



RÉDUCTION DES ÉMISSIONS NOX ET PARTICULES POUR LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE

Etudiants :

Ambroise QUINTYN

Andréa DOS SANTOS

Valentine GRANGE

Arundhati SINGH

Juliette JUAN

Enseignant-responsable du projet :

Angel MARTINEZ

Date de remise du rapport : **11/06/2022**

Référence du projet : **STPI/P6/2022 – 13**

Intitulé du projet : **Réduction des émissions NOx et particules pour la combustion de la biomasse**

Type de projet : **bibliographique**

Objectifs du projet :

- **Cerner les enjeux de la transition écologique**
- **Comprendre le processus de combustion de biomasse**
- **Connaître les facteurs des différentes émissions lors d'une combustion de biomasse (voir l'étude expérimentale)**
- **Approfondir nos connaissances sur les méthodes de réduction ou d'exploitation des émissions d'une combustion de biomasse**

Mots-clefs du projet : **biomasse, émissions, réduction, transition énergétique**

TABLE DES MATIERES

1. Introduction	5
2. Méthodologie / Organisation du travail	6
3. La transition énergétique.....	6
3.1. Gaz à effet de serre.....	6
3.2. La décarbonation	7
3.3. Les énergies renouvelables.....	8
3.4. Le cas particulier de la biomasse	9
4. Les NOx.....	10
4.1. Formation.....	10
4.2. Techniques de réduction	11
4.2.1. Techniques primaires	11
4.2.2. Techniques secondaires	12
4.3. Interprétations de données expérimentales.....	13
4.3.1. Explication de la méthode	13
4.3.2. Interprétations	13
5. Les Particules	15
5.1. Formation des cendres volantes	15
5.2. Technique de contrôle et de gestion des cendres volantes	16
5.3. Réutilisation des cendres	17
5.4. Interprétations de données expérimentales.....	18
6. Conclusions et perspectives.....	20
7. Bibliographie	21

1. INTRODUCTION

De nos jours, l'énergie produite est très largement d'origine fossile, et est principalement obtenue à partir de charbon (27,6%), de pétrole (31,6%) et de gaz naturels (25%) (BP, 2021). Cependant, dans le contexte environnemental actuel, une transition énergétique vers des énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolienne...) est souhaitable. De plus, le secteur de l'énergie est un des plus polluants : en 2016, 73,2% des émissions de gaz à effets de serre sont issus du secteur de l'énergie (ClimateWatch, 2020).

Une énergie est considérée renouvelable quand elle provient d'une source naturelle théoriquement illimitée (sans limite de temps ou reconstituable plus rapidement qu'elle n'est consommée). Elle est donc en théorie inépuisable, contrairement aux énergies fossiles. De plus, elle produit très peu de CO₂ et permet ainsi une production d'énergie décarbonée et décentralisée. Toutefois, elle a un rendement énergétique plus faible et nécessite des infrastructures électriques coûteuses en énergie de par la disponibilité plus aléatoire de la source d'énergie : le coût de production est ainsi plus élevé à court terme (Youmatter, 2022).

Pour remplacer les énergies fossiles, il faut que les nouvelles énergies constituent une alternative viable, et donc qu'elles correspondent aux critères suivants :

- Que ce soient des énergies renouvelables
- Que leur impact sur l'environnement soit limité
- Que leur production ne soit pas en compétition avec d'autres besoins de l'humanité.

Aujourd'hui, plusieurs énergies répondent à ces critères en partie. Le but est donc d'optimiser ces sources d'énergie pour remplacer les énergies fossiles.

On cherche donc une source d'énergie renouvelable à échelle humaine qui pollue moins et la biomasse pourrait être cette source.

La biomasse traditionnelle est encore la source principale d'énergie utilisée dans beaucoup de pays en voie de développement et représente la première source d'énergie renouvelable dans le monde. Cependant, elle n'est pas optimisée et pourrait constituer un atout majeur dans la transition énergétique mondiale (Claassen, et al., 1999).

La biomasse est la source d'énergie la plus ancienne puisqu'elle est utilisée par l'Homme depuis la domestication du feu à la préhistoire. Elle est constituée de matières organiques et des gaz résultant de la décomposition de ces dernières. C'est en brûlant dans différentes conditions que la biomasse va produire de l'énergie.

Cependant, nombreuses sont les émissions lors d'une combustion de biomasse. Elles peuvent varier par la nature des atomes qui les constituent, par leur concentration en masse et par leur taille. Ainsi, cette réaction émet des résidus solides lors d'une combustion incomplète, c'est le cas des cendres et des poussières (BiomasseNormandie, Combustion du bois, 2022). Elle émet également des émissions gazeuses.

La combustion de biomasse est habituellement considérée comme neutre au niveau du CO₂. Cela s'explique par le fait que le gaz carbonique émis servira à la croissance des végétaux, il est donc recyclé : c'est le cycle du carbone. D'autres gaz polluants sont néanmoins émis tel que le monoxyde de carbone CO qui se forme lorsque la combustion est incomplète, les NOx, des composés organiques volatils, et des hydrocarbures brûlés. De la vapeur d'eau est également produite (ADEME, 2007).

De la plus grande à la plus petite, les particules grossières, d'accumulation et fines, sont les 3 familles de particules produites lors d'une combustion.

Les particules dérivées de la combustion de biomasse sont nocives pour notre santé. Plusieurs études ont prouvé qu'elles pouvaient provoquer des inflammations des tissus pulmonaires, mais également des dérèglements de la prolifération des cellules et des

dommages à l'ADN qui contribuent au risque de cancer des poumons et autres pathologies cardiovasculaires et respiratoires (Marchetti, et al., 2021).

Les émissions ne sont pas seulement dangereuses pour la santé mais également pour l'environnement. En effet, une combustion émet entre autres des NOx et des particules, particulièrement polluantes pour l'atmosphère. Au final, la combustion mal contrôlée de biomasse est responsable de 50 à 70 % de la pollution en particules carbonées en hiver en Europe (ActuEnvironnement, 2007).

C'est pourquoi il est nécessaire, dans le cadre d'une transition énergétique vers les énergies renouvelables, de réduire ces émissions. L'enjeu actuel serait donc d'optimiser la combustion de biomasse afin de réduire ses émissions au maximum et d'avoir la meilleure efficacité.

Il existe différentes méthodes pour réduire les émissions à la suite d'une combustion de la biomasse :

Tout d'abord, les méthodes primaires, qui consistent à améliorer la combustion. On agit ainsi sur l'appareil de combustion et sur les réglages (température, teneur en oxygène, turbulence et temps de séjour). Nous pouvons aussi modifier la taille et la composition de la biomasse ou opter pour une co-combustion charbon/biomasse.

Nous aborderons ensuite les méthodes secondaires, qui consistent à traiter les fumées à la sortie de l'appareil. Les émissions de NOx pourront être traitées par réduction sélective non catalytique (SNCR : Selective Non Catalytic Reduction) ou réduction sélective catalytique (SCR : Selective Catalytic Reduction) (ADEME, 2018).

Pour illustrer notre étude, nous nous sommes intéressés aux émissions d'une chaudière en fonction de la quantité d'oxygène fournie. Ainsi, nous avons traité des données obtenues expérimentalement pour pouvoir les interpréter.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Pour ce projet, nous étions un groupe de 5 personnes. En nous axant sur la recherche bibliographique, nous avons donc commencé par consulter divers articles sur le thème de la combustion de la biomasse afin d'avoir une idée plus précise sur ce sujet. Ces recherches ont par conséquent été effectuées par l'ensemble du groupe, ainsi que la rédaction de l'introduction.

Par la suite, nous avons donc pu mettre en place un premier plan, afin de pouvoir nous répartir le travail. De cette manière, individuellement, nous avons approfondi nos recherches sur un sujet plus spécifique. Nos séances hebdomadaires de P6 nous permettaient alors de mettre en commun et partager les avancées de chacun, et de recevoir des conseils de la part de notre professeur référent afin de poursuivre dans les meilleures conditions.

