



EXPERTISES

## Apediox

Avril  
2024

Amélioration des performances  
Environnementales des chaufferies biomasse  
concernant les émissions des Dioxines

Le projet APEDiox vise à améliorer le fonctionnement des chaudières biomasse pour réduire leurs impacts environnementaux, notamment les émissions gazeuses et la qualité des cendres. Ses objectifs comprennent la caractérisation des zones de formation-destruction des dioxines, l'évaluation de l'impact des conditions de fonctionnement sur les émissions et les cendres, la proposition de solutions pour réduire les émissions et faciliter la valorisation des cendres, ainsi que la réduction de l'impact environnemental global.

Le projet est organisé en six tâches principales, combinant des travaux en laboratoire et à l'échelle industrielle. Ce rapport présente les résultats de campagne de mesure, menées en collaboration entre le LERMAB et Engie Cynergie. Un de tâche principale se concentre sur les mesures en semi-continu, avec deux sous-tâches distinctes. La première sous-tâche implique un suivi de fonctionnement sur 10 chaufferies sélectionnées, incluant des mesures telles que le taux de chlore dans le bois, les dioxines dans les fumées et les caractéristiques des cendres. La seconde sous-tâche concerne une campagne de mesures environnementales, avec des analyses sur les lichens pour évaluer les dépassements d'émissions.

Les partenaires du projet incluent le laboratoire LERMAB, Engie Cynergie, et les sociétés spécialisées dans les mesures de dioxine, les analyses de cendres et de chlore dans les biomasses, ainsi que les analyses environnementales via les lichens. A continuation une description en détail.

Cette note de synthèse publique résume les études réalisées sur les dix sites et en laboratoire, en prenant en compte différentes hypothèses de formation et de destruction des dioxines afin de définir des stratégies d'atténuation claires.

## Table des matières

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.   | Introduction .....                                       | 2  |
| 2.   | Objectifs .....  | 2  |
| 3.   | Organisation de projet .....                             | 2  |
| 3.1. | Tâches Principales : .....                               | 2  |
| 3.2. | Partenaires du Projet : .....                            | 2  |
| 3.3. | Technologie de Combustion et Sélection des Sites : ..... | 3  |
| 3.4. | Campagnes de Mesures sur Sites : .....                   | 3  |
| 3.5. | Descriptif de l'analyseur dioxines .....                 | 3  |
| 4.   | Analyse des Résultats par Site .....                     | 4  |
| 5.   | Conclusions .....  | 16 |

## **1. Introduction**

---

La transition vers des sources d'énergies plus durables et respectueuses de l'environnement est devenue une priorité mondiale pour lutter contre le changement climatique et réduire les émissions de polluants atmosphériques. Dans ce contexte, les chaudières biomasse représentent une alternative attrayante en raison de leur potentiel à réduire les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux combustibles fossiles. Cependant, pour maximiser les avantages environnementaux de cette technologie, il est essentiel d'optimiser leur efficacité environnementale en réduisant les émissions gazeuses et en améliorant la qualité des cendres produites.

Le projet APEDiox (Analyse des Performances Environnementales des Chaudières Biomasse vis-à-vis des Dioxines) a été initié dans le but de répondre à ce défi crucial. En collaboration entre le Laboratoire LERMAB (Epinal) et Engie Cynergie (Lyon), ce projet vise à caractériser les émissions de dioxines dans les installations de combustion de biomasse, évaluer l'impact des conditions de fonctionnement sur ces émissions, proposer des solutions pour les réduire, et réduire ainsi l'impact environnemental global de ces installations.

## **2. Objectifs**

---

Les objectifs du projet APEDiox sont les suivants :

1. Caractériser les zones de formation-destruction des dioxines et la qualité des cendres dans les installations de combustion de biomasse.
2. Évaluer l'impact des conditions de fonctionnement sur les émissions de dioxines et les caractéristiques des cendres produites.\*\*
3. Proposer des solutions innovantes pour réduire les émissions de dioxines et faciliter la valorisation des cendres produites.\*\*
4. Contribuer à la réduction de l'impact environnemental global des installations de combustion de biomasse, en particulier en termes d'émissions de dioxines.

## **3. Organisation de projet**

---

Le projet APEDiox est structuré de manière rigoureuse, avec une organisation méthodique visant à atteindre ses objectifs ambitieux. Les différentes phases du projet sont coordonnées de manière collaborative entre les partenaires impliqués, assurant ainsi une approche multidisciplinaire et complète de l'analyse des performances environnementales des chaudières biomasse.

Ces différentes phases impliquent à la fois des travaux de terrain sur des sites industriels et des analyses en laboratoire, permettant ainsi une compréhension approfondie des émissions de dioxines et de la qualité des cendres dans les installations de combustion de biomasse. Une étroite collaboration a été mise en place entre le laboratoire LERMAB et Engie Cynergie.

### **3.1. Tâches Principales :**

Le projet est organisé en six tâches principales, chacune ayant des objectifs spécifiques contribuant à la réalisation des objectifs globaux du projet. Parmi ces tâches, la tâche C revêt une importance particulière, car elle comprend des mesures en semi-continu sur 10 chaufferies sélectionnées, ainsi qu'une campagne de mesures environnementales pour évaluer les dépassements d'émissions.

### **3.2. Partenaires du Projet :**

Le laboratoire LERMAB et Lab Cylergie, en charge de projet et qui implique la collaboration de plusieurs sociétés spécialisées dans les mesures de dioxines, les analyses de cendres et de chlore dans les biomasses, ainsi que les analyses environnementales via les lichens. Cette collaboration avec des experts du domaine garantit la qualité et la fiabilité des données recueillies tout au long du projet.

### **3.3. Technologie de Combustion et Sélection des Sites :**

Les chaudières biomasse étudiées utilisent principalement des technologies à grille, avec différentes configurations selon les sites. La sélection des sites est effectuée en tenant compte de divers facteurs influençant la production de dioxines, tels que le type de bois utilisé, les conditions opérationnelles et les systèmes de dépoussiérage.

### **3.4. Campagnes de Mesures sur Sites :**

Les campagnes de mesures sont soigneusement planifiées et exécutées, avec l'utilisation d'un analyseur de dioxines certifié pour garantir la précision des données obtenues. Les sites sélectionnés reflètent une diversité de scénarios opérationnels, ce qui permet d'obtenir une vision globale des performances environnementales des installations de combustion de biomasse.

En résumé, l'organisation du projet APEDiox repose sur une approche collaborative, multidisciplinaire et méthodique, garantissant ainsi la réalisation efficace de ses objectifs et la production de résultats fiables et exploitables pour améliorer l'efficacité environnementale des chaudières biomasse.

### **3.5. Descriptif de l'analyseur dioxines**

La réalisation des campagnes de mesures sur site a été faite avec un prestataire nous fournissant l'analyseur de dioxines. Nous avons utilisés un AMESA® D d'Envea certifié QAL 1 selon la norme EN14181. Les dispositifs de mesure (mesure de volume, contrôle isocinétisme, mesure de T°C et pression) assurent un échantillonnage correct permettant de calculer précisément la concentration moyenne des dioxines durant toute la durée d'utilisation.

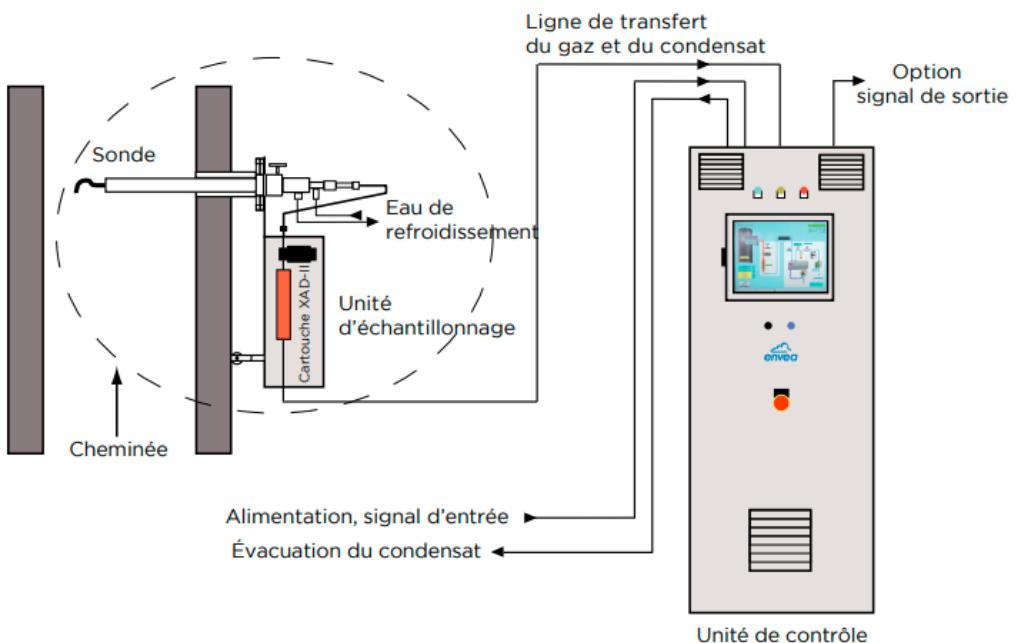


Figure 1 : Les dispositifs de mesure d'Envea

Les gaz sont recueillis sur une cartouche adsorbant XAD-II. A la fin de chaque cartouche la ligne de prélèvement est rincé avec de l'acétone et intégré à la cartouche. Les 3 phases dioxines (gaz, liquide, solide) sont ainsi collectées sur un même support.

