Ce dernier favorise à la fois la **récupération de la chaleur latente** et le **lavage des fumées**. En l'absence de pulvérisation de fines gouttelettes dans les fumées, il évite que l'installation soit classée sous le régime 2921 des ICPE¹.

Cette technologie a été peu caractérisée, en particulier en conditions industrielles réelles. Ce programme de R&D a ainsi été lancé afin d'évaluer ses performances au travers d'une campagne de mesures dédiée.

Le programme **Récup'EFFI** vise ainsi à évaluer la technologie de condensation **TERRAO** selon **trois axes complémentaires** :

- La **performance énergétique**, avec la récupération de chaleur fatale contenue dans les fumées et de ses incidences sur la consommation de biomasse et de gaz ou de fioul (énergies fossiles d'appoint) ;
- Les **effets sur la qualité des émissions atmosphériques**, en particulier l'abatement des particules fines et ultrafines, des polluants gazeux et des composés carbonés ;
- Les **perspectives de déploiement en France**, en analysant les conditions techniques, réglementaires et économiques nécessaires à l'intégration de cette technologie dans les chaufferies biomasse, notamment en contexte urbain.

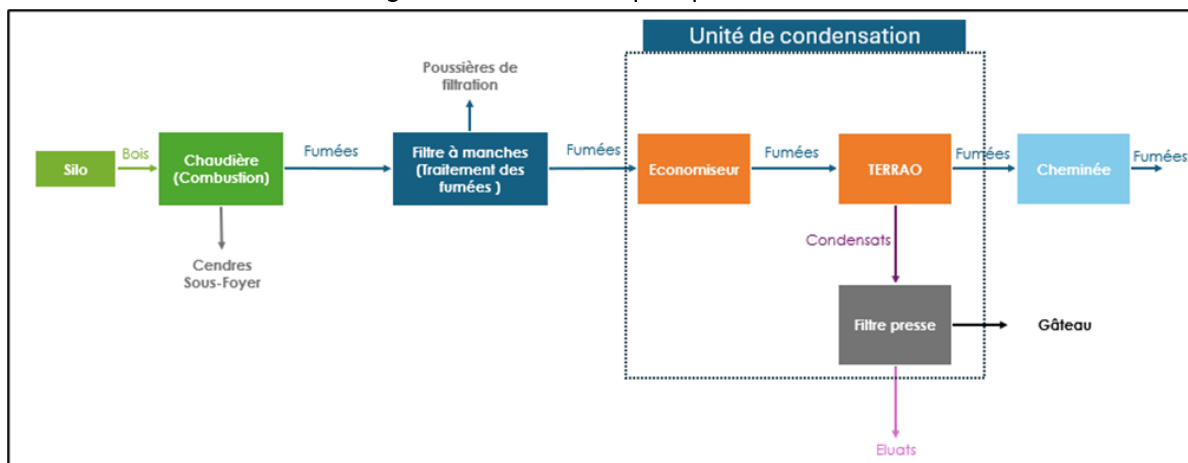
1.2 Présentation de la chaufferie biomasse de MADRILLET Énergie (76)

La chaufferie biomasse (2 × 5 MW, chaudières marque WEISS, 2009) exploitée par la société **MADRILLET Énergie** (filiale à 100% du groupe IDEX Énergies), est située à Saint-Étienne-du-Rouvray (Seine-Maritime). Cette installation alimente un réseau de chaleur urbain délivrant de l'ordre de 30 000 MWh/an, dont le concédant est l'ASL du Château Blanc. Ce réseau est en développement depuis le début de l'année 2021, avec un objectif de distribution de l'ordre de 42 000 MWh/an à court terme.

Afin d'augmenter la capacité de livraison de chaleur du réseau tout en maintenant un taux élevé d'énergies renouvelables, le site a été **doté fin 2023** d'une **unité de condensation** pour chacune des 2 lignes biomasse.

¹ ICPE : installations classées pour la protection de l'environnement

Figure 1 : Schéma de principe de l'installation



La caractérisation de la technologie TERRAO est réalisée sur un site industriel ancien soumis à des contraintes d'exploitation (travaux de maintenance programmés ou non, matériels plus ou moins usagés...). Avant les essais, il est ainsi apparu que :

- Le filtre à manches laissait passer de l'air parasite (en raison de son usure ou percement des tôles),
- Une (ou plusieurs) manche(s) était (étaient) potentiellement déchirée.

L'entrée d'air parasite a entraîné une dilution des polluants et une augmentation de la teneur en O₂ des gaz de combustion, l'interprétation des résultats nécessitant par conséquent une correction de la valeur de certains paramètres.

Figure 2 : Condenseur-laveur (à gauche) et groupe froid (à droite)



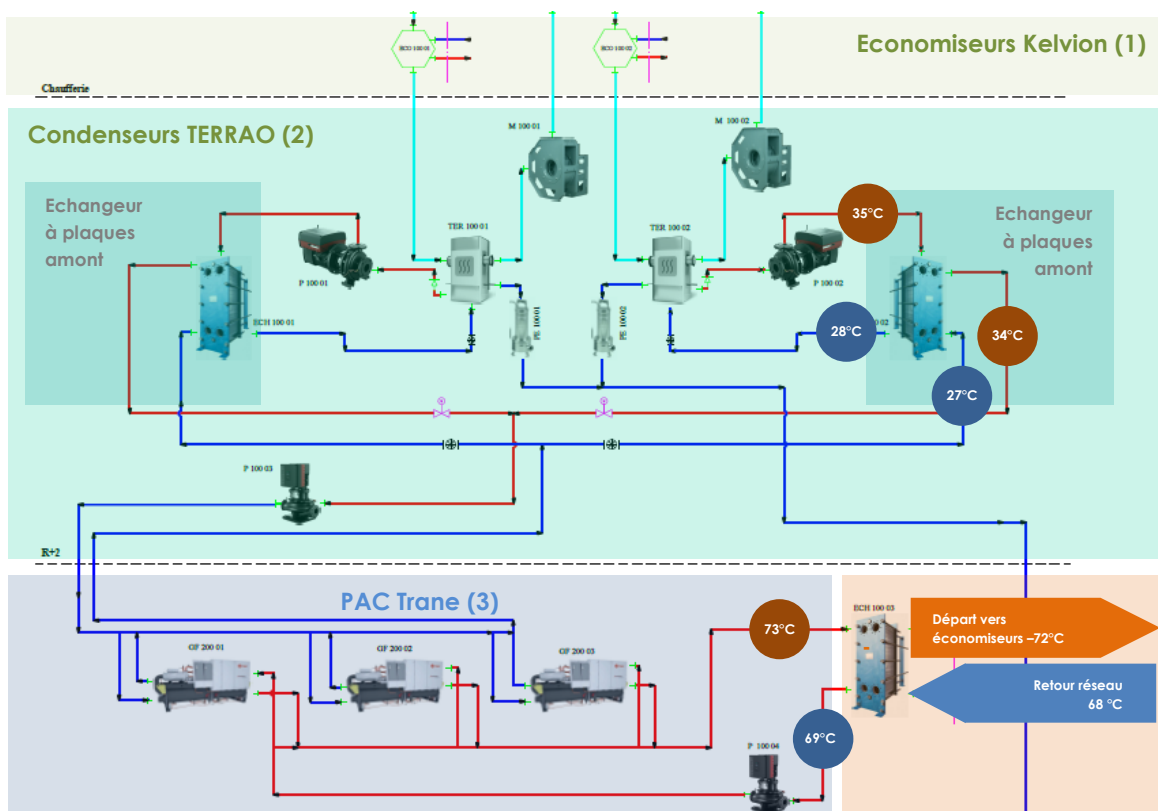
1.3 Principe du système de condensation des fumées et de valorisation énergétique