3. LA TRANSITION ENERGETIQUE

3.1. Gaz à effet de serre

En 2016, 50 milliards de tonnes de gaz à effets de serre ont été produits dans le monde et 73,2% de ces émissions proviennent du secteur de l'énergie (BP, 2021). Ces gaz ont pour caractéristique de rester dans notre atmosphère et d'absorber une partie de la

chaleur émise par la Terre. Bien que ce phénomène soit naturel, l'activité humaine a fait augmenter la concentration de certains gaz, ce qui a abouti à une augmentation de cet effet de serre naturel (Climat.be, 2019). Il existe cinq gaz à effets de serre naturels :

- La vapeur d'eau (H_2O) : naturellement présente dans l'atmosphère et le plus important des gaz à effet de serre
- Le dioxyde de carbone (CO_2) : peut être créé par la décomposition des matières organiques puis réabsorbé par les végétaux. Il est également créé suite aux activités humaines comme la production d'énergie par la combustion des énergies fossiles ou la déforestation
- Le méthane (CH_4) : créé par la décomposition des matières végétales et en grande partie par l'activité humaine comme l'agriculture ou le traitement des déchets ménagers
- Le protoxyde d'azote (N_2O) : provient principalement de l'agriculture, l'industrie chimique et la combustion des combustibles fossiles pour le chauffage domestique et le transport
- L'ozone (O_3) : naturellement présent dans la stratosphère, il protège la terre des rayons UV, mais dans la troposphère, il a des effets néfastes sur la santé et il impacte le rendement des cultures agricoles

De plus, l'homme a également fabriqué des gaz "industriels", qui sont également considérés comme des gaz à effet de serre. Il en existe trois :

- Les gaz fluorés (CFC, HCFC, HFC, PFC, etc;) : utilisés dans les systèmes de refroidissement, comme solvants, les extincteurs et dans la production d'aluminium et de mousse synthétique
- L'hexafluorure de soufre (SF_6) : utilisé dans les transformateurs et les doubles vitrages
- Le trifluorure d'azote (NF_3) : utilisé dans la fabrication des écrans LCD et des cellules photovoltaïques

Toutefois, si on omet la vapeur d'eau, le principal gaz à effet de serre émis reste le CO_2 (74,4% des émissions totales en 2016). Il est ainsi devenu la principale préoccupation mondiale et le gaz dont on doit principalement réduire l'émission. Nous avons donc besoin de solutions pour décarboner notre économie. Et si les énergies fossiles sont très polluantes en CO_2 , les énergies renouvelables en produisent peu et seraient une bonne option (ClimateWatch, 2020).

3.2. La décarbonation

En 2021, l'énergie était en très grande partie produite par le pétrole (31,2%), le charbon (27,2%) et les gaz naturels (24,7%). Seulement 5,7% proviennent d'énergies renouvelables et 4,3% du nucléaire (BP, 2021). Si on cherche à décarboner nos activités, il existe également un enjeu sécuritaire. Ainsi, bien que l'énergie nucléaire soit considérée comme l'énergie fossile la plus propre, les accidents comme Tchernobyl ont des conséquences sanitaires graves. Afin de limiter le risque de rejet d'éléments radioactifs anormaux dans notre environnement, il faut sécuriser notre système énergétique et donc remplacer le nucléaire par les énergies renouvelables. De plus, puisque les énergies renouvelables produisent moins de gaz à effet de serre, cela permettrait de diminuer la pollution de l'air et les affections respiratoires qui en proviennent (Selectra, 2022).

En outre, les énergies fossiles vont se raréfier dans les années à venir, puisque leurs sources sont limitées. En raison de l'industrialisation et du développement démographique, la demande en énergie va continuer d'augmenter, mais au rythme de consommation actuelle, le charbon arrivera à épuisement d'ici à 112 ans, le gaz d'ici à 63 ans et le pétrole d'ici à 54 ans. Il est donc nécessaire de trouver une alternative à ces ressources (EDF, 2022).

En conséquence, la transition énergétique est l'un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle. Elle se définit par l'ensemble des changements que subissent les modèles de consommation, de production et de distribution d'énergie afin de les rendre écologiques, de réduire notre consommation d'énergie et d'évoluer vers une prépondérance des énergies renouvelables. Mais au-delà d'une transition énergétique, nous faisons face à une transition sociale et comportementale puisqu'elle influe sur la consommation d'énergie de l'Homme et son comportement face aux enjeux environnementaux de ce secteur. C'est notamment le cas avec les énergies fossiles non conventionnelles comme les forages marins ou le gaz de schiste, qui ont abouti à une vive protestation des citoyens (Selectra, 2022).

3.3. Les énergies renouvelables

En France, 48,8% des énergies renouvelables proviennent de l'hydraulique, 32,3% de l'éolien, 10,4% du solaire et 9,6% d'autres sources d'énergies renouvelables (BP, 2021).

- **AVANTAGES**

Le premier avantage des énergies renouvelables est qu'elles produisent très peu de CO₂ en comparaison avec les énergies fossiles. En effet, l'énergie éolienne ne produit que 6 gCO₂e/kWh, et la biomasse seulement 32 gCO₂/kWh, tandis que le pétrole produit 778 gCO₂/kWh et le charbon 1058 gCO₂/kWh (ADEME, 2018). Ainsi, se tourner vers les énergies renouvelables est un moyen efficace de réduire rapidement les émissions de CO₂.

De plus, la pollution de l'eau et de l'air qui peut provoquer entre autres des problèmes respiratoires, des dommages neurologiques, des cancers, ou des crises cardiaques serait diminuée. Les énergies éolienne, solaire et hydroélectrique génèrent de l'énergie électrique qui n'est pas associée aux émissions qui polluent l'air. Bien que l'énergie géothermale et celle issue de la biomasse émettent des gaz polluants, c'est en quantité bien réduite par rapport à la quantité produite par le charbon et le gaz naturel. En outre, l'éolien et le solaire n'ont pas besoin d'eau pour fonctionner, et donc ne polluent pas les ressources d'eau, contrairement aux énergies fossiles qui peuvent contaminer les nappes phréatiques ou utiliser de l'eau lors d'une étape de refroidissement.

Par ailleurs, les vents forts, les ciels ensoleillés, l'abondance de plantes, les courants de l'eau et la chaleur de la terre sont des sources inépuisables d'énergie, tandis que nous savons que les énergies fossiles finiront par s'épuiser (USCUSA, 2017).

Cependant, bien que les énergies renouvelables soient des alternatives aux énergies fossiles pour résoudre certains problèmes, d'autres problèmes apparaissent.

- **INCONVENIENTS**

Les énergies renouvelables ne peuvent pas remplacer à 100% le pétrole (Youmatter, 2016).

Pour commencer, l'éolien est certes l'une des façons les plus propres de produire de l'énergie électrique puisqu'il ne produit ni pollution toxique ni émission de gaz à effet de serre. Toutefois, se pose le problème de la continuité en énergie fournie : lorsqu'il n'y a pas de vent, aucune énergie ne peut être produite. Il est donc nécessaire d'avoir des batteries assez puissantes pour stocker le surplus d'énergie et de le réutiliser plus tard. De plus, l'éolien perturbe la faune et la flore ambiante. Enfin, les pales d'éoliennes difficilement recyclables et souvent enfouies après leur utilisation ainsi que la grande quantité de béton coulée à la base des éoliennes sont deux autres défauts des éoliennes (L'usineNouvelle, 2019).

Dans le cas de l'énergie solaire, nous devons utiliser des matières dangereuses durant la fabrication des panneaux, et leur installation peuvent perturber l'écosystème ambiant, ainsi que le paysage et les sources d'eaux environnantes.

L'énergie hydroélectrique nécessite de construire de grandes infrastructures un peu partout dans le monde, perturbant ainsi l'irrigation des terres mais aussi l'écosystème et les migrations des poissons.

Enfin, la biomasse partage des similitudes avec les énergies fossiles puisqu'elles impliquent toutes les deux la combustion d'une matière première. Ainsi, la biomasse pose également le problème des émissions de gaz et d'utilisation d'eau. Cependant, la principale différence est que la matière première peut être produite de manière durable, contrairement aux énergies fossiles qui sont non-renouvelables (USCUSA, 2017).

3.4. Le cas particulier de la biomasse

L'utilisation de biomasse pourrait se présenter comme une bonne alternative aux énergies fossiles. Dans l'idéal, elle peut être considérée neutre en CO₂ avec le cycle carbone : le carbone contenu dans le combustible va être relâché pour ensuite être capté à nouveau par le futur combustible (arbre ou autre). Si la source de biomasse est bien gérée, l'approvisionnement en combustible n'apparaît pas comme un problème. Ces deux derniers points dépendent cependant du contexte territorial et de la capacité du territoire à stocker du carbone pour un temps court et long (Mathias & Robert, 2020).

La combustion permet de produire de l'énergie sous forme de chaleur à base de comburant (généralement l'air) et de carburant. Par l'effet de la chaleur, les liens chimiques du carburant sont défaits.

Expliquons à présent les différentes voies d'obtention d'énergie à partir de la biomasse solide. Nous allons nous intéresser à la voie thermochimique, c'est-à-dire une méthode nécessitant de travailler à haute température. Pyrolyse, combustion et gazéification sont les trois procédés appartenant à cette voie.