Les prélèvements sont asservis au condition de fonctionnement de la chaudière pour ne pas mesurer des phases d'arrêt ou de veille.

### **3.6. Essais Lichens**

Les essais lichens ont été réalisé par la société Aair lichens. Cette méthode utilisée par les ingénieurs allemands (d'après la directive VDI-3799, feuillet 1, 1995) consiste à placer sur l'arbre une grille de 20 cm de largeur sur 50 cm de hauteur qui présente 10 carrés de 10 cm de côté. Une grille préétablie sur un morceau de plastique transparent suffit pour un usage occasionnel. Cette grille est placée à l'endroit de l'arbre qui semble présenter la plus grande diversité lichénique, à hauteur des yeux (le bas de la grille est environ à un mètre du sol). Établir la liste des espèces présentes en s'aide de la fiche qui donne les caractéristiques d'identification de terrain.

## **4. Analyse des Résultats par Site**

La section d'analyse des résultats des 10 sites constitue une étape cruciale dans le cadre du projet APEDiox. Ces analyses fournissent une vue d'ensemble approfondie des émissions de dioxines et des conditions de combustion dans une diversité de chaufferies biomasse. À travers une évaluation détaillée des données recueillies sur une période étendue, cette section vise à identifier les facteurs influençant la formation et les niveaux d'émission de dioxines. En examinant les variations entre les différents sites, nous cherchons à comprendre les effets des variables telles que les conditions opérationnelles de la chaudière et les méthodes de traitement des fumées. Les résultats de cette analyse permettront de formuler des recommandations ciblées pour réduire les émissions de dioxines et améliorer l'efficacité environnementale des installations de combustion de biomasse. Cette introduction souligne l'importance de cette section dans la poursuite des objectifs du projet APEDiox et prépare le terrain pour une exploration approfondie des résultats obtenus sur les 10 sites étudiés.

## Site 1 :

La figure 2 montre un fonctionnement à des charges entre 40 et 90 % de la puissance nominale. Ce sont des variations de charge significatives. Pour autant, il ne semble pas y avoir de corrélation entre la température foyer ou la température chambre. Notons que la température chambre est maintenue à des valeurs supérieures à 730°C quelle que soit la charge.

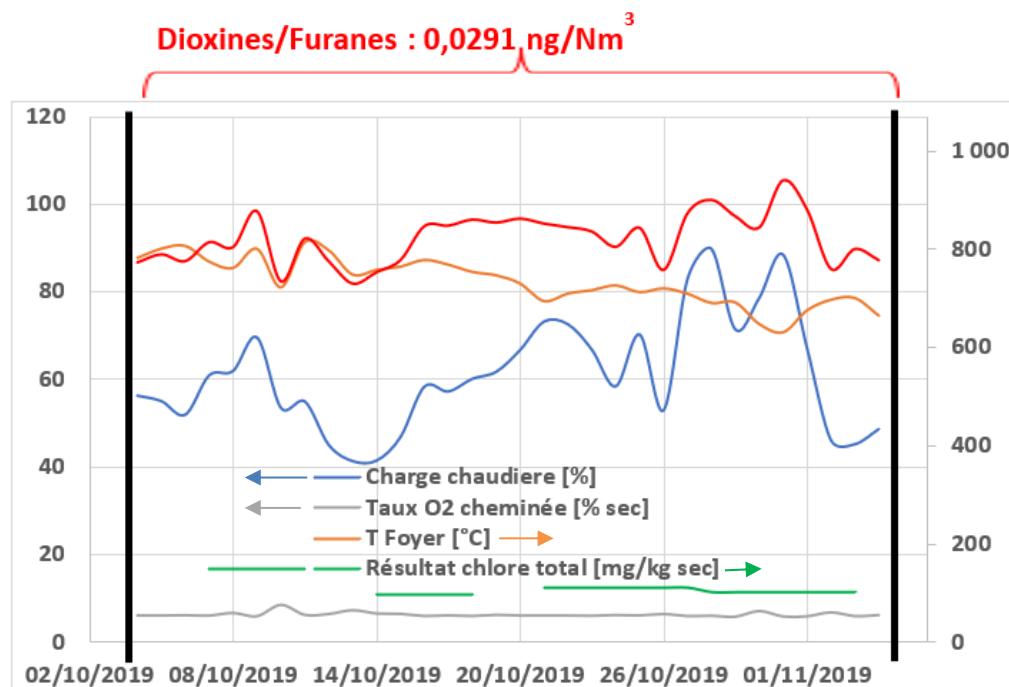


Figure 2 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaude, température foyer, température chambre, taux O<sub>2</sub> à la cheminée, teneur en chlore dans le bois.

Les émissions de dioxines/furanes ont été mesurées à 0,0291 ng/Nm<sup>3</sup> avec des conditions optimales de fonctionnement, telles qu'un fonctionnement au nominal à 80 % du temps et des températures de chambre supérieures à 800°C. Ces résultats mettent en évidence l'importance de maintenir des conditions de fonctionnement stables et optimales pour minimiser les émissions de polluants. De plus, ils soulignent le rôle critique de la température de combustion dans la réduction des émissions de dioxines.

## Site 2

La première campagne de suivi de dioxines et furanes à l'émission a été réalisée du 06/12/19 au 02/01/20. La deuxième campagne a été réalisée du 07/01/20 au 14/01/20. Les mesures de dioxines ont été effectuées avec une disponibilité de l'analyseur de 90 % pour les deux campagnes et une disponibilité de l'installation de 71 % et 77 % respectivement. L'indisponibilité de cette première campagne est due à un problème de thermocouple qui a engendré de nombreuses coupures du préleur. Concernant la deuxième campagne des problèmes d'isokinétisme ont eu lieu. Ceci correspond à un encrassement de la canne de prélèvement lors du nettoyage de l'installation et à la mise en bypass du filtre à manche.

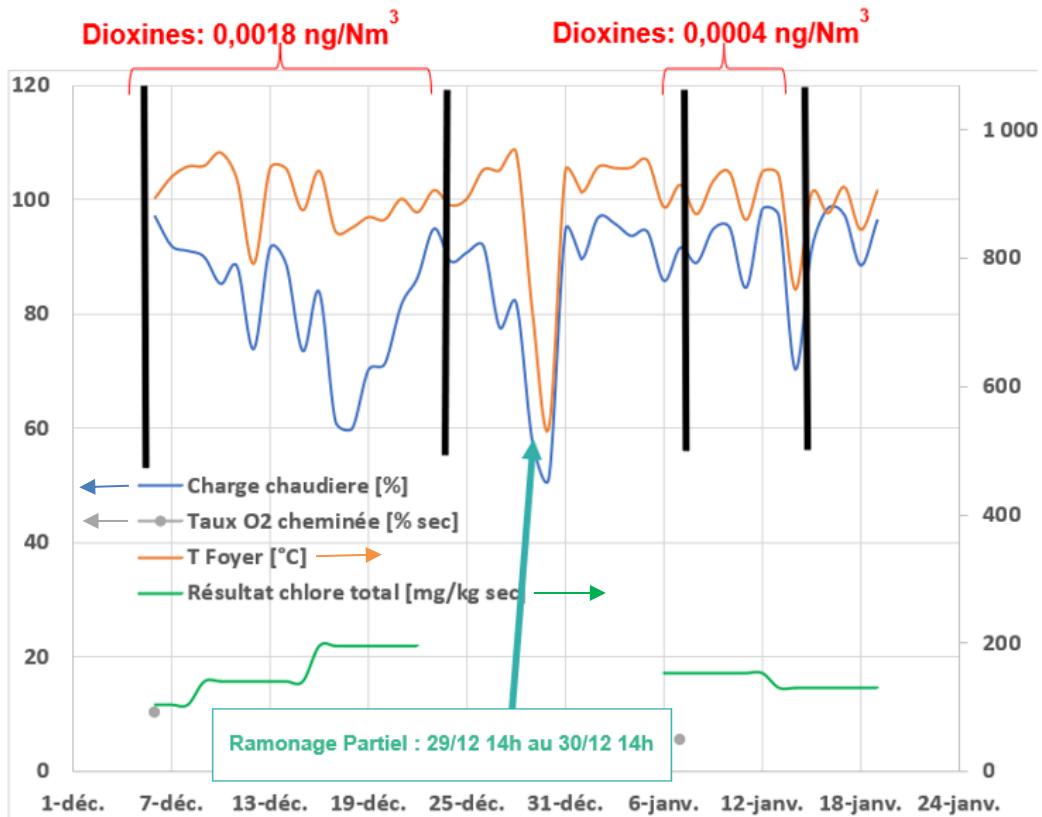


Figure 3 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaude, température foyer, taux O<sub>2</sub> à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 2

Les émissions de dioxines/furanes ont été mesurées à des niveaux très bas, bien inférieurs à la réglementation, avec un fonctionnement au nominal à 80 % du temps et des températures de foyer maintenues à des niveaux adéquats. Ces résultats indiquent une performance environnementale exceptionnelle de la chaudière, probablement due à une combustion efficace et à des contrôles rigoureux des paramètres opérationnels. Ils soulignent également l'importance de maintenir des températures de foyer optimales pour réduire les émissions de dioxines.