La technologie **TERRAO** appartient à la famille des procédés de condensation des fumées par voie humide. Elle repose sur un **échange thermique direct** entre **les fumées** issues de la combustion du bois **et un volume d'eau**, les condensats, sans aucune surface d'échange intermédiaire.

L'unité de condensation comprend :

- **Deux étages de récupération de chaleur contenue dans les fumées** (une ligne par chaudière biomasse), chaque étage étant composé d'un **économiseur** (marque KELVION-1) et d'un **condenseur** (marque TERRAO-2) ;
- **Un groupe froid** (3 PAC en série, marque TRANE-3), ayant vocation à réchauffer le fluide caloporteur du réseau de 4 °C et à refroidir les condensats d'environ 7 °C.

Figure 3 : Schéma de principe du condenseur-laveur sur la période du 8/11/2024 au 5/12/2024



Les fumées transitent, sous la forme de bulles plus ou moins grosses dans un milieu extrêmement turbulent, au sein d'un bac étanche rempli de condensats (excepté en phase de démarrage de l'unité). Ce mode de fonctionnement conduit à :

- Un **changement de phase de l'eau**, passant ainsi d'un état gazeux à une forme liquide. De l'ordre de 80 % de l'eau contenue dans les fumées sont ainsi récupérés à l'occasion de ce changement de phase (la teneur en eau des fumées passant de 20 % à 4 %). Le temps de séjour des gaz de combustion dans le bac est très faible (0,5 à 1,0 seconde) ;
- Un **transfert thermique rapide**, les fumées passant de 90/135 °C à moins de 35 °C. Les condensats se réchauffent de 7 °C et transfèrent, via un échangeur de barrage, ce contenu énergétique au système thermodynamique (3 PAC en parallèle) ;
- Un **lavage des fumées**, contribuant à la captation des particules fines et ultrafines, ainsi que de nombreux polluants gazeux minéraux et organiques piégées dans les condensats.

Après avoir retenu certaines substances minérales et organiques, les **condensats** présentent un pH très bas (3,0 à 3,5). Pour éviter la corrosion et autoriser un rejet dans le réseau d'assainissement, ils sont **neutralisés à l'aide d'une solution de soude** (pH cible de 5,5), laquelle joue un rôle chimique allant au-delà de la seule neutralisation de l'effluent.

Transférée par le **groupe froid**, la chaleur récupérée au niveau du condenseur-laveur a pour objectif d'augmenter l'enthalpie du fluide caloporteur du réseau de chaleur. Le fluide est ensuite réchauffé par l'économiseur, avant de rejoindre la chaudière biomasse. Le fonctionnement du condenseur-laveur et celui de la PAC sont indissociables, formant une chaîne intégrée de récupération et de valorisation de la chaleur fatale. A noter qu'en dessous de 55 à 62 °C (point de rosée des fumées, fonction notamment de l'humidité de la biomasse et du taux d'O₂ mesuré dans les fumées), le changement de phase de l'eau n'a pas lieu !

Enfin, les condensats chimiquement chargés sont dirigés vers un **filtre-presse**, qui retient les particules les plus grossières sous forme d'un **gâteau de filtration** concentré (dont la siccité s'élève à 35 %) et libère un **éluât** traité en

station d'épuration urbaine. À noter qu'une utilisation de l'éluât en remplacement de l'eau du réseau dans le bac à cendres pourrait être envisagée !

2 Démarche expérimentale et méthodologie

2.1 Organisation des essais

La caractérisation du condenseur-laveur s'est inscrite dans une démarche expérimentale combinant :

- Un **essai ponctuel** instrumenté, réalisé sur deux journées consécutives, les 13 et 14 mars 2024,
- Un **suivi au « long cours »**, destiné à évaluer les performances en conditions réelles d'exploitation, conduit de février 2024 à janvier 2025.

L'essai ponctuel a été conduit sur une seule des deux chaudières biomasse et dans le but de comparer les deux configurations de traitement des fumées :

- Un fonctionnement **avec le filtre à manches** en amont du condenseur ;
- Un fonctionnement **en bypassant le filtre à manches**.

L'objectif est d'évaluer la capacité intrinsèque du condenseur-laveur à assurer la dépollution des fumées.

2.2 Paramètres analysés

La méthodologie a été élaborée de façon à procéder à des bilans à différentes étapes de la chaîne de combustion de la biomasse :

- Le **bilan énergétique** : puissances récupérées à l'économiseur, au condenseur et aux bornes du groupe froid, régimes de température, impact sur les consommations d'énergie d'appoint ;
- Le **bilan matière** (carbone, eau, particules fines et ultrafines, polluants gazeux, composés carbonés...) en cherchant à identifier les composants présents dans le **combustible bois**, puis à comprendre la dispersion de ceux-ci entre :
 - Les **cendres** (mélange cendres sous foyer/cendres multi-cycloniques, poussières de filtration),
 - Les **condensats**, et issus du traitement de ces derniers par le filtre-presse, les **éluâts** et **gâteaux de filtration**,
 - Les **émissions atmosphériques**.

Les prélèvements ont été réalisés par l'organisme de contrôle, **Bureau Véritas (BV)**, par **CEDEN** et **COBRA**, alors que les analyses ont été prises en charge par le laboratoire agréé d'analyses **EUROFINS** et par les **laboratoires de recherche CORIA** et **COBRA** pour les caractérisations fines des particules et des molécules carbonées. Les paramètres d'exploitation des installations ont été communiqués par **IDEX Energies**. Un bilan est synthétisé ci-dessous.