Lors de la pyrolyse, la biomasse subit un séchage à une température approximant les 500°C et dans une atmosphère inerte, autrement dit en absence de dioxygène. Suite à cela, après la perte d'humidité, et grâce à un craquage thermique hétérogène, nous obtenons des matières volatiles, des résidus carbonés (char, charbon) ainsi que de l'huile pyrolytique : c'est la dévolatilisation (Zellagui, 2016).

La gazéification, quant à elle, se déroule de manière similaire à la combustion. Néanmoins, il existe des différences entre ces deux procédés : la gazéification se fait en absence de dioxygène. Cela a pour conséquence l'obtention d'une réaction de reformage avec la présence de molécules d'eau qui assure la production de monoxyde de carbone et d'hydrogène. La combustion de la biomasse est incomplète et cette dernière est transformée à 80% en gaz appelé le singas mélange de deux gaz combustibles (le CO et le H₂) (ConnaissanceDesEnergies, 2011).

La combustion débute comme une pyrolyse. Néanmoins, les matières volatiles obtenues subissent un craquage homogène, c'est-à-dire une séparation des gaz. Il en résulte des matières volatiles secondaires et tertiaires tels que des gaz permanents et des gaz condensables lourds (goudrons). Puis l'étape d'oxydation en présence de dioxygène dans une réaction homogène a lieu. Du CO₂ et H₂O "fumées" sont produits ainsi que des particules NO_x. D'autre part, nous traitons également les résidus carbonés obtenus suite à la pyrolyse. Ce traitement se fait également en présence de dioxygène et sous haute température. Ainsi, on obtient une oxydation à la fois de la matière volatile et de la matrice carbonée, selon une réaction hétérogène qui donne comme produit des cendres. La combustion est une réaction exothermique. Elle permet de ce fait de produire de l'énergie thermique. Ainsi, toute biomasse se transforme complètement en gaz qui s'enflamme tout en émettant de la chaleur par le phénomène de conversion.

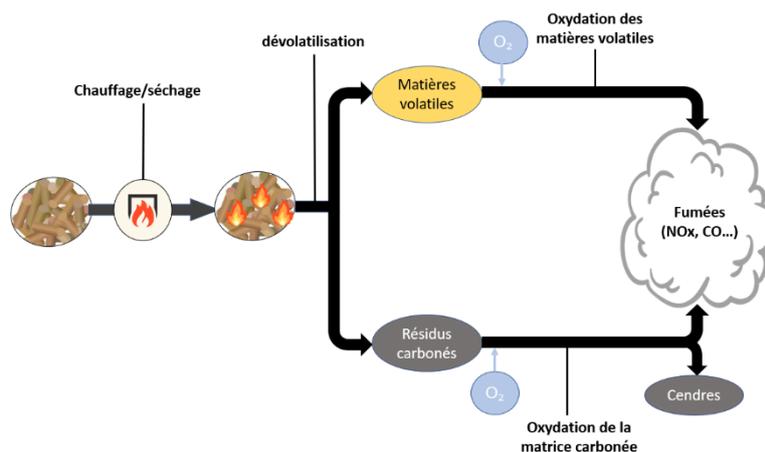


figure 1 : Schéma simplifié d'une combustion de biomasse

Comme précisé pendant l'introduction, le processus de combustion peut être complet ou incomplet. Dans le cas d'une combustion complète, les différents éléments du combustible (C, H, N et S) réagissent avec l'air et forment du CO_2 , de l' H_2O , du HCl, des métaux lourds, des SO_x et des NO_x , voire des NH_3 et d'autres gaz s'il y a une trop grande abondance d' O_2 . Pour une combustion incomplète (due à un manque d' O_2 , à une température trop faible ou d'un temps de résidence trop court dans la chambre de combustion) du CO ou CH_4 vont être formés. Des particules vont aussi être formées tout au long de la combustion, complète ou incomplète. Il est donc important de maîtriser la quantité de comburant, les proportions dépendant des propriétés chimiques et physiques du combustible. Plus largement, il faut aussi considérer les propriétés des différentes biomasses, leur rendement, leur hygrométrie et la durabilité de cette dernière.

Cependant, ces diverses émissions sont polluantes et peuvent être nocives pour la santé et l'environnement. La combustion de biomasse est donc à considérer avec précaution (Godbout, Palacios, Larouche, Brassard, & Pelletier, 2012).

4. LES NOX

4.1. Formation

La combustion de la biomasse est une bonne alternative aux énergies fossiles, néanmoins elle possède également ses désavantages. Tout d'abord ce procédé émet des NO_x nocifs pour l'environnement.

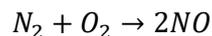
Ces émissions sont dues à la présence de molécules d'azote dans la biomasse et dans l'air. Le terme NO_x est utilisé pour désigner le monoxyde d'azote, NO et le dioxyde d'azote NO_2 . Cependant dans la plupart des cas seul le NO est pris en compte car il représente 95% des émissions totales de NO_x contre seulement 5% pour le NO_2 (Ma, et al., 2021).

De ce fait, pour ce qui est des émissions de NO lors de la combustion de biomasse, elles proviennent soit du N_2 présent dans l'atmosphère (représente 30% des émissions), soit de l'azote contenu dans le combustible (représente 70% des émissions). Il existe donc différents mécanismes de formations de NO tel que les mécanismes "fuel- NO " "thermal- NO ", "prompt NO ", et " N_2O routes" (Mousavi, Fatehi, & Bai, 2021).

Expliquons un peu plus en détail ces différents mécanismes.

Le mécanisme "fuel-NO" décrit le procédé de transformation de l'azote présent dans le combustible, en NOx. Ce procédé comporte trois étapes, d'abord l'azote volatil contenu dans le combustible est relâché sous forme de NH₃, de HCl et de HCNO, ce dernier étant en faible quantité. Ces intermédiaires sont ensuite rapidement oxydés en NO, durant la combustion. Pendant ce temps, certaines molécules NO peuvent aussi être réduites en N₂ par NH₃ et HCN (Zhao, et al., 2016).

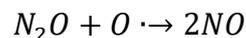
Le mécanisme "thermal-NO", est le mécanisme thermique de production de NOx à partir du diazote contenu dans l'air par dissociation. Ce mécanisme se base sur un ensemble de réactions chimiques, mettant en jeu des radicaux, tels que des radicaux O et N, ainsi que N₂ et O₂, pour produire au final des molécules NOx. La réaction globale de ce mécanisme peut alors s'écrire :



Ce procédé est favorisé par de hautes températures, du fait que toutes ces différentes réactions sont dépendantes de la température.

Le mécanisme "prompt-NO" est, à la différence de celui cité juste avant, un mécanisme encouragé par des conditions de basses températures. Une grande quantité de combustible et un court temps de séjour sont de la même manière des facteurs favorisant sa réalisation. Ce procédé consiste donc à la réaction de l'azote présent dans l'air (N₂) avec les molécules de CH. Cela amène à la production de HCN, qui conduira finalement à la création de molécules NO.

Enfin, "N₂O routes" décrit l'obtention de NOx à partir de l'intermédiaire de N₂O, soit de protoxyde d'azote. Ce mécanisme peut représenter jusqu'à 90% des émissions de NOx durant la combustion, quand il se produit dans les conditions les plus favorables c'est-à-dire à des pressions élevées et avec de grandes quantités d'oxygène. Ainsi ce procédé peut être décomposé en deux réactions irréversibles :



(Asthana, Sessiecq, Patisson, & Ablitzer, 2007)

Pour les combustions de biomasse dans les chaudières de particuliers, la température de combustion ne dépasse pas les 1300°C, elle est donc inférieure à celle nécessaire qui causerait des NOx avec le mécanisme de "thermal-NO". Pour les combustions de biomasse, les émissions de NOx proviennent donc principalement de l'oxydation entière de l'azote présent dans le combustible (Godbout, Palacios, Larouche, Brassard, & Pelletier, 2012).

Tous ces différents mécanismes sont par conséquent à l'origine des émissions de NOx, c'est pourquoi de nombreuses méthodes ont été mises au point afin d'essayer de les réduire. C'est ce que nous allons expliquer dans le paragraphe suivant.

4.2. Techniques de réduction

4.2.1. Techniques primaires

Pour réduire les émissions de NOx il existe deux différents types de méthodes, les méthodes primaires et secondaires. Nous allons donc ici traiter les méthodes primaires visant à limiter les émissions de NOx à la source, en optimisant la géométrie des appareils de combustion (brûleurs bas NOx), ou encore en contrôlant les paramètres de combustion (étagement de l'air) (Nguyen, 2013).