### Site 3

La première campagne de suivi de dioxines et furanes à l'émission a été réalisée du 11/03/20 au 23/03/20. La deuxième campagne a été réalisée du 23/03/20 au 09/04/20. Les mesures de dioxines ont été effectuées avec une disponibilité de l'analyseur de 27,5 % (respectivement de 74,1 %) pour les deux campagnes et une disponibilité de l'installation de 100 % pour les deux campagnes. Les disponibilités du préleveur sont assez faibles. Il y a eu des problèmes récurrents d'encrassement de la canne et de conditions d'isocinétisme (alarme seuil bas atteint) qui ont conduit à ces faibles taux de disponibilité. Ces problèmes de bouchage sont représentatifs d'un niveau d'émission de particules élevé. Toutefois la deuxième période présente néanmoins un seuil de représentativité de 75 % environ du temps de fonctionnement de l'installation. Un résumé des mesures peut être vu sur la figure 4.

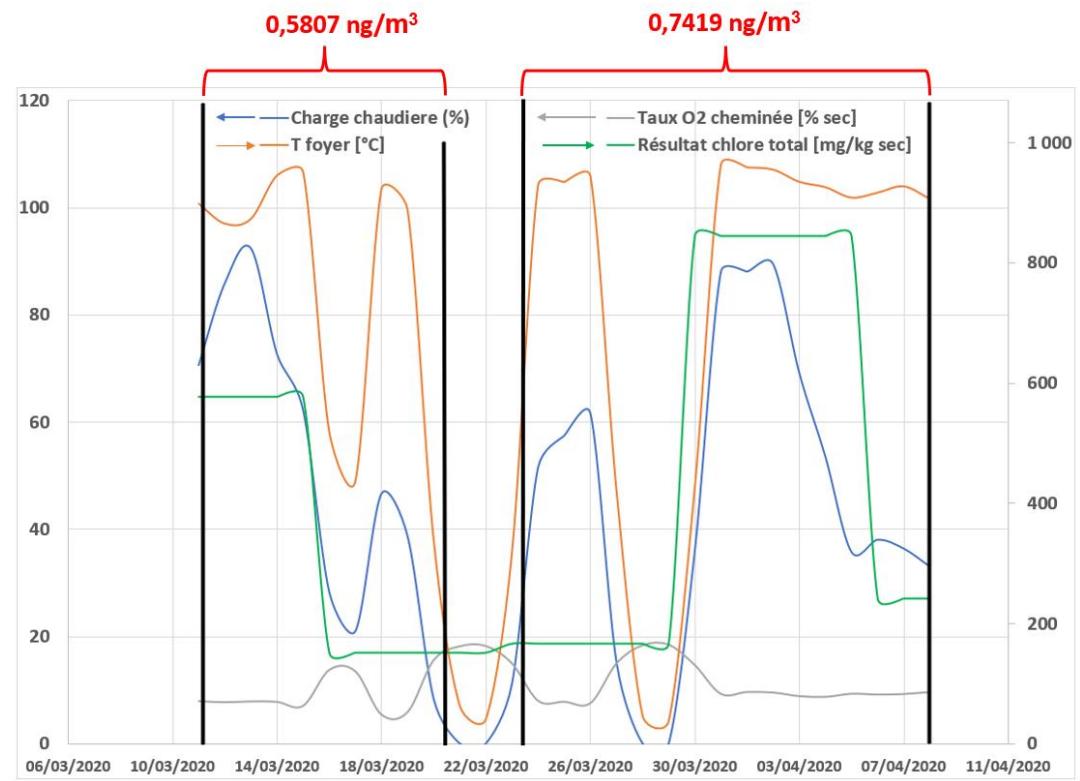


Figure 4 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaude, température foyer, taux O<sub>2</sub> à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 3.

Des émissions relativement élevées de dioxines ont été constatées, attribuées à des fonctionnements à basse charge et à des arrêts thermostatiques de la chaudière, ainsi qu'à des taux de chlore élevés dans le bois. Ces résultats mettent en évidence les défis associés à la gestion des installations de combustion de biomasse, en particulier en ce qui concerne le contrôle des émissions lors de fonctionnements à basse charge et la gestion de la qualité du combustible.

#### Site 4

La première campagne de suivi de dioxines et furanes à l'émission a été réalisée du 09/07/20 au 31/07/20. La deuxième campagne a été réalisée du 12/10/20 au 30/10/20. Les mesures de dioxines ont été effectuées avec des disponibilités de l'analyseur supérieur à 97 % pour les deux campagnes et une disponibilité de l'installation de 100 % et 99,4 % respectivement. On peut noter qu'il n'y a pas eu de problème d'enrassement sur ce site pourvu d'un filtre à manche. Le but de cette campagne était de mesurer un fonctionnement de faible charge pendant une période estivale et de comparer les résultats avant et après nettoyage complet de la chaudière (foyer, voute, chambre, échangeur, multi cyclone et filtre à manche).

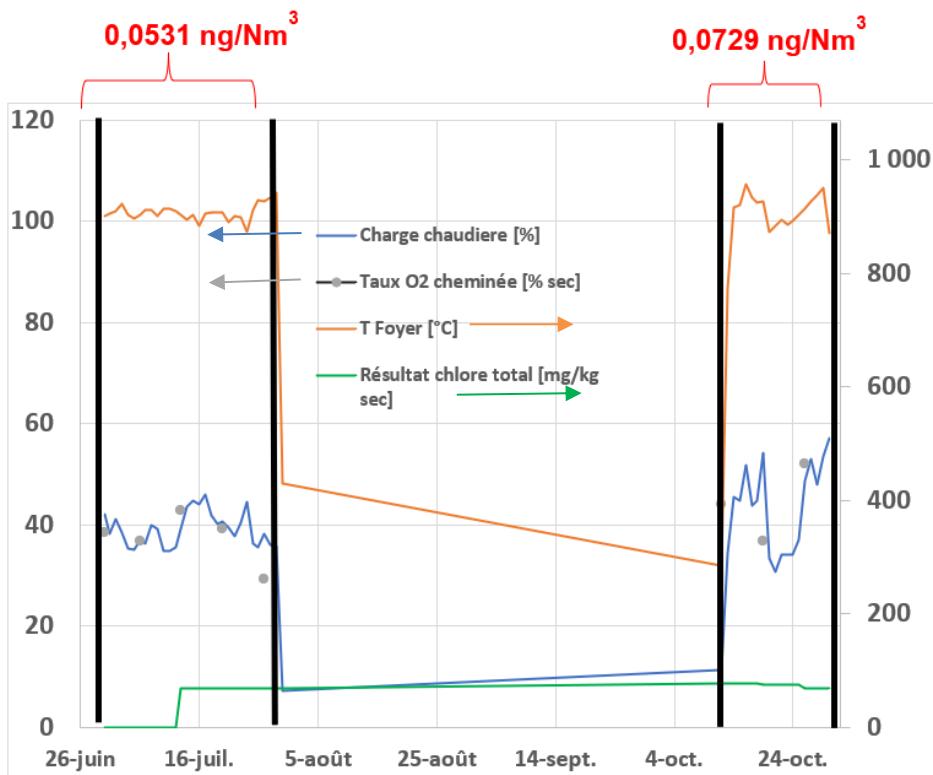


Figure 5 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaudière, température foyer, taux O2 à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 5

Malgré des émissions ne dépassant pas les limites réglementaires, des fonctionnements à basse charge ont été observés, avec des émissions significatives de CO et un impact limité du ramonage complet sur la réduction des émissions de dioxines. Ces résultats soulignent les défis persistants associés à l'optimisation des performances environnementales des chaudières biomasse, en particulier en ce qui concerne la réduction des émissions lors de fonctionnements à basse charge.

#### Site 5

Le site 5 a été réalisé sur une chaudière plus récente intégrant une régulation étagée. Cette spécificité permet d'avoir un troisième niveau d'injection d'air tertiaire au-dessus de la voute en complément des injection classique dans le foyer et dans la chambre de combustion. La régulation d'oxygène se réalise alors sur l'air tertiaire tandis que la régulation de température est réalisée grâce à l'air secondaire, ce qui affine la combustion et la meilleure maîtrise des températures. Le traitement de fumée de ce site est un cyclone et un filtre à manche.