3 Résultats principaux

3.1 Performance énergétique du condenseur

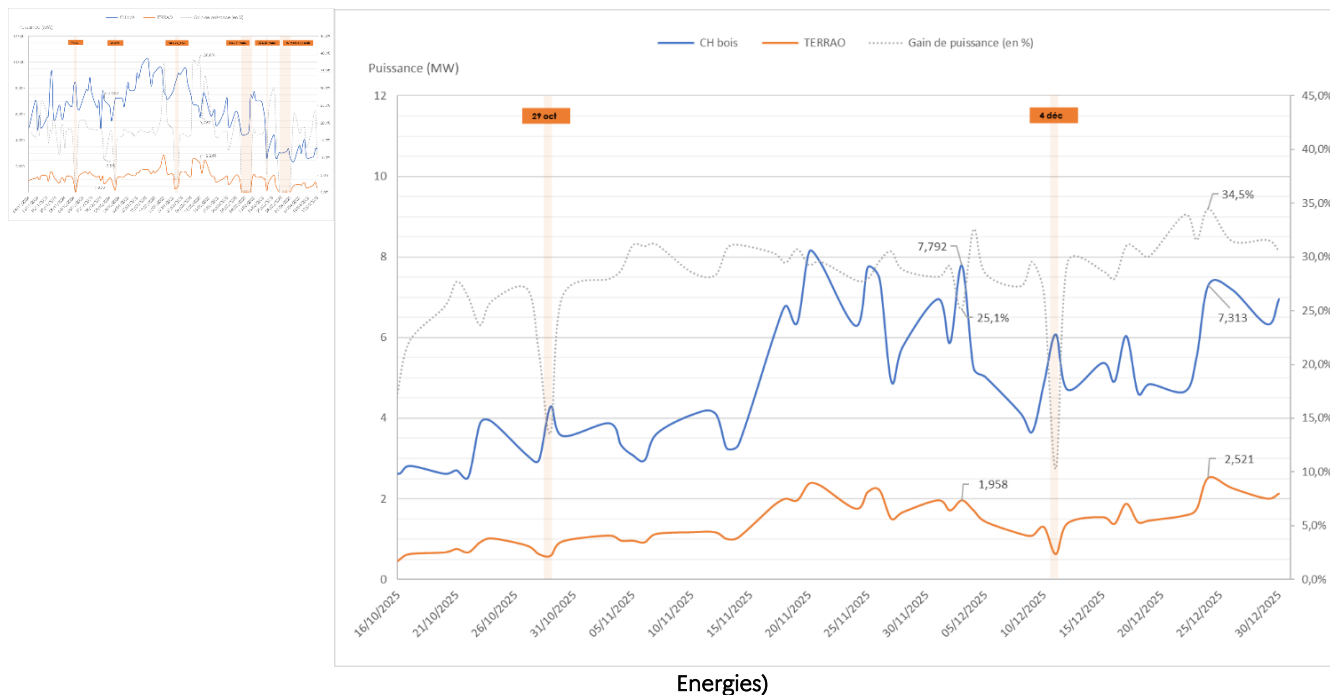
Les résultats mettent en lumière une **amélioration significative de la performance énergétique globale** de la chaufferie biomasse.

Durant les deux journées de suivi, le rendement moyen de l'installation était de 109 %. Toutefois, les températures de retour du réseau de chaleur étaient très élevées durant l'essai (70 à 72 °C) ; il en a résulté un COP² moyen extrêmement dégradé évalué à 2,0 (de 1,9 à 2,7).

Le bilan énergétique a finalement été bâti sur les données de la saison de chauffe 2024/2025 ; les relevés de la saison précédente (2023/2024) n'étaient pas disponibles, le constructeur du groupe froid (TRANE) n'ayant pas accordé à IDEX Energies un libre accès aux données d'exploitation durant la phase de mise au point des PAC.

² Le COP (COefficient de Performance) est un indice qui permet d'évaluer la quantité d'énergie produite par pompe à chaleur, par rapport à la quantité d'énergie qu'elle consomme. Le COP représente le nombre de kWh de chaleur produite pour 1 kWh d'électricité utilisée.

Figure 4 : Suivi de l'efficacité de la récupération de chaleur sur les fumées (Source : CEDEN, d'après données d'IDEX)



Durant les premiers mois d'exploitation (jusqu'en janvier 2025), un seul condenseur a été exploité et les quatre premiers mois de l'année 2025 ont été consacrés à divers ajustements techniques (cf. graphique de gauche). Durant cette période, la disponibilité du TERRAO est estimée à 87,7 % seulement et le COP moyen, à 3,4.

À compter du mois d'octobre 2025, les constats sont les suivants avec les deux condenseurs en fonctionnement :

- Le complément de puissance thermique est corrélé à l'allure de la chaudière. Globalement, il s'est situé entre 2,0 et 2,5 MW sur les mois de novembre et décembre. Le **gain de puissance est en moyenne de 28,4 %** (condenseur uniquement, hors économiseur), soit + 1,42 MW pour une puissance moyenne de la chaudière de 6,18 MW ; hors arrêts techniques, il fluctue de 25,1 à 34,5 %.
- Le **COP** de l'installation (hors économiseur) fluctue entre 2,9 et 4,5, avec **une moyenne à 3,3**. Il dépend étroitement des températures de retour « réseau ». Le COP est plus stable, mais IDEX Energies a l'ambition d'atteindre un COP moyen annuel de 4,0.
- Le rendement de la chaufferie biomasse durant les essais se situait en moyenne à 76 % (ce qui reste faible). Le condenseur-laveur porte le rendement de la chaufferie biomasse **à 97,2 %, soit une augmentation de 21,5 %**. Ce rendement pourrait être amélioré par la remise en service des économiseurs (hors service depuis avril 2024 en raison de leur sous dimensionnement). À noter cependant que les rendements ont été ponctuellement évalués, les 13 et 14 mars, respectivement à 114,7 et 107,5 %.
- La **disponibilité moyenne** de l'équipement est de l'ordre **de 98 %** sur cette période.

Ces résultats soulignent l'intérêt technique de la condensation des fumées, qui est un levier d'optimisation énergétique constituant la base de l'intérêt économique de cette technologie. Mais son intérêt réside également dans sa contribution au traitement des fumées.

3.2 Efficacité environnementale du condenseur

L'efficacité environnementale du condenseur a été appréciée au regard de l'amélioration de la qualité des émissions atmosphériques, laquelle a été mesurée en amont et aval de l'unité. Par principe, cette amélioration se traduit par un transfert de substances vers les condensats ; ceux-ci ont par conséquent été caractérisés par EUROFINs et par le COBRA.