En premier lieu, détaillons la méthode visant à utiliser un brûleur bas NOx. En effet, une première manière de réduire les émissions de NOx est de directement optimiser les appareils de combustion. Ainsi, les chaudières bas-NOx, fonctionnent de manière classique, toutefois elle possède en plus un brûleur. Grâce à ce brûleur, il est possible de retarder le mélange entre l'air et le gaz, ce qui a pour but d'abaisser la température de la flamme lors de la combustion. Ce système permet ainsi de réduire de presque 90% les émissions de NOx (Proxiserve, 2018) (Izi, 2018).

Ensuite, le procédé d'étagement d'air, qui est une technique couramment utilisée, permet également de contrôler les émissions de NOx. Comme son nom l'indique, l'air qui sert à la combustion est introduit dans la chaudière en différentes étapes. Cela a pour but de créer un espace riche en combustible dans la zone de combustion primaire, où normalement les conditions de réduction sont plus importantes en raison de la faible quantité d'oxygène. De la même manière, une zone de brûlage apparaît où davantage d'air est injecté dans le but d'achever totalement la combustion du combustible.

Ainsi, il peut être remarqué que la technique d'étagement d'air permet de réduire considérablement la quantité de NOx rejeté, surtout lorsqu'elle est appliquée à des combustibles comportant des forts taux d'azote (Ozgen, Cernuschi, & Caserini, 2021).

4.2.2. Techniques secondaires

Une autre manière de réduire les émissions de NOx est de traiter directement les fumées, afin de produire de la vapeur d'eau et diazote gazeux. Pour ce faire, deux procédés sont généralement utilisés : la réduction non catalytique sélective (SNCR) et la réduction sélective catalytique (SCR). Ces deux dispositifs vont être utilisés pour des conditions de températures différentes ; le SCR sera effectué pour des températures avoisinant les 300°C, tandis que le SNCR est lui plus approprié lorsque la température est d'environ 950°C (ADEME, 2018).

Étudions à présent chacun de ces procédés.

La technologie de réduction non catalytique sélective, consiste en premier lieu à insérer un mélange d'ammoniac (NH_3) et d'air, depuis une entrée sur le côté de l'appareil de combustion. De cette manière, le NH_3 va réduire le NO. Par ailleurs, la hauteur à laquelle est injecté l'ammoniac a un impact important sur le taux de réduction de NO. En effet, afin d'obtenir une efficacité maximale, le mélange doit être inséré à une hauteur, où la température de l'appareil se trouve être entre 800°C et 1200°C (plus on se place haut dans le système plus la température sera élevée). Cela s'explique par le fait qu'une température trop basse engendrera une réaction trop lente entre NO et NH_3 , et au contraire dans le cas d'une température trop élevée, l'ammoniac réagirait avec l'oxygène et augmenterait alors la quantité de NO formé. Cette méthode permet de réduire jusqu'à 70% des émissions de NOx, néanmoins elle possède également ses limites. Pour augmenter la quantité de NO formé, il est possible d'augmenter la quantité de NH_3 introduite, mais l'efficacité de cette méthode se retrouve amoindrie, ce qui revient à gaspiller de l'ammoniac. Il est donc nécessaire de trouver un juste milieu entre la quantité d'ammoniac utilisée et le taux de NO réduit (Mousavi, Fatehi, & Bai, 2021).

La technologie de réduction catalytique sélective se déroule globalement de la même manière que la technologie SNCR à la différence que dans ce procédé, des catalyseurs interviennent. Les catalyseurs le plus fréquemment utilisés étant l'oxyde de vanadium et le dioxyde de titane, $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ (Li, et al., 2018).

De l'ammoniac est alors également injecté, pour réduire les NOx, en formant du diazote et de l'eau. Cependant avec ce dispositif, des réactions secondaires ont également lieu, produisant du N_2O et du SO_3 , des composés chimiques très indésirables au vu de leur nocivité sur la santé. De plus, la présence de catalyseur permet à la réaction de se produire à des températures entre 300°C et 400°C (Baxter, 2005).

Cela est dû au fait que la présence d'un catalyseur permet de diminuer l'énergie d'activation nécessaire à la réaction.

Au final lorsque l'on compare ces deux procédés, le coût de la technologie SNCR se trouve être bien plus bas que celui de la technologie SCR. A contrario la méthode SCR est-elle bien efficace, elle peut permettre de réduire jusqu'à 90% les NOx contre seulement 70% pour la méthode SNCR (SVIIndustrial, 2020).

4.3. Interprétations de données expérimentales

4.3.1. Explication de la méthode

Afin d'illustrer notre étude, nous nous sommes intéressés aux émissions d'une chaudière en fonction de la quantité d'oxygène fournie. Ainsi, nous avons traité des données obtenues expérimentalement pour pouvoir les interpréter.

L'ensemble des relevés de l'expérience ont été effectués à partir d'une chaudière à granulés PERGE model Silvatherm Compact 20 CGR. Pour cette chaudière, le combustible est alimenté grâce à une vis sans fin et fonctionne par aspiration assistée par ventilateur.

Plusieurs machines ont été nécessaires pour la mesure des différentes émissions :

- FPS : sonde permettant de prélever et diluer les fumées. Elle est équipée d'une tête chauffante à l'entrée du capteur qui gère la température de l'échantillon
- PPS et TEOM : deux appareils de mesure utilisés pour les relevés des particules (concentrations massiques et nombres des particules)
- SMPS et ELPI : appareils permettant de mesurer le diamètre de mobilité électrique et le diamètre aérodynamique des particules
- Testo350 : appareil qui mesure les concentrations en gaz

Nous nous sommes attardés sur les émissions de NOx et de particules relatives à la combustion pour cette chaudière, en fonction de la distribution de l'air dans le lit à granulés de combustible (méthode d'étagement d'air). Trois couches d'orifices ont alors été étudiées, le débit de l'air entrant était donc contrôlé :

- Os : lignes d'orifices de la partie supérieure
- Om : lignes d'orifices de la partie centrale
- Ob : lignes d'orifices de la partie basse

Il paraît important de souligner que les valeurs obtenues ont été corrigées à 13% d'oxygène. A partir des débits, il est possible de calculer le facteur d'air λ .

Pour interpréter les données, il a été judicieux de concevoir des diagrammes. A la vue du nombre de facteurs qui peuvent exercer une influence sur les paramètres de réponse, l'interprétation est particulièrement complexe.

4.3.2. Interprétations

Nous nous concentrons ici sur l'influence du débit d'air entrant par les trois orifices sur les émissions de NOx.

Dans notre cas, et pour les autres chaudières domestiques, la température atteinte dans la chambre de combustion au cours de la réaction est inférieure à celle nécessaire pour causer des émanations de NOx avec de l'azote qui proviendrait de l'air. Ainsi, l'essentiel des émissions de NOx proviendrait de la source du combustible, donc de la quantité d'azote présente dans la biomasse et qui est libérée lors de la combustion. Cette dernière est aussi sûrement impactée par la distribution de l'air dans le lit de combustible.

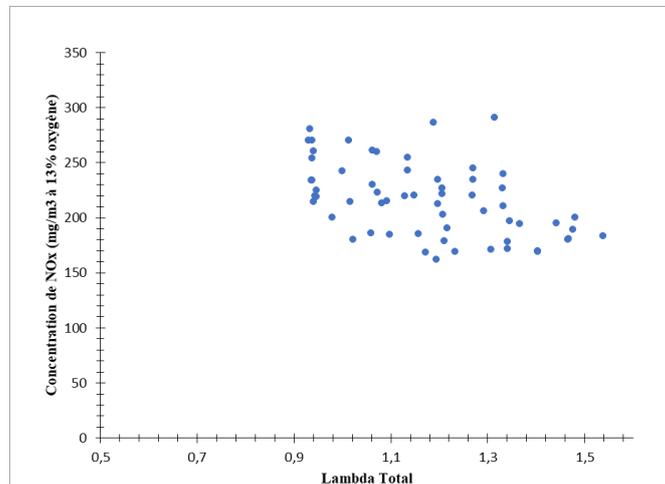


figure 2 : Graphique des émissions de NOx normalisées en fonction du débit d'air

Sur le graphique ci-dessus, nous constatons que les concentrations de NOx relevées par les appareils au cours des mesures sont assez proches et ne semblent pas réellement varier du facteur d'air total. Nous sommes en mesure d'expliquer cela par le fait que, comme expliqué précédemment, la production de NOx provient surtout de la biomasse et pas de la quantité d'air entrant dans la chambre de combustion. Cependant, nous allons prouver par la suite que les émissions dépendent de la position des venues d'air dans la chambre de combustion.