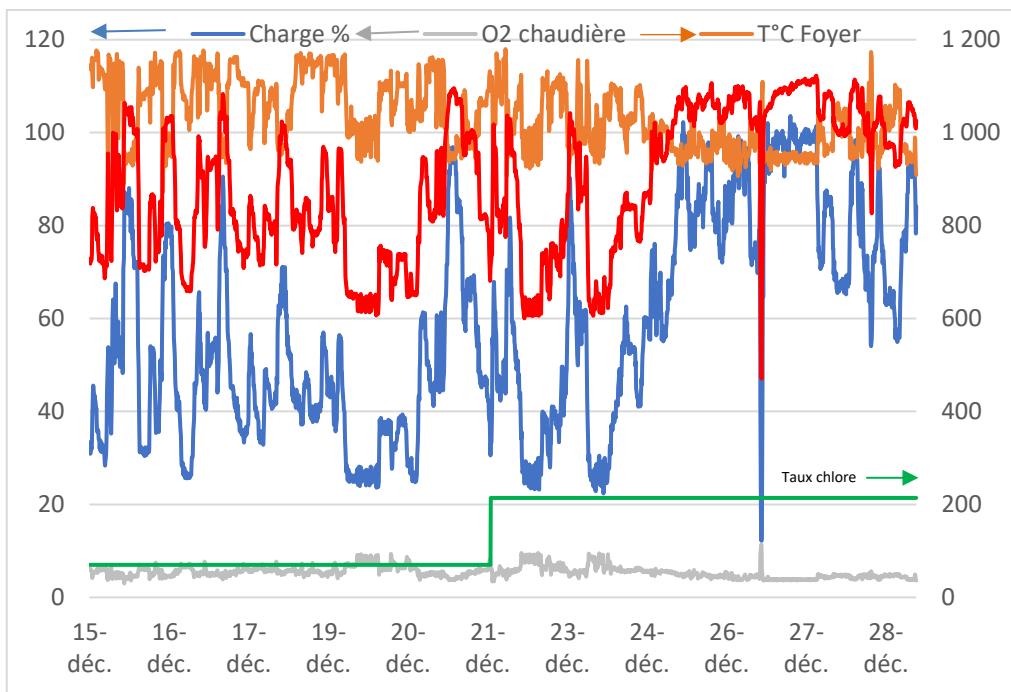
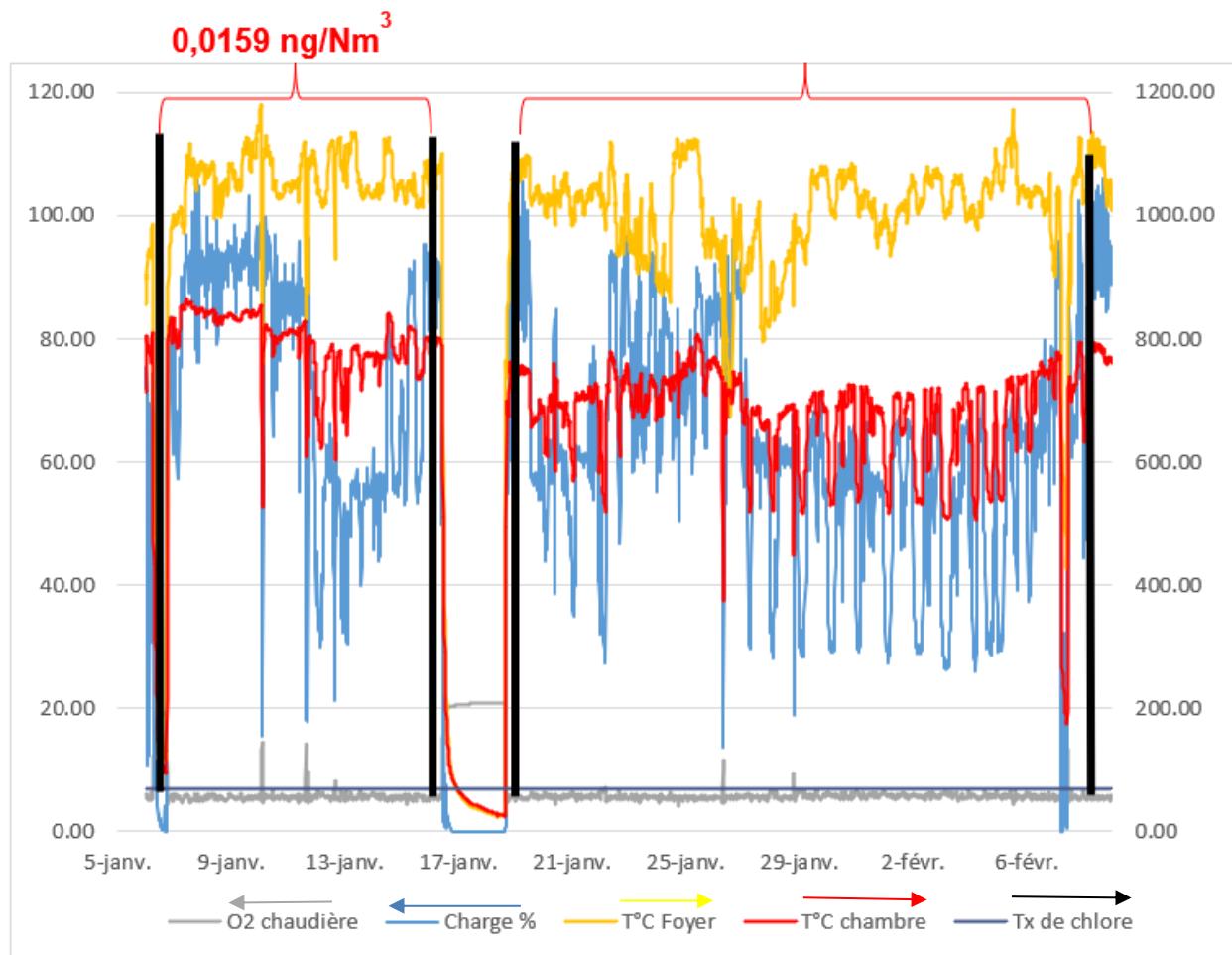


Figure 6 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaudière, température foyer, taux O<sub>2</sub> à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 5

Les observations sur les courbes de fonctionnement suggèrent une régulation d'oxygène relativement stable, avec des fluctuations de charge et de température de chambre. La température du foyer varie entre 900°C et 1100°C. Ces observations soulignent l'importance de surveiller étroitement les paramètres de fonctionnement et de maintenance pour assurer des performances environnementales optimales.

#### Site 6

La campagne de mesure du site 6 a été réalisé du 2 è janvier au 8 février 2021. Malgré tout nous n'avons là aussi aucun résultat des analyses des 2 cartouches utilisées. Nous attendons un retour d'ENVEA concernant ce contretemps. Le site 6 a été sélectionné car il est situé proche du littoral et qu'il brûle uniquement de la plaquette forestière. L'influence de ce facteur est donc direct sur cette chaufferie. Un ramonage total a été réalisé au milieu de la campagne. Cela correspond à un nettoyage du foyer, de la voute, la chambre de combustion, l'échangeur, l'économiseur et l'électrofiltre.



*Figure 7 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaude, température foyer, taux O<sub>2</sub> à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 6*

Les observations sur ce site indiquent des charges de fonctionnement assez élevées, des températures de chambre relativement basses et impactées par les variations de la demande quotidienne, ainsi qu'une qualité de combustion variable selon les périodes. Ces résultats soulignent les défis associés à la gestion dynamique des installations de combustion de biomasse, en particulier en ce qui concerne le contrôle des émissions pendant les fluctuations de charge.

#### Site 7

Le site 7 a la particularité d'avoir brûlé un mélange de bois d'eucalyptus. C'est un bois qui pousse rapidement et qui a des teneurs en chlore naturellement supérieure à un bois forestier habituellement utilisé. L'intérêt de ce site était de comparer les teneurs en chlore des mélanges afin de distinguer l'influence de ce paramètre sur les émissions de dioxines. En complément, nous avons fait des analyses de dioxines gazeuses et particulières des différentes cartouches pour confirmer la répartition connue dans la bibliographie.