3.2.1 Amélioration de la qualité des émissions

3.2.1.1 Abattement des particules

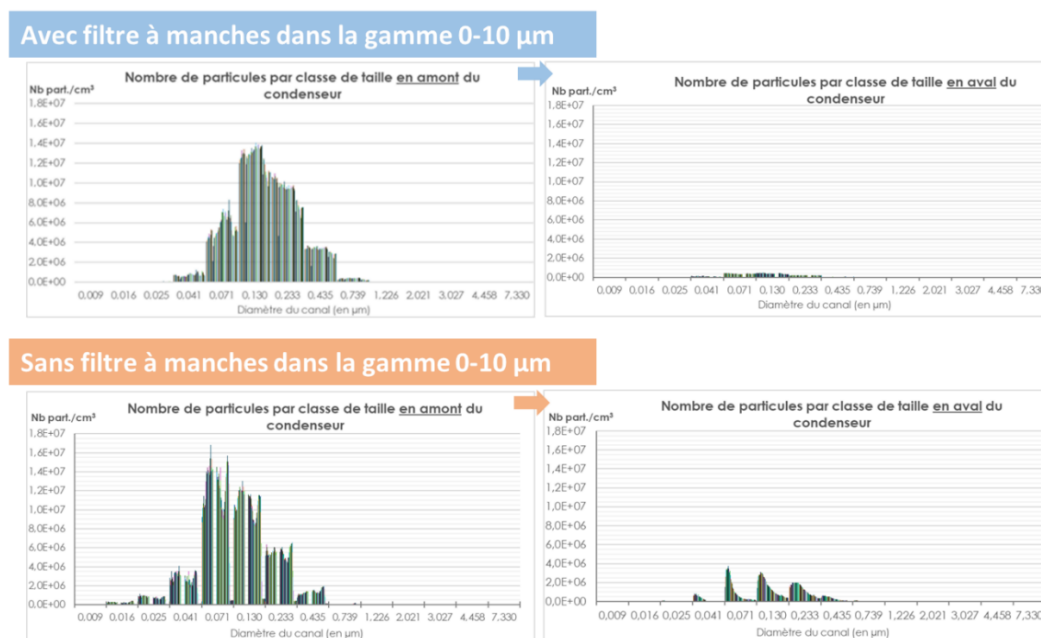
En matière de particules, trois granulométries méritent d'être distinguées :

- Les **particules grossières**, dont le diamètre est supérieur à 10 μm ,
- Les **particules fines**, dont le diamètre est inférieur à 10 μm ,
- Les **particules ultrafines**, dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm .

➔ Approche en fonction du nombre de particules fines et ultrafines

Si les particules fines et ultrafines ne représentent qu'une **faible proportion de la masse totale** des particules émises, elles sont reconnues pour leurs **effets sanitaires particulièrement préoccupants**, en raison de leur capacité à pénétrer profondément dans les voies respiratoires et dans l'organisme. Sur les graphiques de la figure 5, chaque histogramme correspond à la moyenne de 5 minutes d'observation et chaque classe est nommée par le diamètre (en μm) du canal traversé par les particules. Les mesures ont été réalisées en présence du filtre à manches (FAM³) le 13 mars 2024 et on le bypassant le 14 mars 2024. Notons que les particules supérieures à 10 μm sont écartées de la présente analyse.

Figure 5 : Distribution des particules fines et ultrafines en amont et en aval du condenseur (CEDEN, d'après CORIA⁴ - matériel utilisé : ELPI)



Premier constat. Le débit de particules est sensiblement identique et respectivement de 295 000 et 235 000 particules/seconde. La présence de microdéchirures des manches pourrait expliquer un débit supérieur avec le FAM. Le gâteau à la surface des manches forme néanmoins un média filtrant efficace pour les ultrafines. Le profil des graphiques de gauche est assez différent, sans doute lié à la qualité des combustibles utilisés.

Deuxième constat. Le condenseur-laveur capte une part importante des particules ultrafines et fines, et avec une meilleure efficacité que le filtre à manches (écart entre les deux graphiques du bas).

Troisième constat. La conjugaison des deux technologies (FAM et condenseur) aboutit à un niveau remarquable de réduction des particules fines et ultrafines (écart entre les deux graphiques du haut).

³ Les manches sont efficaces pour les diamètres minimaux de 0,01 à 0,03 μm , alors que l'efficacité du condenseur-laveur dépend de la pression partielle, de la nature et de la constante de Henry de chacun substance, d'un côté, et du volume d'eau, de l'autre.

⁴ Les données CORIA ont été corrigées pour tenir compte des conditions de prélèvement (dépression en amont et pression atmosphérique en aval).

➤ Approche en masse

Les flux massiques des particules, toutes tailles confondues, ont été caractérisés par Bureau Véritas. Dans le tableau suivant, les données ont été corrigées pour tenir compte de l'augmentation des teneurs en O₂ des fumées ; rappelons que ces augmentations résultent d'un défaut d'étanchéité du FAM (entrée d'air parasite estimé à 45 % des flux de gaz et comprenant 21 % d'O₂) et de la production apparente d'O₂ lors de la condensation (8,0 à 8,5 % en masse)⁵. Les teneurs figurant dans le tableau ci-dessous ont été corrigées en tenant compte des deux constats précédents.

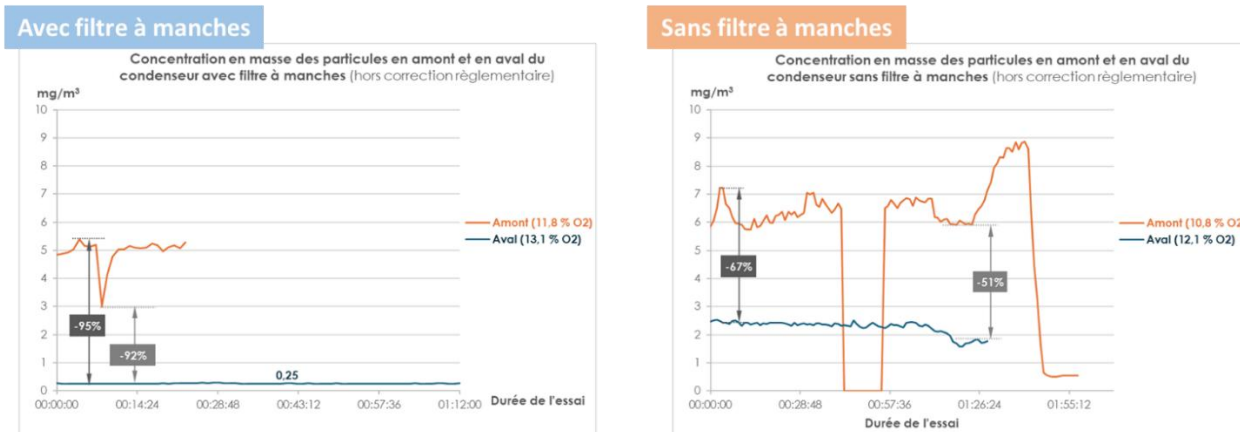
Figure 6 : Teneur en particules - source : Bureau Véritas (BV)