Pour limiter le nombre de facteurs, il a été décidé de fixer la valeur d'Om. Cela a permis de limiter le nombre de facteurs à tester en limitant le nombre de conditions à tester, tout en conservant une grande influence avec seulement les facteurs Ob et Os. Nous ne considérons donc pas l'arrivée en surface mais uniquement le lit de combustion.

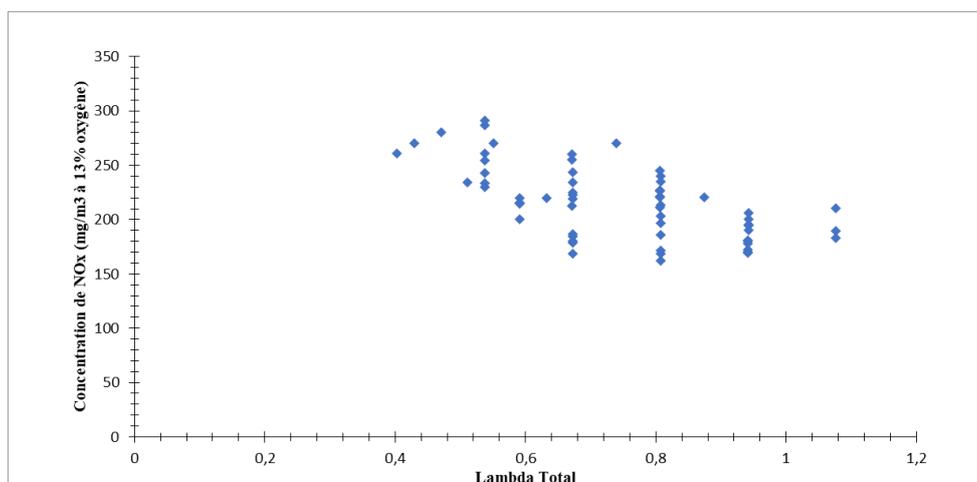


figure 3 : Graphique des émissions de NOx normalisées en fonction du facteur d'air Om et Ob

Sur le graphique ci-dessus, nous constatons une légère baisse des émissions de NOx si le lambda diminue (en ne prenant pas en compte la surface). Il y a donc une

influence relative entre les émissions des oxydes d'azote et la quantité d'air entrant, mais seulement pour la partie du lit de combustion. Comme deux lignes d'orifices fournissent le lit en oxygène, nous allons essayer de déterminer si la ligne d'orifices du bas a une plus grande influence que celle du milieu, ou inversement.

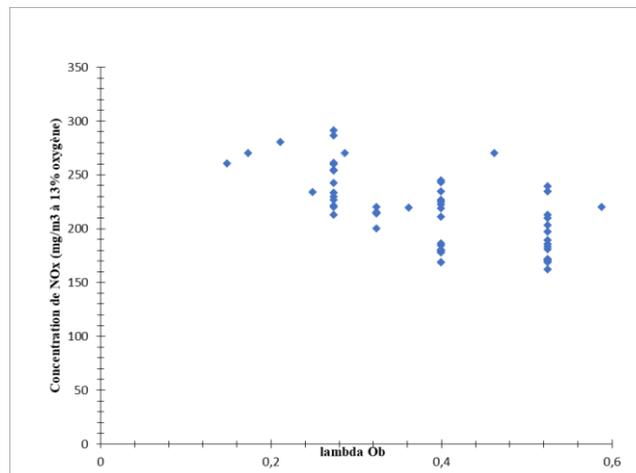


figure 4 : Graphique des émissions de NOx normalisées en fonction du facteur d'air O_b

Sur le graphique ci-dessus, soit les émissions de NOx en fonction de O_b , nous constatons une répartition semblable, voire quasi similaire, à celle sur le graphique précédent. Ainsi, nous pouvons affirmer avec sûreté que la production des NOx est liée directement avec la ligne d'orifice du bas. Les NOx sont donc formés à la partie la plus inférieure de la chambre de combustion, au bas du lit de combustible.

5. LES PARTICULES

5.1. Formation des cendres volantes

La combustion de biomasse, bien qu'elle n'émette pas de dioxyde de carbone, rejette néanmoins de nombreuses autres particules néfastes pour l'environnement et notre santé. Lors d'une combustion incomplète, les hydrocarbures formés (atomes composés exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène) peuvent créer des particules de suie, connues pour être un très fort agent cancérigène et le deuxième facteur le plus important du réchauffement climatique (CancerEnvironnement, 2018).

La formation de suie dans la combustion de la biomasse est un processus physico-chimique complexe. Pour simplifier, elle a lieu suite à la nucléation d'hydrocarbures gazeux, c'est-à-dire à l'apparition de nouveaux germes qui vont ensuite croître et se coaguler pour former une structure solide. Ainsi, cette réaction dépend des propriétés chimiques de la biomasse mais aussi des conditions de combustion.

Par ailleurs, d'autres particules sont également formées, notamment provenant des substances non organiques de la biomasse, les plus dangereuses étant le potassium (K), le sodium (Na), et le chlore (Cl). Ces particules sont appelées cendres et il en existe deux types : les cendres volantes et les mâchefers.

Pour la formation des cendres volantes, ce sont tous les éléments non organiques cités précédemment qui se vaporisent, et de fait constituent des sels alcalins dans le gaz de combustion. Cette vaporisation dépend de nombreux facteurs tels que la taille des particules du combustible, la température de combustion ou bien encore le rapport molaire entre les différents éléments comme K/Si. Une fois formés, ces sels peuvent directement se

condenser sur les surfaces froides d'autres particules, mais peuvent aussi se nucléer en particules submicroniques (PM1), leur taille devenant inférieure à un micron, variant ainsi de quelques nanomètres à environ 200 nanomètres (Martinez-Martinez, 2021).

De ce fait, les sels les plus dérangeants sont KCl et NaCl, puisqu'ils peuvent former des couches de dépôts collants et corrosifs sur lesquelles les grosses particules de cendres volantes adhèrent encore plus. Ce type de particules est le plus dangereux pour la santé (Niemelä, et al., 2022).

D'autre part, pour ce qui est des mâchefers, ils sont produits à partir des matériaux partiellement ou totalement brûlés et sont donc conçus dans la chambre de combustion quand les cendres atteignent ou dépassent les températures de fusion. Ils sont donc composés de particules de sables, majoritairement du quartz, mélangées avec des impuretés minérales contenues dans la biomasse (Agrela, Cabrera, Morales, Zamorano, & Alshaaer, 2019).

5.2. Technique de contrôle et de gestion des cendres volantes

Les cendres volantes (fine fly ashes) sont des cendres qui sont récupérées au niveau des équipements d'épurations des fumées. On distingue les cendres selon leur lieu de récupération:

- Cendres volantes de lits fluidisés (Fly ash from BFB) : cendres produites par les équipements d'épuration des fumées dans les installations comprenant des lits fluidisés
- Cendres grossières (Boiler fly ash) : cendres issues des équipements de dépoussiérage des fumées
- Cendres de filtres à manche (Fine fly ash from baghouse) : cendres récupérées par des équipements d'épuration des fumées de type filtre à manche.
- Cendres d'électrofiltre (Fine fly ash from electrostatic precipitators) : cendres issues des équipements d'épuration des fumées de type électrofiltre

Plusieurs facteurs influencent la quantité et la qualité des cendres produites.

Au cours du traitement de la biomasse, il est difficile d'évaluer et de quantifier la quantité de cendres émises. On tente donc de contrôler la répartition massique, soit la proportion des cendres produites.

Il faut savoir que la proportion des cendres obtenue et leurs teneurs en différentes substances suite aux traitements, peut varier selon l'origine de la biomasse. Par exemple, les cendres de paille sont très riches en silice contrairement aux cendres de bois. Il faut donc prendre en considération quelle intrants on utilise afin de savoir quel traitement réaliser. Le type de conditionnement appliqué à ces intrants (broyage, criblage...) va également impacter les résultats finaux.

Si nous nous intéressons à la méthode de combustion, il est nécessaire d'avoir une stabilité lors de ce processus. Les appareils doivent être bien maintenus, et le processus de combustion doit également être sous contrôle afin d'éviter la formation d'imbrûlés, soit des mâchefers. Les types d'équipements ont non seulement un impact sur la proportion massique des cendres mais également sur leur qualité.

Il existe plusieurs types d'équipements de combustion : les fours à grilles et les fours à lits fluidisés. Alors que dans les fours à grille on traite les déchets dans un foyer sur une grille mobile à travers laquelle l'air circule afin de réaliser la combustion, les fours à lits fluidisés consistent à faire brûler la biomasse sur un lit de matériaux mis en suspension par injection d'air. Cette différence a pour conséquence que la teneur des cendres volantes des lits fluidisés est moins concentrée en éléments traces métalliques que celles provenant de four à grilles : la teneur en Zn, par exemple, est de 5 435 mg/kg de matière sèche dans les

cenres volantes provenant des fours à grilles, tandis qu'elle est de 698 mg/kg de matière sèche lorsqu'elles proviennent des fours à lits fluidisés (RECORD, 2016).