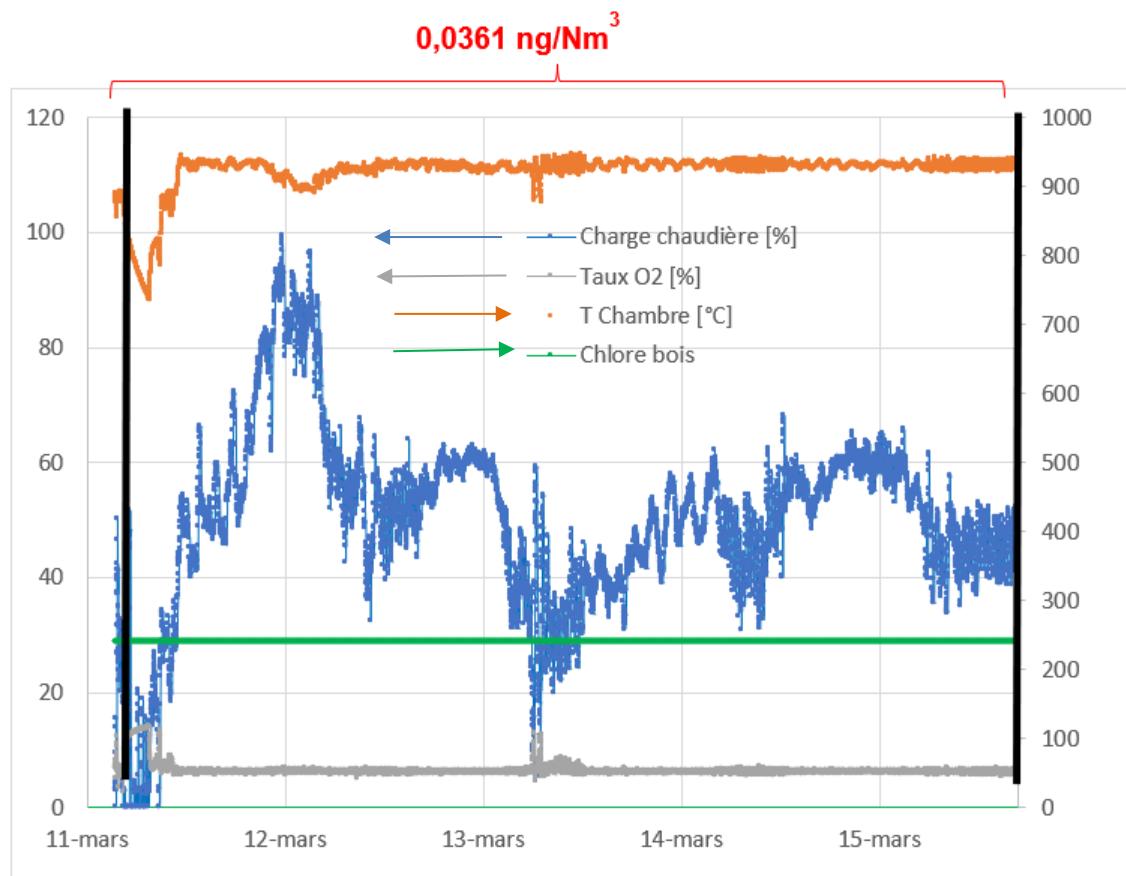


Figure 8 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaudière, température foyer, taux O2 à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 7, essai 1.

| Site 7  |             |         |             |         |             |         |             |         |
|---|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|   | Foyer mél.1 | EF mél1 | Foyer mél.2 | EF mél2 | Foyer mél.3 | EF mél3 | Foyer mél.4 | EF mél4 |
| Carbone (%sec)  | 0,9         | 0,9     | 0,7         | 1,7     | 0,2         | 1,1     | 0,6         |         |
| Chlore (mg/kg sec)                                    | 3725        | 102268  | 2725        | 99986   | 1300        | 142601  | 5772        |         |
| Soufre (mg/kg sec)                                    | 9163        | 80243   | 4050        | 76700   | 1351        | 68185   | 3796        |         |
| Chrome (mg/kg sec)                                    | 203         | 98      | 50          | 36      | 51          | 36      | 31          |         |
| Cuivre (mg/kg sec)                                    | 712         | 554     | 117         | 335     | 76          | 307     | 94          |         |
| fer (mg/kg sec)                                       | 17483       | 35035   | 14266       | 14196   | 10210       | 7832    | 14825       |         |
| Nickel (mg/kg sec)                                    | 52          | 27      | 40          | 30      | 34          | 22      | 39          |         |
| Vanadium (mg/kg sec)                                  |             | 15      |             | 14      |             | 5       | 16          |         |
| Dioxines, furanes : TEQ (OMS1998) nd=0 (ng/kg)        | 13          | 192     | 2,1         | 69      | 0,3         | 18      | 0,94        | 23      |
| Dioxines, furanes : TEQ (OMS1998) nd=loq (ng/kg)      | 13          | 192     | 2,1         | 69      | 0,43        | 18      | 1           | 23      |
| Dioxines, furanes : TEQ (OMS1998) nd=loq/2 (ng/kg)    | 13          | 192     | 2,1         | 69      | 0,37        | 18      | 0,97        | 23      |
| Résultat Cartouche (ng I-TEQ OTAN/m <sup>3</sup> sec) | 0,0361      |         | 0,0094      |         | 0,0214      |         | 0,0067      |         |
| Soufre bois (mg/kg sec)                               |             | 248     |             | 180     |             | 188     |             | 201,67  |
| Chlore bois(mg/kg sec)                                |             | 239,67  |             | 229,00  |             | 377,33  |             | 684,67  |
| fer bois (mg/kg sec)                                  |             |         |             | 254,82  |             | 70,6    |             | 34,70   |
| Cuivre bois (mg/kg sec)                               |             | 4,80    |             | 3,50    |             | 1,63    |             | 1,77    |
| Nickel bois (mg/kg sec)                               |             | 1,00    |             | 1,73    |             | 1,03    |             | 1,07    |

Figure 9 Synthèse des analyses réalisées pour le site 6. (Mél :Mélange des différents échantillons prélevés lors de chaque essai)

L'étude réalisée sur ce site industriel a révélé des résultats variables, avec des températures de foyer et de voute relativement élevées et peu impactées par les variations de charge. Cependant, les résultats des cartouches dioxines ne suivent pas toujours le taux de chlore dans le bois (figure 9), soulignant la complexité des interactions. Ces résultats mettent en évidence l'importance de comprendre les

interactions entre les différents paramètres de fonctionnement pour optimiser les performances environnementales des chaudières biomasse.

### Site 8

Le site 8 a été choisi dans le but de maîtriser totalement la charge. Nous avons testé une charge nominale haute stabilisée et une charge moyenne stabilisée (40%). De plus, ce plan d'expérience a donné lieu à des mesures complémentaires afin de mesurer l'incidence d'un électrofiltre sur la production de dioxines. Des prélèvements ont été effectués en amont et en aval lors des deux phases de charge maîtrisée. Il a été installé un analyseur de gaz (ECOM) et un opacimètre afin de vérifier la qualité de la combustion lors de ces différents essais.

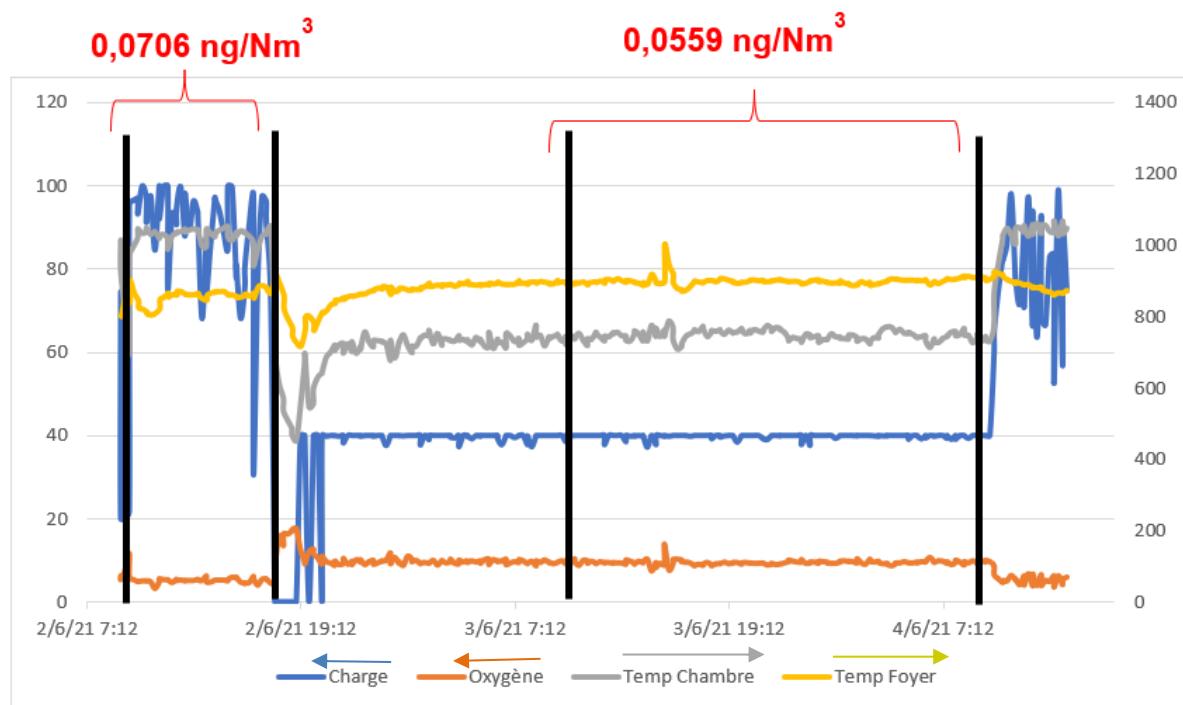


Figure 10 Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaudière, température foyer, taux O<sub>2</sub> à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 8, essai 1&2