	Avec FAM (13 mars 2024)			Sans FAM (14 mars 2024)		
	Valeurs BV		Valeur corrigée	Valeurs BV		Valeur corrigée
	mg/m ³ de gaz	mg/Nm ³ à 6% O ₂		mg/m ³ de gaz	mg/Nm ³ à 6% O ₂	
Avant condenseur	5,6	8,74	4,3	37,6	67,7	67,7
Après condenseur	2,9	4,25	2,2	18,9	33,2	13,7
Abattement	-48%	-51%	-48%	-50%	-51%	-80%

Selon BV, l'abattement est identique avec et sans filtre à manches (-51 %). Néanmoins, après correction des valeurs aval, l'abattement apparaît moins marqué lorsque le filtre à manches est en service (-48 %) que lorsqu'il est by-passé (-80 %), les émissions restant néanmoins plus élevées dans la seconde configuration de fonctionnement.

La présence du FAM en amont du condenseur contribue à améliorer l'efficacité globale du traitement des fumées. La concentration massique particulaire obtenue par le produit du nombre de particules par catégorie et la masse volumique particulaire a été déduite des mesures réalisées par le CORIA (Figure 7).

Figure 7 : Concentration massique des particules en amont et aval du condenseur (CEDEN : d'après données CORIA – matériel utilisé : PPS)



Premier constat. En présence d'un FAM, la quasi-totalité des poussières contenues dans les fumées sont composées de particules fines ou ultrafines (concentrations BV et CORIA quasi identiques). En l'absence de FAM, celles-ci représentent en revanche de 20 à 25 % des poussières ; la concentration inférieure à 40 mg/m³ de gaz de combustion peut être mise en relation avec l'encrassement accéléré de l'économiseur constaté le 2^{ème} jour (jouant ainsi un rôle de filtre).

Deuxième constat. En présence d'un FAM, le condenseur-laveur assure un **abattement complémentaire de 92 à 95 % des particules fines et ultrafines**, conduisant à des niveaux d'émissions de l'ordre de **0,25 mg/Nm³**.

Troisième constat. Le condenseur-laveur peut être assimilé à un équipement de traitement des fumées (teneurs inférieures à la VLE⁶). Compris entre **51 et 67 %**, l'abattement reste notable avec des émissions limitées entre **2 à 3 mg Nm³ de particules fines ultrafines**. Parallèlement, le condenseur-laveur a capté de l'ordre de **80 % des particules plus grosses (>10 µm)**.

⁵ Cette dernière observation mériterait d'être confirmée à l'occasion d'investigations complémentaires.

⁶ VLE : Valeur limite d'émission (terme réglementaire)

En conclusion, le **condenseur-laveur TERRAO** présente une **efficacité élevée sur les particules fines et ultrafines**. Ce dispositif contribue significativement à l'amélioration de la qualité des émissions atmosphériques, y compris dans des configurations de fonctionnement dégradées.

3.2.1.2 Effets du Condenseur-Laveur sur les polluants gazeux

Le condenseur-laveur de fumées exerce un effet mesurable sur certains polluants gazeux, avec des niveaux d'abattement variables selon la forme physico-chimique sous laquelle se présentent les composés. Pour certaines substances, les analyses de fumées ne révèlent pas de différence entre l'amont et l'aval du condenseur, alors que leurs présences, souvent à l'état de traces, ont été décelées dans les condensats.

Les gaz « acides »

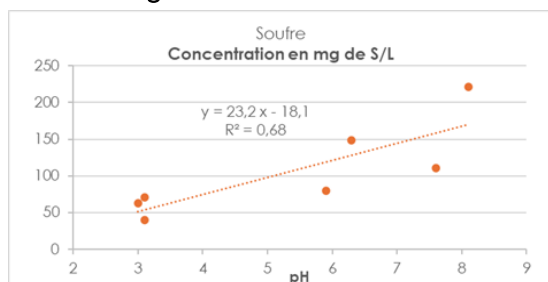


Figure 8 : Évolution de la concentration en soufre des condensats en fonction du pH

Pour le **dioxyde de soufre (SO₂)**, un **abattement** des teneurs compris **entre 17 et 65 %** est observé entre l'amont et aval du condenseur. Ce comportement est cohérent avec la bonne solubilité du SO₂ dans l'eau, favorisant son transfert vers la phase liquide lors du lavage des fumées.

Le **chlorure d'hydrogène (HCl)** présente les **taux d'abattement** les plus élevés, **compris entre 13 et 95 %** dans les conditions normales de fonctionnement.

Les NOx

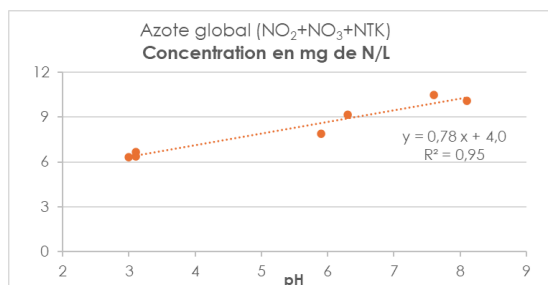


Figure 9 : Évolution de la concentration de l'azote des condensats en fonction du pH

Les NOx contenus dans les fumées proviennent probablement peu de l'air (N₂)⁷, mais de la composition de la biomasse.

Concernant les **oxydes d'azote (NOx)**, le condenseur aboutit à un **abattement** plus limité, **compris entre 11 et 14 %**. Cette réduction modérée est cohérente avec la faible solubilité des NOx et

confirme que le condenseur-laveur ne se substitue pas à des dispositifs dédiés de réduction des NOx (SNCR ou SCR), mais peut contribuer à une réduction partielle des émissions. Néanmoins, un pH élevé a un effet positif sur les NOx (abattement supplémentaire de 80 % en passant d'un pH de 3 à 7-8).

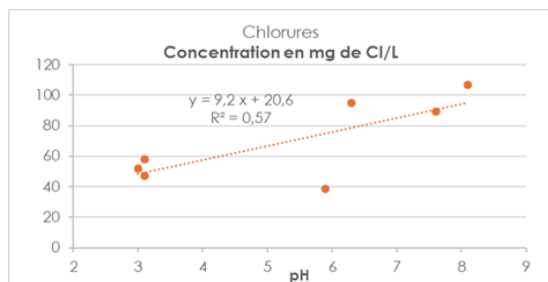


Figure 10 : Évolution de la concentration en chlore des condensats en fonction du pH

Cette large plage de variation s'explique par le caractère fortement soluble de l'acide chlorhydrique, dont la captation est directement liée aux paramètres de fonctionnement du condenseur-laveur et à la gestion du pH des condensats.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment que les fonctions du condenseur-laveur agit prioritairement sur les polluants gazeux

hydrosolubles, tandis que son effet sur les gaz faiblement solubles reste limité. À noter que plus la charge de polluants est élevée en amont et plus les teneurs en aval sont élevées : le niveau de captation dépend du temps de séjour des fumées dans le condenseur, de la pression partielle, de la température et des propriétés intrinsèques de chaque gaz (constante de Loi de Henry³).