Les conditions d'opérations sont également à prendre en considération. Les mâchefers qui sont des résidus solides de la combustion et qui sont produits suite à des incidents graves liés au foyer (encrassement du foyer et du conduit de fumées allant jusqu'à la chaudière, blocage des équipements mécaniques telles que les grilles, dégradation par corrosions des matériaux...). Ainsi, il est impératif de travailler avec des cenres sèches dans les foyers à biomasse, c'est-à-dire travailler dans des conditions dans lesquelles on ne franchit à aucun moment les températures de fusion.

Afin de contrôler ces résidus, il est préférable de travailler à une température minimale pour la combustion de la biomasse, mais à la température maximale pour le foyer. On doit déterminer une zone dite d'opérabilité qui prend en considération ces critères. On doit éviter la production des sels alcalins liquides, qui ont une température de fusion pas très élevée, afin de ne pas obtenir de solides lors de leur refroidissement à la fin du processus de combustion.

On peut limiter les élévations de température et apporter de l'oxygène pour assurer la combustion. Pour cela, on peut extraire la chaleur par les surfaces d'échanges thermiques, c'est-à-dire des parois du foyer et/ou travailler avec un excès d'air. Cependant, cela aura pour conséquence une réduction du rendement global de la chaudière à cause des pertes à la cheminée accrues. L'intérêt de cette méthode reste donc limité (Royo, Canalis, & Quintana, 2022) (ADEME, 2013).

On réalise également le traitement des particules dans les fumées à la suite de la procédure de combustion, ce qui impacte la qualité des cenres émises. Il existe diverses méthodes de traitement, par exemple il existe également des filtres à manches qui consistent à contrôler les particules, mais il est très difficile de déterminer le taux de filtration réalisé par cette méthode. Il existe aussi des électrofiltres qui utilisent la force électrostatique afin de séparer les résidus solides des gaz. Les cyclones et les multi cyclones sont également très fréquemment utilisés. Il s'agit d'un appareil, de forme de cône inversé, qui capte les déchets grâce à la gravité (BiomasseNormandie, 2022) (Borgwardt, Harrington, & Spaite, 1968) (RECORD, 2016).

Finalement, on place les cenres dans des installations de stockage de déchets (silos ou des fosses) afin de réaliser leurs récupérations. Il y a également des enfouissements qui sont réalisés mais avant cela, des traitements ont lieu pour que les cenres volantes respectent les normes et soient moins polluantes. La stabilisation des cenres est nécessaire et elle peut se faire via diverses méthodes. Par exemple l'humidification avant retour au sol en forêt (qui permet une réduction du caractère pulvérulent, de la chaux vive), ou encore la maturation (qui permet diminution de la solubilité).

On constate donc qu'on peut contrôler à plusieurs niveaux du processus les cenres volantes. Mais il est impossible de réduire leur production. Néanmoins, on peut diminuer la proportion de ces cenres volantes afin d'améliorer le rendement global, et on peut améliorer la qualité de celles-ci afin de pouvoir l'exploiter. La quantité et qualité des cenres sont beaucoup trop variables. Quant à la production des mâchefers, elle peut être mieux contrôlée, mais elle dégrade considérablement la qualité de la combustion.

5.3. Réutilisation des cenres

Même si les cenres ont de nombreux aspects néfastes sur la santé et l'environnement, elles peuvent être utilisées dans d'autres procédés.

Ces possibilités de recyclage dépendent avant tout de la composition chimique des cenres et de leur dangerosité. Nous allons ici en citer deux exemples.

L'un des domaines qui peut se servir des cendres produites est l'agriculture. En effet, durant leur croissance les plantes ont besoin de s'alimenter en nutriments afin de fabriquer de la matière. De cette manière, les macronutriments essentiels au développement des plantes sont l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le soufre (S). Cependant le phosphore et le potassium n'ont pas le temps de se régénérer à l'échelle de vie humaine ; ces éléments doivent donc être ajoutés sous la forme de matière organique (comme du compost) et d'engrais non organiques afin de maintenir la durabilité des sols. D'autre part, les éléments Ca, Mg et S quant à eux, peuvent parfois limiter la croissance des végétaux dans certains types de sol, lorsqu'ils sont en trop grandes quantités, c'est pourquoi ils ne sont ajoutés de façon mesurée que quand cela est nécessaire. Ainsi, nous avons vu précédemment que la plupart de ces nutriments restent dans les cendres après combustion, permettant de ce fait leur réutilisation, mais seulement si la concentration en polluants est assez basse (Zhai, Burke, & Stewart, 2021).

Une autre manière de recycler les cendres est de les utiliser dans les matériaux pour la construction, notamment dans le ciment. Ainsi, les cendres peuvent directement être utilisées comme constituant du ciment, ou alors comme composant additif du béton (RECORD, 2016).

Les cendres volantes possèdent les mêmes propriétés que le ciment. Cela permettrait donc de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production de ciment, mais aussi de réduire la consommation d'énergie et de matières premières de l'industrie du ciment. Néanmoins, certains éléments potentiellement toxiques pourraient aussi être libérés au cours de cette transformation (Tosti, van Zomeren, Pels, Damgaard, & Comans, 2020).

Il existe donc différentes méthodes pour valoriser les cendres issues de la combustion de la biomasse, bien que souvent ces procédés entraînent eux aussi certains problèmes pour l'environnement.

5.4. Interprétations de données expérimentales

Sur le graphique ci-dessous, il peut être observé que la température a aussi une influence sur les particules, car la température de la chambre serait impactée par l'air qui rentre dans le foyer. Une augmentation de la température a pour conséquence une augmentation de la concentration des particules.

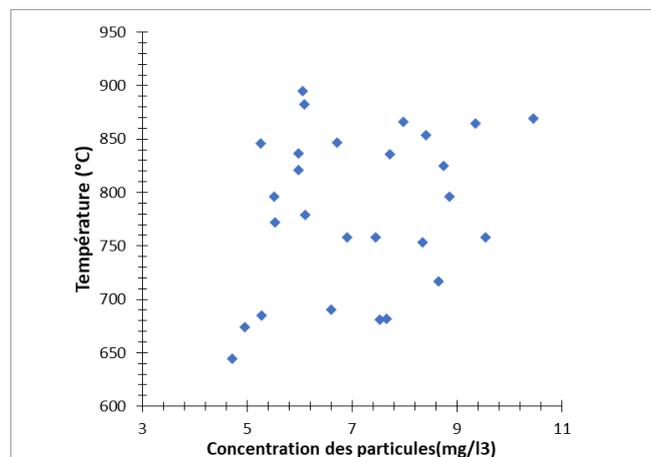


figure 5 : Graphique de la température dans la chambre de combustion, en haut du lit de granulés, en fonction de la concentration des particules

Sur le graphique ci-dessous, nous pouvons remarquer une certaine proportionnalité entre la concentration en particules et le facteur d'air : plus le débit d'air est important, plus il y a de particules produites. Ce graphique prend seulement en compte les cendres volantes. Cette conclusion est opposée à celle faite pour les NOx, il faut donc prendre en compte toutes les émissions lorsque l'on modifie un facteur.

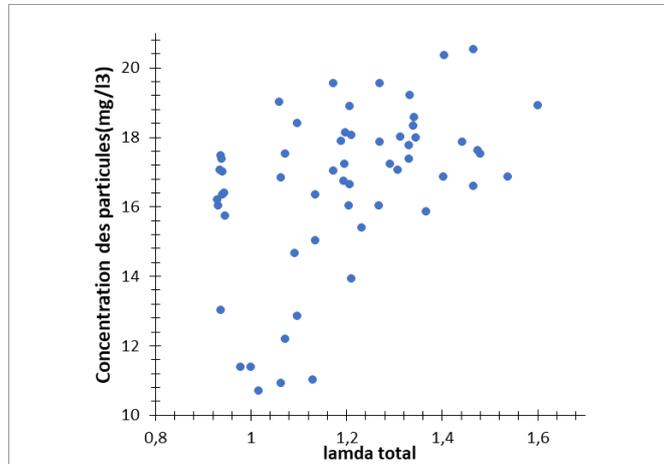


figure 6 : Graphique de la concentration en particules en fonction du facteur d'air

Cette étude nous amène à la conclusion que la combustion de biomasse est un phénomène complexe dépendant de nombreux facteurs. Ces derniers sont divers et sont directement liés avec les différentes émissions dues au mécanisme de combustion.