|                   | Site 8  |            |                |         |             |            |         |         |           |        |        |            |         |         |
|-------------------|---|------------|----------------|---------|-------------|------------|---------|---------|-----------|--------|--------|------------|---------|---------|
|                   | Foyer Ram.  | hambre Ram | Echangeur ram. | MC Ram. | EF ramonage | foyer 100% | MC 100% | EF 100% | foyer 40% | MC 40% | EF 40% | foyer Var. | MC Var. | EF Var. |
| RÉSULTATS CENDRES | Carbone (%sec)  | 0,9        | 1,1            | 4,9     | 3,1         | 5,3        | 14,9    | 6,3     | 11,8      | 6,5    | 8      | 4,8        |         |         |
|                   | Chlore (mg/kg sec)                                    | 30         | 256            | 3213    | 3233        | 10230      | 68      | 6383    | 50        | 7268   | 86     | 9440       |         |         |
|                   | Soufre (mg/kg sec)                                    | 493        | 20449          | 17115   | 16574       | 44091      | 1606    | 30616   | 756       | 36093  | 830    | 37703      |         |         |
|                   | Chrome (mg/kg sec)                                    | 509        | 127            | 109     | 99          | 54         | 136     | 31      | 153       | 65     | 197    | 96         |         |         |
|                   | Cuivre (mg/kg sec)                                    | 202        | 177            | 154     | 137         | 325        | 60      | 227     | 77        | 264    | 70     | 269        |         |         |
|                   | fer (mg/kg sec)                                       | 50629      | 7622           | 6923    | 5594        | 4825       | 4685    | 2238    | 6154      | 2587   | 9091   | 5105       |         |         |
|                   | Nickel (mg/kg sec)                                    | 112        | 60             | 51      | 52          | 16         | 49      | 23      | 90        | 27     | 104    | 41         |         |         |
|                   | Vanadium (mg/kg sec)                                  | 14         | 15             | 10      | 10          | 2          | 5       | 3       | 8         | 4      | 8      | 4          |         |         |
|                   | Dioxines, furanes : TEQ (OMS1998) nd=0 (ng/kg)        | 0,71       | 1              | 2,4     | 0,56        | 3,5        | 0,21    | 1       | 0,033     | 1      | 0,023  | 0,42       |         |         |
|                   | Dioxines, furanes : TEQ (OMS1998) nd=loq (ng/kg)      | 1,2        | 1              | 2,4     | 0,56        | 3,5        | 0,5     | 1,2     | 0,35      | 1,3    | 0,33   | 0,69       |         |         |
|                   | Dioxines, furanes : TEQ (OMS1998) nd=loq/2 (ng/kg)    | 0,96       | 1              | 2,4     | 0,56        | 3,5        | 0,36    | 1,1     | 0,19      | 1,2    | 0,16   | 0,56       |         |         |
| RÉSULTATS BOIS    | Résultat Cartouche (ng I-TEQ OTAN/m <sup>3</sup> sec) |            |                |         |             |            | 0,0706  |         | 0,0559    |        | 0,002  |            |         |         |
|                   | Soufre bois (mg/kg sec)                               |            |                |         |             |            | 173     |         | 174       |        | 90     | 78         |         |         |
|                   | Chlore bois(mg/kg sec)                                |            |                |         |             |            | 70      |         | 70        |        | 70     | 70         |         |         |
|                   | fer bois (mg/kg sec)                                  |            |                |         |             |            | 353,34  |         | 91,54     |        | 48,41  | 120,25     |         |         |
|                   | Cuivre bois (mg/kg sec)                               |            |                |         |             |            | 3,7     |         | 2,3       |        | 1,3    | 1,7        |         |         |
|                   | Nickel bois (mg/kg sec)                               |            |                |         |             |            | 2,8     |         | 1         |        | 1      | 1          |         |         |

Figure 11 Synthèse des analyses réalisées pour le site 6. (Ram ;:Ramonage, MC :multicyclone, EF : électrofiltre)

Une étude approfondie sur une chaudière vapeur industrielle a montré des températures de foyer élevées en pleine charge et réduites en période de non-production. Les résultats des cartouches dioxines ont été variables selon le plan d'expérience (figure 11), avec une régulation d'oxygène qui se stabilise à une valeur autour de 12% en faible charge. Ces résultats soulignent les défis associés à l'optimisation des performances environnementales des chaudières biomasse dans des environnements industriels complexes.

### Site 9

Le site 9 a été choisi, car il permettait d'avoir une maîtrise des conditions de fonctionnement de la chaudière et du bois injecté. Cela a été rendu possible grâce à des ballons d'hydro accumulation qui permettent de stocker l'énergie lorsque le fonctionnement de la chaudière est fixé à haute charge sans avoir autant de besoin sur le secondaire ou d'anticiper les besoins du réseau lorsque la chaudière est stabilisée à charge partielle. Le site est aussi pourvu de 2 silos de stockage qui permet de choisir le type de bois injecté. Des mélanges ont aussi pu être réalisés en amont avant le déchargement dans les silos. La chaudière a commencé les essais avec un ramonage effectué mi-juin de l'année courant.

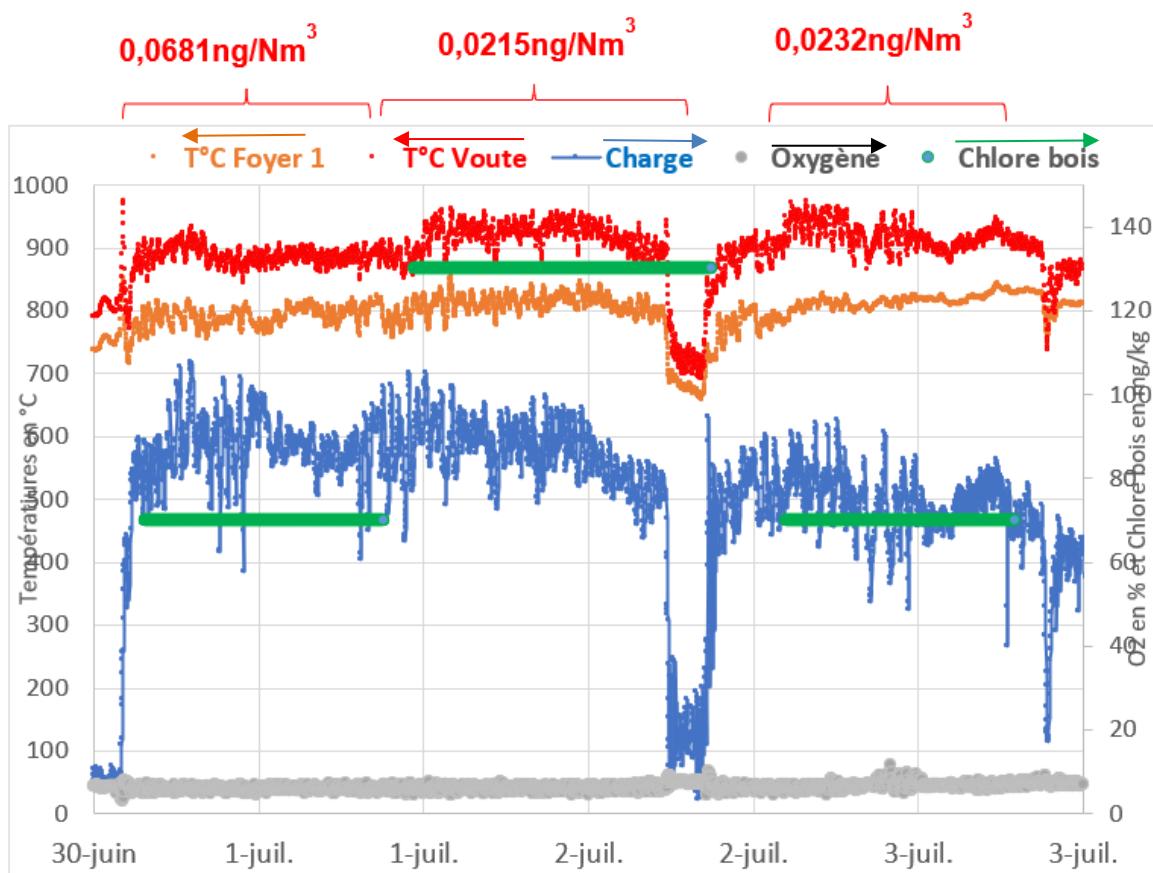


Figure 12 : Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaudière, température foyer, taux O<sub>2</sub> à la cheminée, teneur en chlore dans le bois. Site 9, essai 1, 2 et 3.