⁷ La formation de NOx thermiques dépend principalement de la température : en dessous de 1 300 °C, elle est quasi nulle, tandis qu'au-dessus de 1 550 °C, elle est rapide et continue. Or, la température atteinte dans l'enceinte de la chaudière ne dépasse pas les 1 000 °C.

➡ Les métaux lourds, HAP et dioxines/furanes

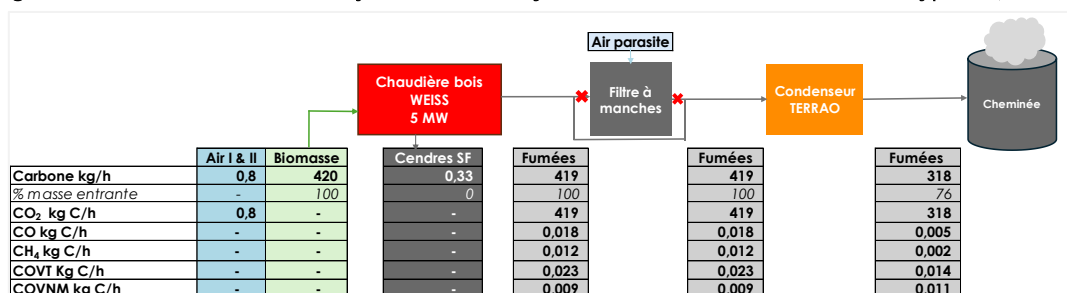
Les bilans massiques réalisés montrent que le condenseur-laveur contribue à une **réduction de la masse de métaux lourds, des HAP et des dioxines/furanes** présents dans les fumées. Les teneurs dans les fumées sont en revanche extrêmement faibles ; néanmoins, la présence de ces composés dans les condensats confirme que le lavage humide conduit à un transfert d'une partie de ces substances vers la phase aqueuse. Plusieurs métaux sont correctement captés, notamment l'arsenic, le cadmium, le plomb et le zinc, ce qui est cohérent avec leur association aux particules fines et aux aérosols.

Certaines tendances observées, pouvant relever de l'incertitude analytique, doivent néanmoins être interprétées avec prudence. Dans l'ensemble, les essais confirment que le condenseur-laveur participe à la maîtrise des émissions, sans effet nettement identifié sur les émissions atmosphériques compte tenu des concentrations mesurées globalement faibles et parfois proches des limites de quantification.

3.2.2 Captation du carbone et production d'oxygène

Il semble que le condenseur-laveur ait permis de **capter entre 20 et 24 % du carbone** contenu dans les fumées, sous forme de carbone dissous ou particulaire transféré vers les condensats. Cette observation spécifique mériterait d'être confirmée par des travaux de recherche complémentaire.

Figure 11 : Le bilan carbone du système durant la journée où le filtre à manches a été bypassé (14 mars 1024)



À l'échelle de la chaufferie de MADRILLET Énergie, cette captation représente environ **720 tonnes de CO₂ par an**, soit **60 kg de CO₂ par tonne de bois** consommée (à 40 % d'humidité). Le carbone capté est soit stocké dans la fraction solide (gâteau de filtration), soit pris en charge par les filières de traitement des eaux usées, où il peut être valorisé biologiquement (compost, épandage) ou énergétiquement (biogaz, chaleur d'incinération). Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives à la faveur d'une stratégie de **captation de carbone renouvelable issu de la combustion des biomasses** en vue d'une **valorisation de CO₂ biogénique**.

Parallèlement, diverses réactions chimiques se produisent dans le condenseur-laveur entraînant des modifications moléculaires et semblant aboutir à la **production d'oxygène** (+12/13 %). Cette observation mériterait être confirmée à l'occasion de prochains essais.

3.3 Gestion des effluents et sous-produits

Les **condensats concentrent une partie des polluants solubles et particulaires**, témoignant ainsi de l'efficacité du lavage des fumées.

Un filtre presse a été installé pour séparer la pollution particulaire de l'effluent. Il résulte de ce traitement deux fractions : le **gâteau de filtration** et l'**éluât**.

En raison de la performance de l'installation, l'**éluât** s'apparente visuellement à de l'**eau claire** ! Après neutralisation, cet effluent présente néanmoins une **faible charge organique** et une **forte biodégradabilité**, le rendant compatible avec un traitement en station d'épuration. Ses caractéristiques respectent en outre les règles de la Convention de déversement dans le réseau d'assainissement de la Métropole Rouen Normandie, ainsi que les exigences réglementaires de l'arrêté du 3 août 2018.

Le **gâteau de filtration** comprend une **teneur élevée en matière sèche** et peut être évacué vers une filière de traitement adaptée (stockage en centre de stockage de déchets ultimes, voire compostage de boues d'épuration en fonction de sa composition...). Le transfert de pollution s'opère ainsi vers des filières maîtrisées et existantes, sans générer de contraintes environnementales supplémentaires significatives.

Les **composés organiques** contenus dans les condensats et l'éluât **ont été caractérisés quantitativement** (analyse EUROFINS) **et qualitativement** (Laboratoire COBRA). Un extrait des caractérisations qualitatives est présenté ci-après.

En premier lieu, le COBRA insiste sur le **faible contenu en éléments organiques des condensats et éluâts**.