Par exemple, en augmentant la quantité d'air arrivant au lit de combustible, la combustion est meilleure. Cependant, cela entraîne inévitablement une perte d'efficacité et une diminution de la température. Cela s'explique par le caractère inerte de l'azote lors de la combustion : la température va toujours être inférieure à 1300°C (les 78% d'azote de l'air ne vont pas réagir), ce qui a comme conséquence l'augmentation de l'effet thermique et donc une diminution de la température. De ce fait, il y a une augmentation des émissions des particules mais une diminution de NOx.

Il est donc important de rechercher la meilleure optimisation des paramètres car les émissions sont polyfactorielles.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'un des enjeux majeurs du XXI^{ème} siècle est la transition énergétique. L'un des objectifs de cette transition est la décarbonation de la production d'énergie pour ainsi réduire les émissions de gaz à effets de serre, mais aussi abandonner progressivement les énergies fossiles. On doit donc effectuer une transition énergétique vers les énergies renouvelables. La biomasse paraît une bonne alternative, mais elle présente elle aussi des inconvénients, notamment des émissions de NOx et de particules nocives pour l'environnement et la santé lors de la combustion. Nous avons étudié le cas de la combustion de la biomasse, réaction exothermique qui produit de l'énergie thermique. C'est pour cela qu'il est nécessaire de chercher des méthodes de réductions de ces émissions.

Dans le cas des émissions de NOx, il existe des méthodes dites primaires et secondaires, qui sont applicables à différents moments de la combustion de la biomasse. Pour les émissions de particules, il est primordial de diminuer la proportion de cendres volantes en comparaison aux mâchefers, puisque ces derniers sont réutilisables dans de nombreux domaines.

Toutefois, le recyclage des cendres est en réalité un processus à court terme, puisque, utilisées dans l'agriculture, elles finiraient par provoquer un changement de pH du sol, et que les briques fabriquées peuvent être instables dans le temps. Il existe donc encore des limites aux méthodes de réduction de ces émissions, qui sont et qui seront le sujet d'étude dans un proche avenir.

Ce projet nous a permis de découvrir une énergie renouvelable moins prisée que d'autres. Pour cela, nous avons d'abord étudié en détail le principe de la combustion de la biomasse et de la transition énergétique. Ensuite nous nous sommes intéressés en détail aux émissions produites par la combustion et aux méthodes qui permettent de les réduire. Ce fut l'occasion de découvrir de nouveaux concepts concernant les inconvénients de la biomasse et de réfléchir aux moyens de répondre à ces derniers. En travaillant sur ce projet, nous avons pu développer de nombreuses connaissances dans de nombreux domaines qui nous étaient encore inconnus. Ce fut également l'occasion pour nous de travailler en groupe, d'apprendre à respecter les opinions de chacun et de développer notre capacité d'autonomie. Nous avons pu créer une cohésion de groupe et une dynamique de partage de nos idées qui ont été un moteur pour ce projet.

Ce fut également l'occasion de découvrir l'outil JabRef, qui permet de constituer une bibliographie conforme aux usages et également les ressources de l'INSA, via l'ENT et le moteur de recherche d'articles scientifiques comme Science Direct. Finalement nous avons pu étendre notre connaissance de l'usage du moteur de recherche Google Scholar.

Malgré les nombreuses méthodes déjà étudiées pour réduire les émissions de NOx et de particules, il y a encore des améliorations à apporter puisqu'elles sont assez peu répandues pour l'instant. De plus, en continuant à travailler sur cette problématique, de nouvelles solutions émergeront et pourront peut-être rendre la combustion de la biomasse le moyen le plus utilisé pour la production d'énergie, permettant ainsi de réaliser une transition vers des énergies renouvelables et plus durables.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ActuEnvironnement. (2007). Mal contrôlée, la combustion de biomasse est une importante source de pollution atmosphérique particulaire. *Mal contrôlée, la combustion de biomasse est une importante source de pollution atmosphérique particulaire*. Récupéré sur https://www.actu-environnement.com/ae/news/cnrs_carbosol_biomasse_pollution_feux_4115.php4#:text=à nos abonnés.-,Mal contrôlée, la combustion de biomasse est une,source de pollution atmosphérique particulaire&text=Les feux de cheminée, feux,Carbosol, coordonné par le CNRS
- ADEME. (2007). Les émissions atmosphériques de la combustion de biomasse.
- ADEME. (2013). Bonnes pratiques bas-NOx pour chaudières à biomasse.
- ADEME. (2018). Bilan GES. *Bilan GES*. Récupéré sur <https://www.economiedenergie.fr/les-emissions-de-co2-par-energie/>
- ADEME. (2018). Entreprises : comment maîtriser les émissions de NOx ? *Entreprises : comment maîtriser les émissions de NOx ?* Récupéré sur <https://expertises.ademe.fr/professionnels/entreprises/reduire-impacts/reduire-emissions-polluants/dossier/oxydes-dazote-nox/entreprises-comment-maitriser-emissions-nox>
- Agrela, F., Cabrera, M., Morales, M. M., Zamorano, M., & Alshaaer, M. (2019). Biomass fly ash and biomass bottom ash. Dans *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete* (pp. 23–58). Elsevier. doi:10.1016/b978-0-08-102480-5.00002-6
- Asquer, C., Cappai, G., Carucci, A., Gianninis, G. D., Muntoni, A., Piredda, M., & Spiga, D. (2019, April). Biomass ash characterisation for reuse as additive in composting process. *Biomass and Bioenergy*, 123, 186–194. doi:10.1016/j.biombioe.2019.03.001
- Asthana, A., Sessiecq, P., Patisson, F., & Ablitzer, D. (2007). Modélisation de la formation des NOx dans le lit d'un incinérateur d'ordures ménagères à grille.
- Baxter, L. (2005). Biomass impacts on SCR catalyst performance. *Biomass impacts on SCR catalyst performance*. Récupéré sur https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/24/2017/03/Combined_Final_Report_SCR.pdf
- BiomasseNormandie. (2022). Combustion du bois. *Combustion du bois*. Récupéré sur <https://www.biomasse-normandie.fr/encyclopedie/combustion-du-bois/#:text=Réaction chimique d'oxydation de,et combustion du résidu carbonneux>
- BiomasseNormandie. (2022). Traitement des fumées. *Traitement des fumées*. Récupéré sur <https://www.biomasse-normandie.fr/encyclopedie-du-bois-energie/technologies-des-chaufferies-a-alimentation-automatique/traitement-des-fumees/>
- Borgwardt, R. H., Harrington, R. E., & Spate, P. W. (1968, June). Filtration Characteristics Of Fly Ash from a Pulverized Coal-Fired Power Plant. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 18, 387–390. doi:10.1080/00022470.1968.10469143
- BP. (2021). Statistical review of world energy. *Statistical review of world energy*. Récupéré sur <https://ourworldindata.org/sources-global-energy>
- CancerEnvironnement. (2018). Suie et carbone suie. *Suie et carbone suie*. Récupéré sur <https://www.cancer-environnement.fr/551-Suie-et-carbone-suie.ce.aspx#>