La chaudière étudiée sur ce site présente des émissions de dioxines/furanes dans la plage de 0,015 à 0,020 ng/Nm<sup>3</sup>, avec une stabilité relative dans les conditions de fonctionnement à pleine charge. Les températures de chambre sont maintenues au-dessus de 850°C, contribuant à une réduction efficace des émissions. Ces résultats indiquent des performances environnementales prometteuses de la chaudière, soulignant l'efficacité des pratiques de fonctionnement à pleine charge pour minimiser les émissions de dioxines.

### Site 10

Le plan d'expérience du dernier site mesuré a été établi en fonction des possibilités de la chaudière et des contraintes d'exploitation du site. Nous n'avons pas pu fixer des conditions de fonctionnement, car il y avait un besoin sur le réseau et que d'aucun dispositif de tampon n'y était installé. Nous avons mesuré une première cartouche en début de saison de chauffe lorsque la demande est faible, puis une avant le démarrage des cogénérations, lorsque le besoin était en phase montante. Enfin une dernière cartouche a permis de mesurer une période fluctuante où la chaudière était en appoint des cogénérations.

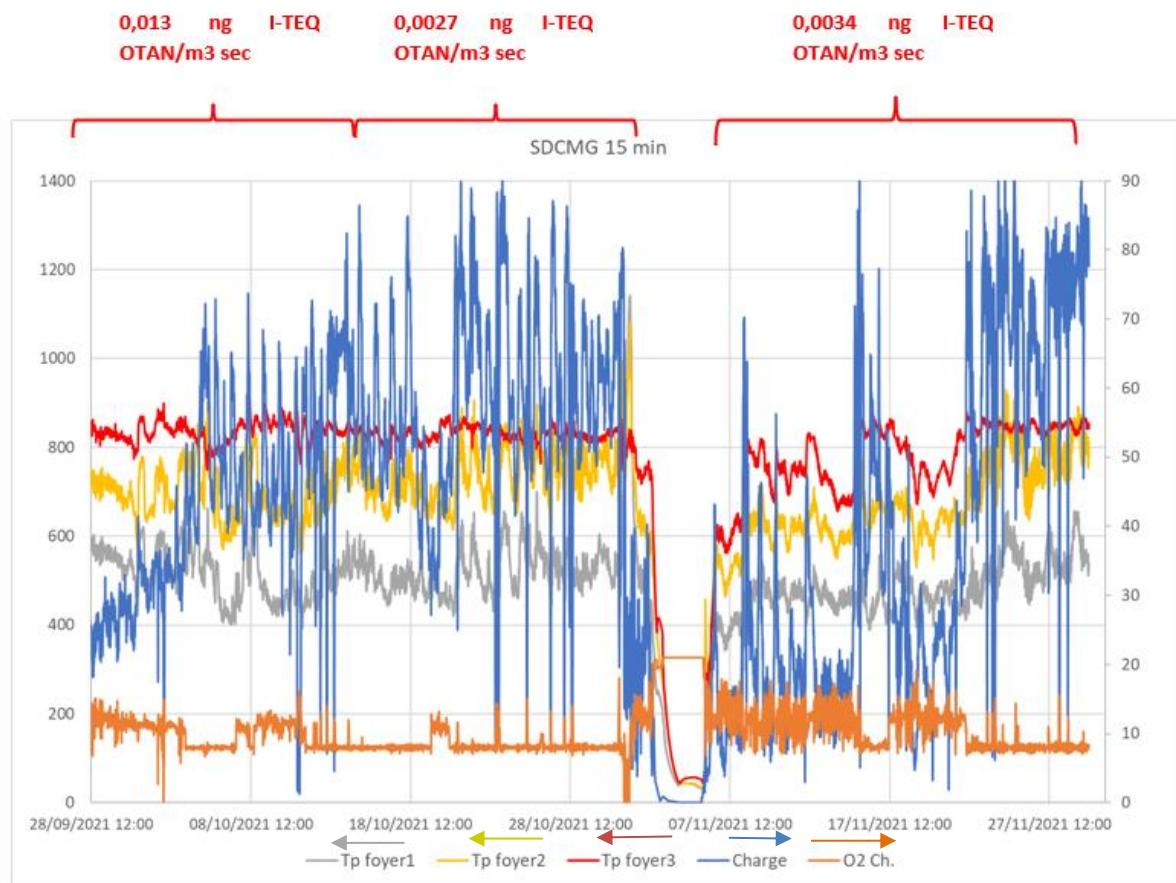


Figure 13 : Evolution des données process de combustion lors de la période de mesure des dioxines en cheminée : charge chaude, températures foyer, taux O<sub>2</sub> humide. Essai 1,2&3

Les résultats préliminaires de ce site indiquent des émissions de dioxines/furanes inférieures à 0,03 ng/Nm<sup>3</sup>, bien en deçà des limites réglementaires. Les températures de combustion varient entre 800°C et 950°C, avec une stabilité observée dans les paramètres opérationnels. Ces résultats mettent en évidence les performances environnementales prometteuses de la chaudière, soulignant l'importance de maintenir des conditions de fonctionnement optimales pour réduire les émissions de dioxines.

#### Essais laboratoire : traitement thermique de dioxines

L'étude a porté sur le traitement thermique des cendres à différentes températures, réalisant des tests variés pour déterminer l'élimination des dioxines. Les échantillons provenant de différents sites ont été soumis à des températures allant de 300°C à 620°C, avec plus de 20 sous-échantillons analysés. Certaines cendres nécessitant une quantité minimale de 20 grammes pour l'analyse, des tests ont été répétés pour atteindre cette quantité.

Les résultats montrent une corrélation entre la température de traitement et l'élimination des dioxines. À partir de 500°C, des rendements élevés (>90%) ont été obtenus

Dans les zones de post-combustion, des températures d'au moins 850°C pendant 2 secondes sont recommandées pour une destruction adéquate des dioxines. Les tests dans un réacteur à lit traversé ont montré des réductions significatives des dioxines, suggérant une désorption dans la phase gazeuse et des réactions d'oxydation.

En résumé, le traitement thermique des cendres est une méthode efficace pour éliminer les dioxines, mais les conditions de température, de durée et de flux d'air doivent être soigneusement contrôlées pour minimiser les risques environnementaux.

| Ech n° | T° consigne four (°C) | Masse cendres introduite dans four (g) | [Dioxines] avant four ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) | Quantité dioxines avant ( $\mu\text{g}$ ) | Masse sortie de four (g) | [Dioxines] après four ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) | Quantité dioxines après ( $\mu\text{g}$ ) | T° moy éch (°C) | Abattement |
|--------|-----------------------|--|---|---|--------------------------|---|---|-----------------|------------|
| 1      | 450                   | 9.1586                                 | 14.7  | 0.1346                                    | 8.9684                   | 14.1  | 0.1265                                    | 145             | 6%         |
| 2      | 475                   | 8.5282                                 | 14.7  | 0.1254                                    | 8.2725                   | 7.06  | 0.0584                                    | 150             | 53%        |
| 3      | 500                   | 8.5816                                 | 14.7  | 0.1261                                    | 6.7847                   | 1.42  | 0.0096                                    | 176             | 92%        |
| 4      | 525                   | 8.7008                                 | 14.7  | 0.1279                                    | 8.2459                   | 0.036   | 0.0003                                    | 220             | 100%       |
| 5      | 550                   | 8.583                                  | 14.7  | 0.1262                                    | 8.1668                   | 0.207   | 0.0017                                    | 195             | 99%        |
| 6      | 575                   | 8.4342                                 | 14.7  | 0.1240                                    | 7.9679                   | 0.007   | 0.0001                                    | 205             | 100%       |
| 7      | 600                   | 8.6466                                 | 14.7  | 0.1271                                    | 6.7328                   | 0.004   | 0.0000                                    | 220             | 100%       |
| 8      | 625                   | 8.3436                                 | 14.7  | 0.1227                                    | 7.826                    | 0.004   | 0.0000                                    | 240             | 100%       |