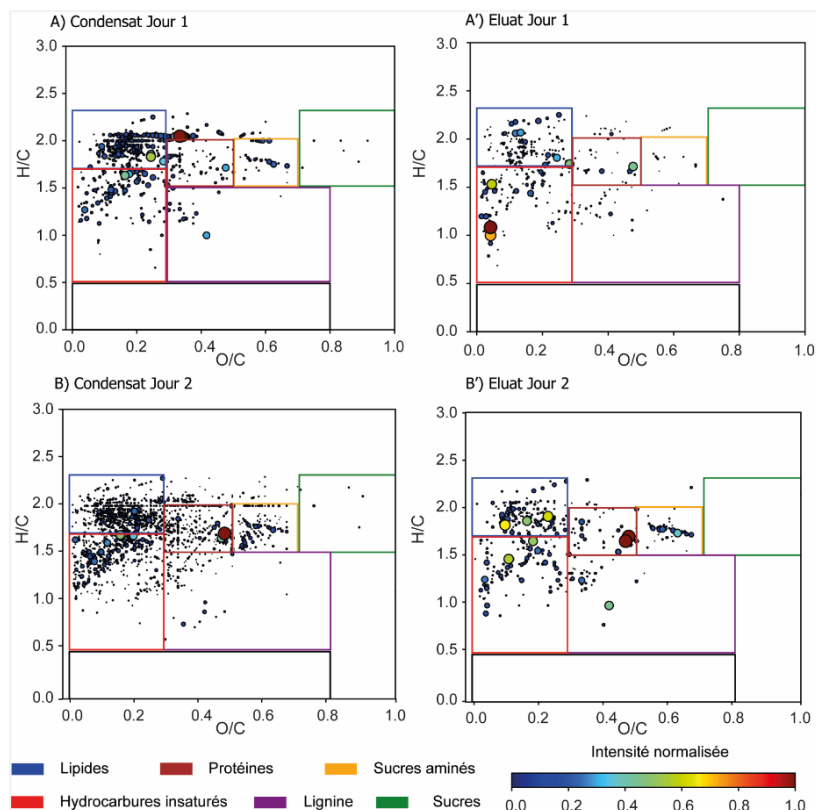


Figure 12 : Diagrammes de Van Krevelen des formules moléculaires : A) extrait du condensat du jour 1, A') extrait de l'éluât du jour 1, B) extrait du condensat du jour 2, B') extrait de l'éluât du jour 2
(Source : Laboratoire COBRA)

En second lieu, l'échantillon recueilli le jour 2 (FAM bypassé) comprend une **densité nettement plus élevée du nombre de molécules**, ce qui est cohérent avec l'augmentation de la charge particulaire et organique des fumées à l'entrée du condenseur-laveur (graphiques de gauche). Les composés majoritairement observés appartiennent principalement aux familles type **lipides** et **hydrocarbures insaturés**, traduisant un transfert vers la phase aqueuse de composés organiques non dégradés lors de la combustion. L'**efficacité du filtre-pressé** est également démontrée, les graphiques de droite présentent une densité de molécules nettement plus faible. Bien que la **masse de gâteau récupérée soit très faible**, le filtre-pressé dispose d'une **capacité effective de rétention** de ces deux familles de composés !

La densité des points est en effet faible. Le filtre-pressé joue ainsi un rôle de **sécurisation du transfert de pollution** vers les milieux aqueux, en concentrant une part significative des composés organiques dans un sous-produit solide facilement gérable.

4 Enseignements du programme Récup'EFFI

4.1 Atouts de la technologie TERRAO

Le programme Récup'EFFI a mis en évidence l'intérêt majeur de la condensation par voie humide des fumées issues de la combustion de la biomasse. Le **condenseur TERRAO** est un **équipement multifonctionnel** agissant simultanément sur la **récupération d'énergie** et l'**amélioration de la qualité des émissions atmosphériques**.

Sur le plan énergétique, la récupération de la chaleur latente contenue dans les fumées permet d'augmenter significativement le **gain de puissance** des chaudières biomasse : **+ 25 à 30 % en moyenne**. Cette amélioration se traduit par une réduction du recours aux énergies fossiles d'appoint et par une diminution potentielle de la

consommation de biomasse, contribuant ainsi à une meilleure utilisation des ressources et à la maîtrise des coûts d'exploitation.

Sur le plan réglementaire, la technologie TERRAO ne relève pas, par l'absence de plusieurs des actions de microgouttelettes d'eau dans les fumées, de la rubrique 2921 des ICPE⁸. **Le risque de légionellose est donc écarté.** L'éluât est conforme aux exigences nationales et locales.

Sur le plan environnemental, l'abattement des particules fines et ultrafines confirme le rôle structurant du condenseur-laveur dans l'amélioration de la qualité des rejets. La capacité du système à maintenir des niveaux d'émission très faibles, y compris en fonctionnement sans filtre à manches, constitue un enseignement fort pour les installations existantes confrontées à l'évolution des exigences réglementaires. Les incidences positives sont également notables sur les NOx et les composés acides (SOx et HCl) selon le pH, ce qui peut s'avérer particulièrement intéressant lorsque la biomasse est en partie composée de résidus agricoles ou agroindustriels.

Enfin, la **captation d'une part significative du carbone** contenu dans les fumées ouvre des perspectives nouvelles en matière de réduction effective des émissions de gaz à effet de serre. Le transfert de ce carbone vers des filières de traitement et de valorisation maîtrisées permet d'inscrire la technologie dans une logique d'économie circulaire.

4.2 Perspectives de déploiement et axes de recherche futurs

Les résultats du programme Récup'EFFI confirment l'intérêt et le potentiel de la condensation des fumées des chaufferies biomasse pour répondre aux enjeux actuels et futurs des réseaux de chaleur. Le déploiement de cette technologie apparaît particulièrement pertinent dans les trois cas de figure suivant :

- **Réduire les consommations biomasse pour de nouveaux projets**, l'économie étant nécessairement basée sur le pool d'atouts évoqués ci-dessus, et notamment, l'impact sur la **qualité des émissions atmosphériques**. Certains constructeurs de condenseur-laveur apportent d'ores et déjà des garanties en matière de respect de la réglementation sur les émissions de particules ($<30 \text{ mg/Nm}^3$ à 6 % d'O₂), mais ne garantissent pas les teneurs en SOx ou en NOx sans un système de traitement complémentaire (de type SNCR) ;
- **Mettre en conformité réglementaire** des chaufferies biomasse existantes soumises aux exigences des arrêtés du 3 août 2018 relatif aux installations de combustion de moins de 50 MW. Plutôt que de mettre en place un filtre à manches ou électrofiltre, le condenseur-laveur peut apparaître pertinent ;
- **Développer un réseau de chaleur existant avec maintien du taux d'énergies renouvelables**. À titre d'exemple, l'unité de condensation de MADRILLET Energie procure une puissance complémentaire équivalente à une chaufferie EnR&R de 3 MW ; l'emprise foncière de l'unité est notablement inférieure à celle d'une nouvelle chaufferie, ce qui a pour avantage d'abaisser le coût de revient (environ 800 €/kW EnR&R dans le cas d'espèce).

Dans tous les cas, la reconnaissance du rôle de la condensation dans la **réduction des émissions de gaz à effet de serre** pourrait ouvrir la voie à des **mécanismes de soutien spécifique** (aides à l'investissement, dispositifs de type certificats d'économies d'énergie ou crédits carbone/quotas de CO₂), qui permettraient de valoriser rapidement le potentiel exploitable (évaluée à environ 200 MW dans l'Hexagone).