- Claassen, P. A., van Lier, J. B., Contreras, A. M., van Niel, E. W., Sijtsma, L., Stams, A. J., . . . Weusthuis, R. A. (1999). Utilisation of biomass for the supply of energy carriers. *Springer-Verlag*.
- Climat.be. (2019). Les différents gaz à effet de serre. *Les différents gaz à effet de serre*. Récupéré sur <https://climat.be/changements-climatiques/causes/gaz-a-effet-de-serre>
- ClimateWatch. (2020). Global greenhouse gas emissions by gas. *Global greenhouse gas emissions by gas*. Récupéré sur <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>
- ClimateWatch. (2020). Global greenhouse gas emissions by sector. *Global greenhouse gas emissions by sector*. Récupéré sur <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>
- ConnaissanceDesEnergies. (2011). Gazéification. *Gazéification*. Récupéré sur <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/gazeification>
- Cruz, N. C., Silva, F. C., Tarelho, L. A., & Rodrigues, S. M. (2019, November). Critical review of key variables affecting potential recycling applications of ash produced at large-scale biomass combustion plants. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104427. doi:10.1016/j.resconrec.2019.104427
- Das, S., Sarkar, P. K., & Mahapatra, S. (2021, February). Single particle combustion studies of coal/biomass fuel mixtures. *Energy*, 217, 119329. doi:10.1016/j.energy.2020.119329
- Economiedenergie. (2012). Les émissions de co2 par énergie. *Les émissions de co2 par énergie*. Récupéré sur <https://www.economiedenergie.fr/les-emissions-de-co2-par-energie/>
- EDF. (2022). L'épuisement des ressources. *L'épuisement des ressources*. Récupéré sur <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/le-developpement-durable/l-epuisement-des-ressources>
- Gehrig, M., Wöhler, M., Pelz, S., Steinbrink, J., & Thorwarth, H. (2019, January). Kaolin as additive in wood pellet combustion with several mixtures of spruce and short-rotation-coppice willow and its influence on emissions and ashes. *Fuel*, 235, 610–616. doi:10.1016/j.fuel.2018.08.028
- Godbout, S., Palacios, J. H., Larouche, J. P., Brassard, P., & Pelletier, F. (2012). Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse agricole à la ferme. *Bilan énergétique, émissions gazeuses et particulaires de la combustion de la biomasse agricole à la ferme*. Récupéré sur https://www.biopierre.com/wp-content/uploads/2016/10/godbout-et-al-2012_rapport_combustion_biomasse.pdf
- Izi. (2018). Tout savoir sur la chaudière bas NOx. *Tout savoir sur la chaudière bas NOx*. Récupéré sur <https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/la-chaudiere-bas-nox>
- Kongboon, R., Gheewala, S. H., & Sampattagul, S. (2022, April). Greenhouse gas emissions inventory data acquisition and analytics for low carbon cities. *Journal of Cleaner Production*, 343, 130711. doi:10.1016/j.jclepro.2022.130711
- Li, X., Li, K., Peng, Y., Li, X., Zhang, Y., Wang, D., . . . Li, J. (2018, September). Interaction of phosphorus with a FeTiOx catalyst for selective catalytic reduction of NOx with NH3: Influence on surface acidity and SCR mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 347, 173–183. doi:10.1016/j.cej.2018.04.035
- Liu, X., Luo, Z., & Yu, C. (2019, April). Conversion of char-N into NOx and N2O during combustion of biomass char. *Fuel*, 242, 389–397. doi:10.1016/j.fuel.2019.01.061
- L'usineNouvelle. (2019). Et si on arrêta d'enfouir les pales d'éoliennes? *Et si on arrêta d'enfouir les pales d'éoliennes?* Récupéré sur

<https://www.usinenouvelle.com/article/et-si-on-arretait-d-enfour-les-pales-d-eoliennes.N807845>

- Ma, W., Ma, C., Liu, X., Gu, T., Thengane, S. K., Bourtsalas, A., & Chen, G. (2021, April). Nox formation in fixed-bed biomass combustion: Chemistry and modeling. *Fuel*, 290, 119694. doi:10.1016/j.fuel.2020.119694
- Marchetti, S., Mollerup, S., Gutzkow, K. B., Rizzi, C., Skuland, T., Refsnes, M., . . . Holme, J. A. (2021, September). Biological effects of combustion-derived particles from different biomass sources on human bronchial epithelial cells. *Toxicology in Vitro*, 75, 105190. doi:10.1016/j.tiv.2021.105190
- Martinez-Martinez, A. A. (2021). Etude des émissions polluantes de la combustion de biomasses dans une chaudière à granulés.
- Mathias, E., & Robert, C. (2020). La biomasse énergie est-elle neutre en carbone ?
- Mladenović, M., Paprika, M., & Marinković, A. (2018, February). Denitrification techniques for biomass combustion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3350–3364. doi:10.1016/j.rser.2017.10.054
- Mousavi, S. M., Fatehi, H., & Bai, X.-S. (2021, June). Numerical study of the combustion and application of SNCR for NO reduction in a lab-scale biomass boiler. *Fuel*, 293, 120154. doi:10.1016/j.fuel.2021.120154
- Munawar, M. A., Khoja, A. H., Naqvi, S. R., Mehran, M. T., Hassan, M., Liaquat, R., & Dawood, U. F. (2021, October). Challenges and opportunities in biomass ash management and its utilization in novel applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111451. doi:10.1016/j.rser.2021.111451
- Namkung, H., Park, J.-H., Lee, Y.-J., Song, G.-S., Choi, J. W., Park, S.-J., . . . Choi, Y.-C. (2021, May). Performance evaluation of biomass pretreated by demineralization and torrefaction for ash deposition and PM emissions in the combustion experiments. *Fuel*, 292, 120379. doi:10.1016/j.fuel.2021.120379
- Nguyen, T. H. (2013). Émissions polluantes des NOx : mécanisme de formation et de réduction.
- Niemelä, N. P., Mylläri, F., Kuittinen, N., Aurela, M., Helin, A., Kuula, J., . . . Joronen, T. (2022, June). Experimental and numerical analysis of fine particle and soot formation in a modern 100 MW pulverized biomass heating plant. *Combustion and Flame*, 240, 111960. doi:10.1016/j.combustflame.2021.111960
- Ozgen, S., Cernuschi, S., & Caserini, S. (2021, January). An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110113. doi:10.1016/j.rser.2020.110113
- Proxiserve. (2018). Qu'est-ce qu'une chaudière bas NOx ? *Qu'est-ce qu'une chaudière bas NOx ?* Récupéré sur <https://www.proxiserve.fr/monchauffagisteprive/conseils-astuces/chaudiere-gaz/choisir-sa-chaudiere/chaudiere-bas-nox/#:text=En effet, la chaudière bas,permettant de hautes performances énergétiques>
- Rajasekar, E., Murugesan, A., Subramanian, R., & Nedunchezian, N. (2010, September). Review of NOx reduction technologies in CI engines fuelled with oxygenated biomass fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2113–2121. doi:10.1016/j.rser.2010.03.005
- RECORD. (2016). Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse. *Valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse*. Récupéré sur https://www.record-net.org/storage/etudes/14-0913-1A/rapport/Rapport_record14-0913_1A.pdf

- Royo, J., Canalis, P., & Quintana, D. (2022, February). Chemical study of bottom ash sintering in combustion of pelletized residual agricultural biomass. *Fuel*, 310, 122145. doi:10.1016/j.fuel.2021.122145
- Selectra. (2022). Transition énergétique : définition, enjeux et loi. *Transition énergétique : définition, enjeux et loi*. Récupéré sur <https://climate.selectra.com/fr/comprendre/transition-energetique>
- SVIIndustrial. (2020). The difference between SNCR and SCR. *The difference between SNCR and SCR*. Récupéré sur <https://sviindustrial.com/2020/02/25/the-difference-between-sncr-and-scr/>
- Tosti, L., van Zomeren, A., Pels, J. R., Damgaard, A., & Comans, R. N. (2020, February). Life cycle assessment of the reuse of fly ash from biomass combustion as secondary cementitious material in cement products. *Journal of Cleaner Production*, 245, 118937. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118937
- USCUSA. (2013). Environmental impacts of renewable energy technologies. *Environmental impacts of renewable energy technologies*. Récupéré sur <https://www.ucsusa.org/resources/environmental-impacts-renewable-energy-technologies>
- USCUSA. (2017). Benefits of renewable energy use. *Benefits of renewable energy use*. Récupéré sur <https://www.ucsusa.org/resources/benefits-renewable-energy-use#.V3Y7npOLR24>
- Vicente, E. D., & Alves, C. A. (2018, January). An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. *Atmospheric Research*, 199, 159–185. doi:10.1016/j.atmosres.2017.08.027
- Youmatter. (2016). Les énergies renouvelables sont-elles vraiment une solution écologique ? *Les énergies renouvelables sont-elles vraiment une solution écologique ?* Récupéré sur <https://youmatter.world/fr/energie-renouvelable-solution-viable-probleme/#:text=Enfin, le dernier problème des,Idem pour l'éolien>
- Youmatter. (2022). Energies renouvelables : définition, exemples, avantages et limites. *Energies renouvelables : définition, exemples, avantages et limites*. Récupéré sur <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>
- Zellagui, S. (2016). Pyrolyse et combustion de solides pulvérisés sous forts gradients thermiques : Caractérisation de la dévolatilisation, des matières particulaires générées et modélisation.
- Zhai, J., Burke, I. T., & Stewart, D. I. (2021, November). Beneficial management of biomass combustion ashes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111555. doi:10.1016/j.rser.2021.111555
- Zhai, M., Li, X., Yang, D., Ma, Z., & Dong, P. (2022, February). Ash fusion characteristics of biomass pellets during combustion. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130361. doi:10.1016/j.jclepro.2022.130361
- Zhao, B., Su, Y., Liu, D., Zhang, H., Liu, W., & Cui, G. (2016, October). SO₂/NO_x emissions and ash formation from algae biomass combustion: Process characteristics and mechanisms. *Energy*, 113, 821–830. doi:10.1016/j.energy.2016.07.107