Figure 14 : Résultat obtenus sur les cendres récupères de site 3

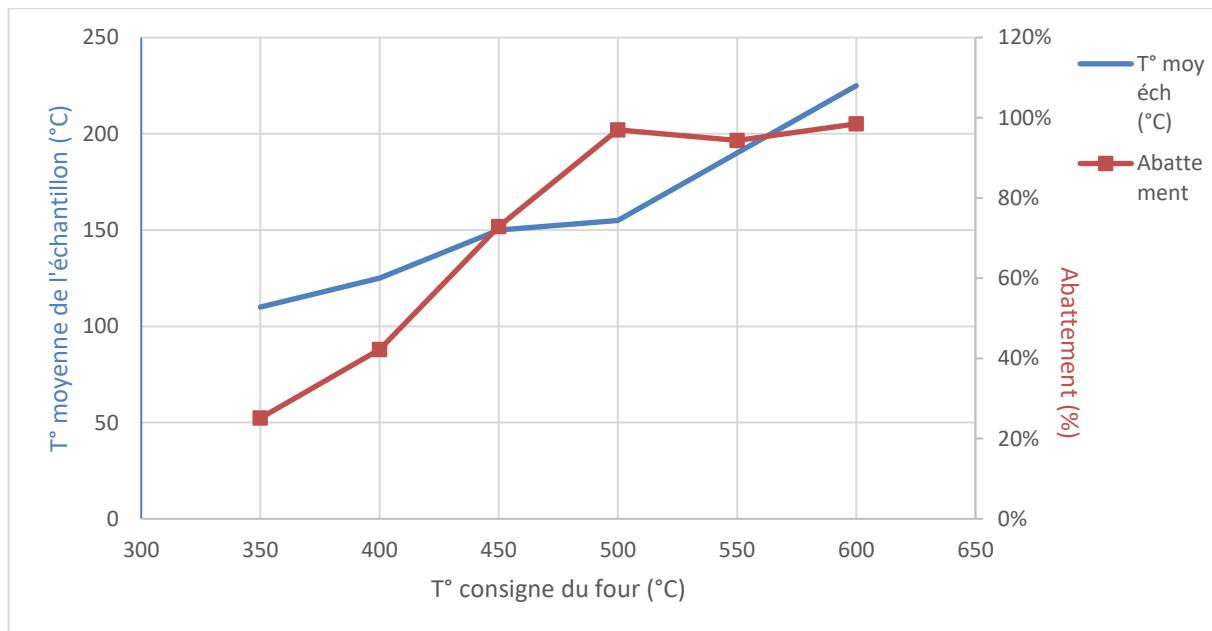


Figure 15 : Résultat obtenus sur les cendres récupères de site 3

## 5. Conclusions

---

En conclusion, la gestion des émissions de dioxines dans les chaudières biomasse implique une approche complexe et multifactorielle. La composition du combustible, en particulier la présence naturelle de chlore dans certains types de bois, est souvent considérée comme le facteur principal. Cependant, il est crucial de prendre en compte les interactions chimiques complexes qui se produisent pendant le processus de combustion. Par exemple, le soufre présent dans les gaz de combustion peut avoir un effet inhibiteur sur la formation de dioxines, offrant ainsi une piste pour atténuer les émissions. De plus, il est important de comprendre le rôle potentiel d'autres éléments, tels que le cuivre, dans la libération de dioxines dans l'environnement de combustion. Bien que la compréhension de ces interactions soit encore en cours, elle souligne l'importance de mener des recherches approfondies pour mieux saisir les mécanismes impliqués.

Concrètement, surveiller et contrôler la teneur en chlore du bois utilisé comme combustible est indispensable pour réduire les émissions de dioxines. Cela nécessite une sélection minutieuse des sources de biomasse et éventuellement des processus de traitement pour minimiser la présence de chlore.

L'étude met en lumière ou confirme nettement l'importance du régime de combustion sur la teneur en dioxines des émissions, même lorsque celles-ci n'atteignent pas les valeurs réglementaires. Les régimes transitoires, les charges partielles de combustion et les basses températures de voute sont des facteurs de risque confirmés. Dans une certaine mesure, ces facteurs sont sous le contrôle de l'exploitant de la chaufferie biomasse. Ces données, issues des campagnes d'analyses sur sites, sont confirmées par les campagnes d'analyses sur cendres effectuées au LERMAB. Il est recommandé d'atteindre des températures d'au moins 850°C pendant 2 secondes dans les zones de post-combustion pour une destruction adéquate des dioxines. Le traitement thermique (>500 degrés) est également un moyen d'éliminer les dioxines des cendres.

Un des actions majeures à prendre en compte pour éviter le risque de dioxines est le bon réglage de la combustion. Cette action implique de vérifier et de corriger si nécessaire la régulation de la combustion afin que tous les régulateurs travaillent dans leur plage de fonctionnement habituelle. Pour les installations de moins de 10 MWth, les conditions nécessaires et suffisantes pour réduire le risque de dioxines sont les suivantes :

- Le régulateur d'oxygène doit être sollicité dans sa plage habituelle (< 80 %) pour tous les niveaux de charge.
- La température du foyer et de la chambre de combustion doit être en cohérence avec les consignes du constructeur pour toutes les recettes d'air de combustion, et donc pour tout type d'humidité du bois brûlé.

Il est également recommandé de nettoyer régulièrement les voûtes de cheminée et les échangeurs, en fonction du type de combustible utilisé. Il a été démontré que les échangeurs des chaudières biomasse peuvent stocker des dioxines, et un nettoyage régulier est donc essentiel pour prévenir les risques associés, en particulier pour les petites chaudières (< 5 MWth) et/ou lorsque du bois à forte teneur en chlore est utilisé comme combustible. Les fréquences de nettoyage recommandées varient en fonction de la taille de l'installation et du type de combustible, avec des recommandations spécifiques pour différents scénarios :

|                          | <= 5 MWth        | <= 10 MWth           | >= 10 MWth |
|--------------------------|------------------|----------------------|------------|
| Nettoyage des voûtes     | 1 x / 2 semaines | 1 x / 2 à 4 semaines | 0          |
| Nettoyage de l'échangeur | 1x / semaine     | 1 x / 2 semaines     | 0          |

En conclusion, la réduction des émissions de dioxines dans les chaudières biomasse nécessite une approche intégrée qui englobe la maintenance des équipements, la sélection judicieuse des combustibles, la surveillance des processus de combustion et la recherche continue pour comprendre les mécanismes sous-jacents. En adoptant des pratiques et des technologies innovantes (traitement des émissions avec laveurs), il est possible de minimiser efficacement les émissions de dioxines, contribuant ainsi à la préservation de la qualité de l'air et à la protection de la santé publique.

# Projet APEDIOX : Amélioration des performances environnementales des chaufferies concernant les émissions de dioxines : rapport mesures en semi continu sur sites.

Le projet APEDiox (Analyse des Performances Environnementales des Chaudières Biomasse vis-à-vis des Dioxines) est une initiative collaborative entre le Laboratoire LERMAB à Epinal et Engie Cynergie à Lyon. Son objectif principal est de maximiser l'efficacité environnementale des chaudières biomasse en réduisant les émissions de dioxines. Pour ce faire, le projet se concentre sur la caractérisation des émissions de dioxines, l'évaluation de l'impact des conditions de fonctionnement et la proposition de solutions innovantes pour réduire ces émissions.

Les objectifs du projet incluent la caractérisation des zones de formation et de destruction des dioxines, l'évaluation de l'impact des conditions de fonctionnement, la proposition de solutions pour réduire les émissions et la contribution à la réduction de l'impact environnemental global des installations de combustion de biomasse. Pour atteindre ces objectifs, le projet est structuré en six tâches principales, impliquant des travaux de terrain sur des sites industriels et des analyses en laboratoire. Les partenaires du projet comprennent des experts spécialisés dans les mesures de dioxines, les analyses de cendres et de chlore, ainsi que les analyses environnementales à l'aide de lichens.

Le processus de formation des dioxines dans les chaufferies biomasse est influencé par plusieurs facteurs, tels que la composition de la biomasse, la technologie de la chaudière et les conditions de combustion. Les dioxines peuvent se fixer sur les cendres volantes et être relarguées en fonction de la température et de la composition des cendres et des fumées. Les situations à risque incluent l'utilisation de déchet de bois de classe A/B ou à forte teneur en chlore, le fonctionnement à des charges partielles, les installations avec un entretien insuffisant ou des systèmes de dépoussiérage peu performants, ainsi que les chaudières de petite puissance où il est difficile de maintenir des conditions stables.

Des analyses ont été réalisées sur dix sites sélectionnés pour couvrir un large éventail de scénarios. Les résultats montrent des concentrations de dioxines dans les fumées allant de 0,0003 ng/m<sup>3</sup> à 0,7417 ng/m<sup>3</sup>, tandis que les analyses sur les cendres de foyer révèlent des concentrations variant entre 70 ng/kg et 16000 ng/kg. Les sites avec des températures de foyer élevées (>900 °C) présentent des concentrations faibles en dioxines, tandis que ceux avec des températures basses et un fonctionnement instable montrent des niveaux élevés de dioxines.

En conclusion, la réduction des émissions de dioxines dans les chaudières biomasse nécessite une approche intégrée impliquant la maintenance des équipements, la sélection des combustibles, la surveillance des processus de combustion et la recherche continue pour comprendre les mécanismes sous-jacents. En adoptant des pratiques et des technologies innovantes, il est possible de minimiser efficacement les émissions de dioxines, contribuant ainsi à la préservation de la qualité de l'air et à la protection de la santé publique.

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 à la reproduction par reprographie.