Sur le plan économique, les **investissements associés au condenseur-laveur** doivent être intégrés dès la phase de conception des nouveaux projets, et en particulier les **mesures à prendre pour mobiliser la « source froide »**, c'est-à-dire pour **abaisser les températures de retour** du réseau de chaleur (design et régulation des sous-stations d'échange, performance des boucles secondaires, etc.).

4.3 Points de vigilance

Divers points de vigilance sont néanmoins à prendre en compte lors du déploiement de la condensation des fumées des chaufferies biomasse.

La mise en œuvre de la condensation nécessite la **disponibilité d'une « source froide »** adaptée ou la **mise en place d'un système thermodynamique**, la mise en œuvre d'une instrumentation et une régulation de qualité sur les circuits eau, fumées et biomasse et une **disponibilité foncière suffisante**. Le système thermodynamique s'appuie sur des pompes à chaleur à compression (technologie installée par MADRILLET Energie) ou à absorption ; dans le premier

⁸ ICPE : Installation classée au titre de la protection de l'environnement

cas, l'arbitrage économique dépend étroitement du coût de l'électricité, mais également de la température de la « source froide ». Appliquée au chauffage urbain, la condensation et son intérêt économique dépendront étroitement de la capacité de l'exploitant à abaisser les températures de retour du réseau.

La **condensation par voie humide** semble provoquer une **augmentation du taux d'oxygène résiduel dans les fumées** résultant de la réduction des volumes de gaz et de réactions physicochimiques. Or, l'interprétation réglementaire des concentrations en polluants est ramenée à un taux normatif d'oxygène de 6%. Alors que le condenseur-laveur a un effet majeur sur l'amélioration de la qualité des émissions, la **correction réglementaire atténuée facialement, voire annule, l'intérêt environnemental de la condensation**. La non-reconnaissance de cet atout serait de nature à nuire au déploiement de cette technologie vertueuse. Il conviendrait par conséquent de **raisonner en flux de polluants**, et non en concentration comme l'impose actuellement les arrêtés du 3 août 2018 relatifs aux installations de combustion.

5 Conclusion

Le programme de recherche et développement Récup'EFFI a permis de démontrer, à travers un démonstrateur industriel, l'intérêt du condenseur-laveur TERRAO pour améliorer simultanément les performances énergétique et environnementale des chaufferies biomasse.

Les résultats obtenus confirment que la condensation des fumées constitue un levier structurant pour accroître le rendement global des installations, réduire les consommations d'énergie primaire et améliorer la qualité des émissions atmosphériques. En intégrant la récupération de chaleur, la dépollution des fumées et la captation du carbone, le condenseur-laveur s'inscrit pleinement dans les objectifs de transition énergétique et de décarbonation portés par l'ADEME. La condensation constitue clairement une solution pertinente pour accompagner le développement de nouveaux projets de chaufferies biomasse en France et la pérennisation de la filière bois énergie, sous réserve d'une reconnaissance de l'intérêt environnemental de la technologie (par l'évolution de la réglementation), d'une part, et d'un mécanisme de soutien financier à élaborer, notamment en lien avec le stockage du carbone, d'autre part.

Sur le plan de la recherche, des investigations complémentaires mériteraient d'être engagées sur la modélisation fine des transferts thermiques et des polluants, l'optimisation de la régulation en fonction des conditions d'exploitation, la mobilisation des « sources froides » dans l'industrie et sur les réseaux de chaleur urbains, l'augmentation apparente du taux d'O₂ en sortie condenseur et enfin, le stockage du carbone biogénique dans la perspective d'une valorisation matière. Enfin, d'autres technologies de condensation demandent à être évaluées, notamment dans une perspective de comparaison avec les technologies de condensation par voie sèche.

RÉSUMÉ

Ce document présente les résultats du Programme **Récup'EFFI** visant à caractériser l'efficacité énergétique et environnementale de la **technologie de rupture TERRAO**, condenseur/laveur de fumées issues de la combustion biomasse.

Les essais ont été conduits sur la chaufferie biomasse (2 × 5 MW) de **MADRILLET Énergie**, située à Saint-Étienne-du-Rouvray (Seine-Maritime), équipée depuis décembre 2023 de deux condenseurs/laveurs (2 × 1,5 MW th) et de trois pompes à chaleur (TRANE) permettant d'élever l'enthalpie de la chaleur récupérée en vue de sa valorisation sur le réseau de chaleur urbain. Le dispositif étudié permet de récupérer simultanément la chaleur sensible et latente contenue dans les fumées tout en assurant un lavage efficace des fumées.

Les résultats mettent en évidence une récupération énergétique ayant atteint **25 % d'énergie supplémentaire**, ce qui permet de réduire le recours aux énergies fossiles d'appoint, pour l'essentiel, et la consommation de biomasse, par ailleurs. Sur le plan environnemental, le condenseur/laveur assure un **abattement très élevé des particules fines et ultrafines**. Bien que moins efficace, le condenseur/laveur peut se substituer au filtre à manches (respect des seuils réglementaires). Il a également été constaté une **captation de 20 à 24 % du CO₂** contenu dans les fumées, et simultanément, le **formation d'O₂**. Les polluants captés par les condensats réagissent chimiquement et sont extrêmement dilués ; ces effluents respectent les exigences réglementaires, ainsi que le Règlement d'Assainissement Collectif de la collectivité. En outre, le filtre presse capte les composés de type lipides et HAP contenant les condensats (gâteau évacué en centre de stockage).

Les enseignements sont multiples : la condensation est i) un système efficace de récupération de la chaleur latente (et sensible), ii) un mode de traitement des fumées, iii) un moyen de capter le CO₂. L'intérêt technico-économique doit donc être appréhendé en tenant compte de ces caractéristiques. La fonction de dépollution des fumées procure en effet à cette technologie un intérêt nouveau. La mesure de l'efficacité doit néanmoins tenir compte de l'augmentation du taux d'O₂ dans les fumées. Or, les émissions polluantes sont ramenées à 6% d'O₂ ; la reconnaissance de cet atout technologique milite en faveur d'une modification de l'approche réglementaire en raisonnant non plus en concentration, mais en flux horaire.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : – n° 2197D0087

Projet de recherche coordonné par Dominique PLUMAIL (CEDEN)

Appel à projet de recherche : APRED 2020/21

Coordination technique - ADEME : Marina Boucher et Laurianne HENRY

Direction/Service : DETI/ SDIH et DBER/SC

CITATIONS DE CE RAPPORT

PLUMAIL Dominique (CEDEN), DIAZABAKANA Seth (CEDEN), ZEMMOURI Jaouad (STARKLAB), DESPONT Sébastien (IDEX Energies), LEVOY Damien (IDEX Energies), 2025. **Quel est l'intérêt de récupérer la chaleur latente des fumées issues de la combustion du bois ? Caractérisation de la technologie TERRAO**. 14 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives