



Bonnes pratiques bas-NOx pour chaudières à biomasse.

Janvier 2013

Document réalisé grâce aux contributions de :

S. PREAU, G.MARTIN (ATANOR)
C. TOURNEBIZE, B. CHIEZE (COMPTE-R)
T. ROGAUME (Institut PPRIME)
Y. ROGAUME (LERMAB)

Coordination technique :

Erwan AUTRET, Florence PROHARAM, Manon GERBAUD
Convention : 1001C0051

L'ADEME en bref :

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr.

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 la 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.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	4
Liste des tableaux	4
Résumé	5
1. Biomasses et combustion	7
1.1. Origine et caractéristiques des biomasses	7
1.2. Equipements de combustion pour les biomasses	7
1.3. Aspects théoriques de la combustion des biomasses	8
1.4. Conception des foyers à biomasse	9
2. Les oxydes d'azote	13
2.1. Définition	13
2.2. Mécanismes de formation	13
2.3. Lien entre émissions d'oxydes d'azote et d'imbrûlés	15
2.3.1. Facteurs influençant les émissions d'imbrûlés	15
2.3.2. Facteurs influençant les émissions de NOx	16
2.3.3. Relation entre émissions d'oxydes d'azote et d'imbrûlés	17
3. Techniques de réduction des émissions de NOx	19
3.1. Différents types de techniques	19
3.2. Mesures primaires	20
3.2.1. Chaudières à biomasse en exploitation	20
3.2.2. Chaudières à biomasse neuves	20
3.3. Mesures secondaires	20
4. Comparaison technico-économique des différentes stratégies DéNOx	25
4.1. Respect d'une VLE dite « bas-NOx »	25
4.2. Respect d'une VLE dite « ultra-bas-NOx »	27
ANNEXES	29
A. Documentation complémentaire	29
B. Les biocombustibles solides	30
C. Réglementation sur les émissions applicable aux chaudières à biomasse au 01/01/2013.	31

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Exemple de chaudière bois à grille mobile (source : COMPTE.R)</i>	8
<i>Figure 2 : Représentation schématique des processus de combustion du bois</i>	9
<i>Figure 3 : Zone d'opérabilité de quelques biomasses</i>	10
<i>Figure 4 : Représentation schématique de la formation des NOx dans un foyer à biomasse.</i>	14
<i>Figure 5 : Allures des teneurs volumiques en oxygène d'une combustion étagée (courbe verte) et peu étagée (courbe rouge), pour un taux d'O₂ dans les fumées en sortie, de 7 % sur humide.</i>	16
<i>Figure 6 : Exemple de relation entre émissions de NOx et émissions d'imbrûlés</i>	17
<i>Figure 7 : Niveaux d'émission types de NOx atteints en fonction des stratégies DéNOx retenues et des teneurs en azote des combustibles. Source : Th. Nussbaumer</i>	19
<i>Figure 8 : Schéma d'une chaudière à grille équipée d'un traitement DéNOx par SNCR. Source : ATANOR</i>	21
<i>Figure 9 : Schéma d'une chaudière à combustibles solides équipée d'un traitement DéNOx par SCR. Source : ATANOR</i>	22
<i>Figure 10 : Influence de la température et du rapport molaire NH/NO sur le rendement DéNOx du procédé par SNCR. Courbes réalisées sur la base de tests réalisés sur un foyer spécifiquement adapté à la SNCR. Source : BABCOCK Entreprise/IFP.</i>	24

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Teneurs moyennes en azote mesurées sur différentes biomasses. Source : mesures réalisées par le LERMAB sur échantillons dans le cadre du projet ORENOX.</i>	15
<i>Tableau 2 : Taux de réduction maximum des émissions d'oxydes d'azote pour différents types de mesures.</i>	19
<i>Tableau 3 : Comparatif des procédés par SNCR et par SCR</i>	22
<i>Tableau 4 : Investissements relatifs requis par les différentes configurations de chaudières de 10 et 20 MW respectant les VLE dites « bas-NOx »</i>	26
<i>Tableau 5 : Risques opératoires associés à chaque stratégie DéNOx</i>	26
<i>Tableau 6 : Solutions les mieux adaptées pour réduire les émissions de NOx des chaudières à biomasse jusqu'à 150 mg/Nm³ à 11 % d'O₂</i>	26
<i>Tableau 7 : Normes relatives à la caractérisation des biocombustibles solides.</i>	30
<i>Tableau 8 : Différents types de combustibles biomasses utilisables en chaufferies ou pour le chauffage domestique.</i>	30
<i>Tableau 9 : Valeurs limites d'émission de polluants atmosphériques pour les chaudières à biomasse</i>	31

RESUME

L'utilisation de biomasses dans les chaudières industrielles ou les chaufferies collectives bénéficie d'un bilan environnemental favorable, car elle contribue à limiter l'effet de serre de façon significative, compte tenu des ressources mobilisables en France et ailleurs dans le Monde. Cependant, comme pour tous les autres combustibles, elle génère des polluants atmosphériques dont il convient de limiter les émissions.

Les oxydes d'azote, les imbrûlés gazeux et les particules font partie des substances particulièrement ciblées par les Pouvoirs Publics, car les rejets actuels restent à des niveaux élevés, malgré les efforts accomplis dans plusieurs domaines (industrie, automobile, etc.) ces dernières années. Les mécanismes de formation de ces polluants sont complexes et la conception et les réglages des chaudières à biomasse s'avèrent de plus en plus ardues pour satisfaire des réglementations qui ne pourront que se durcir.

Ce document sur les stratégies bas-NOx appliquées aux chaudières à biomasse a été rédigé par les acteurs du projet ORENOX (projet de développement de nouvelles chaudières « Bas-NOx » et « Ultra bas-NOx », initié et conduit par la société COMPTE.R). Il est destiné aux acteurs de la filière, en premier lieu les fabricants et les exploitants de chaudières. Ils doivent y trouver notamment :

- une information simple et claire sur l'origine des oxydes d'azote et sur les liens existant entre émissions d'oxydes d'azote et émissions d'imbrûlés ;
- une présentation des différentes stratégies pouvant être envisagées pour réduire les émissions de NOx ;
- un comparatif technico-économique de ces différentes stratégies ;
- un support pour la formation des nouveaux opérateurs ;

mais aussi :

- un descriptif simplifié de la combustion dans les chaudières à biomasse ;
- une présentation des mesures permettant de réduire les émissions d'imbrûlés ;
- une liste de sources d'information complémentaires.

SUMMARY

The use of biomass in industrial or collective boilers has a favorable environmental balance, because it helps to reduce the greenhouse effect significantly, given the resources available in France and elsewhere in the world. However, as with all other fuels, it generates air pollutants.

Nitrogen oxides, unburned gases and particles, are among the substances specifically targeted by the authorities, because current emission levels remain at high levels, despite the efforts made in several areas (industrial, automotive, etc.). Mechanisms of formation of these pollutants are complex and designing biomass boilers is becoming increasingly difficult in order to respect emission limits that are getting stricter and stricter.

This document on "Low-NOx" strategies applied to biomass boilers was written in the frame of the ORENOX project (development project of "Low-NOx" and "Ultra low-NOx" boilers, initiated and led by the company COMPTE.R). It is intended for players in the sector, primarily the manufacturers and operators of boilers. They will find in this document:

- a simple and clear information on the origin of nitrogen oxides and on the links between emissions of nitrogen oxides and unburned products;
- a presentation of different strategies that can reduce NOx emissions;
- a technical and economical comparison of these strategies;
- support for the training of new operators;

but also:

- a simplified description of the combustion process in biomass boilers;
- a presentation of measures to reduce emissions of unburned.

1. Biomasses et combustion

1.1. Origine et caractéristiques des biomasses

La gamme de combustibles couverte par le terme « biomasses » est très large, tant sont variées les sources possibles :

- produits de la forêt, bruts ou élaborés (plaquettes, écorces, granulés, etc.) ;
- sous-produits de l'agriculture et des industries agro-alimentaires (pailles, rafles, grignons, issues de céréales, etc.) ;
- cultures dédiées (taillis à courte rotation (TCR), miscanthus, sorgho, etc.) ;
- sous-produits de l'industrie du bois (sciures, copeaux, chutes de fabrication, etc.) ;
- certains déchets de bois (broyats de palettes, etc.) ;
- etc.

Les principales grandeurs qui caractérisent l'aptitude des biomasses à la combustion sont :

- la granulométrie ;
- la masse volumique en vrac ;
- le taux d'humidité ;
- la teneur en cendres ;
- le pouvoir calorifique ;
- la fusibilité des cendres ;
- la teneur en azote ;
- la teneur en soufre et en chlore.

Ces grandeurs font l'objet de normes existantes ou en cours d'élaboration (voir annexe).

Les biomasses se distinguent des combustibles fossiles (fuel lourd, gaz naturel, charbon, etc.), usuellement employés dans l'industrie et les chaufferies collectives, par :

- un pouvoir calorifique plus faible (à cause principalement du taux d'humidité élevé de la biomasse brûlée dans les chaudières et compris la plupart du temps entre 30 et 50 % sur brut) ;
- la présence d'agents comme les alcalins ou le chlore, qui peuvent conduire à des corrosions à haute température ;
- une fusibilité élevée des cendres avec certaines biomasses ; ce qui limite l'opérabilité des foyers.

1.2. Equipements de combustion pour les biomasses

Il existe plusieurs technologies possibles pour brûler des biomasses :

- foyer à grille fixe ;
- foyer à grille mobile ;
- brûleur ;
- lit fluidisé dense ;
- lit fluidisé circulant ;
- chambre cyclonique ;
- four tournant ;
- etc. ;

mais les foyers à grille mobile sont de loin les plus répandus (Figure 1). Cette prédominance s'explique par :

- la robustesse de ces appareils ;
- des exigences assez limitées pour la préparation des combustibles, contrairement à d'autres équipements comme les brûleurs ou les chambres cycloniques qui requièrent des granulométries fines par exemple ;
- la souplesse, qui permet de satisfaire des demandes en énergie très variables ;
- les coûts d'investissement et d'exploitation, plutôt dans la fourchette basse, comparativement aux autres systèmes ;
- un retour d'expérience important.

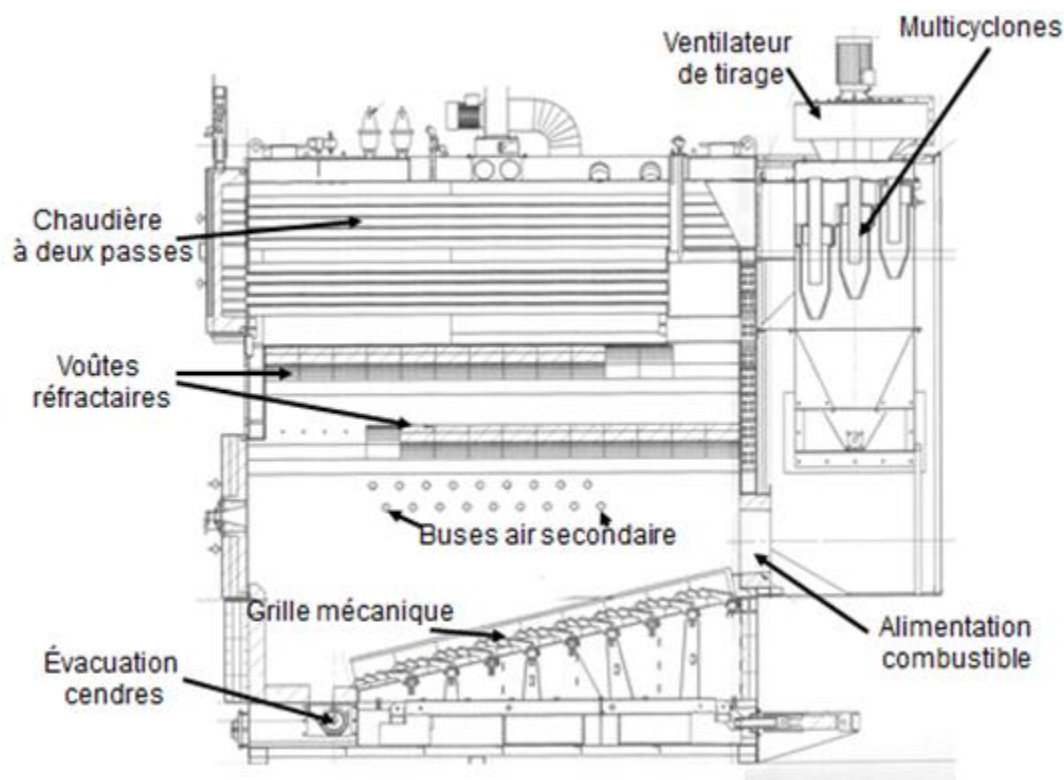


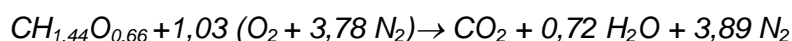
Figure 1 : Exemple de chaudière bois à grille mobile (source : COMPTE.R)

1.3. Aspects théoriques de la combustion des biomasses

Le mécanisme de combustion peut être résumé à :



Dans le cas du bois sec, en négligeant les éléments contenus sous forme de traces dans celui-ci (azote, soufre, chlore...) et les imbrûlés, la réaction bilan de la combustion à la stœchiométrie s'écrit :



où le bois est représenté par la formule chimique simplifiée $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$.

La combustion des biomasses se décompose en 4 étapes (voir Figure 2) :

- **Etape 1** : Le séchage et le chauffage du combustible jusqu'à une température de 200 °C environ.

- **Etape 2** : La dévolatilisation, c'est-à-dire la décomposition de la biomasse sous l'effet de la chaleur. Elle s'achève aux alentours de 500 – 600 °C et produit une phase gazeuse combustible (appelée « matières volatiles »), ainsi qu'une fraction solide, composée de coke et des cendres apportées par le combustible. La répartition en masse de ces deux phases varie suivant la nature de la biomasse et les conditions de la combustion, mais elle est typiquement de $\frac{3}{4}$ de gaz pour $\frac{1}{4}$ de coke.
- **Etape 3** : La combustion des matières volatiles, dès qu'elles rencontrent de l'oxygène ; ce qui génère une flamme dont la température varie entre 1 000 et 1 500 °C.
- **Etape 4** : La combustion de la fraction solide. Cette dernière étape se déroule aux environs de 900 – 1 000 °C et est de loin la plus longue.

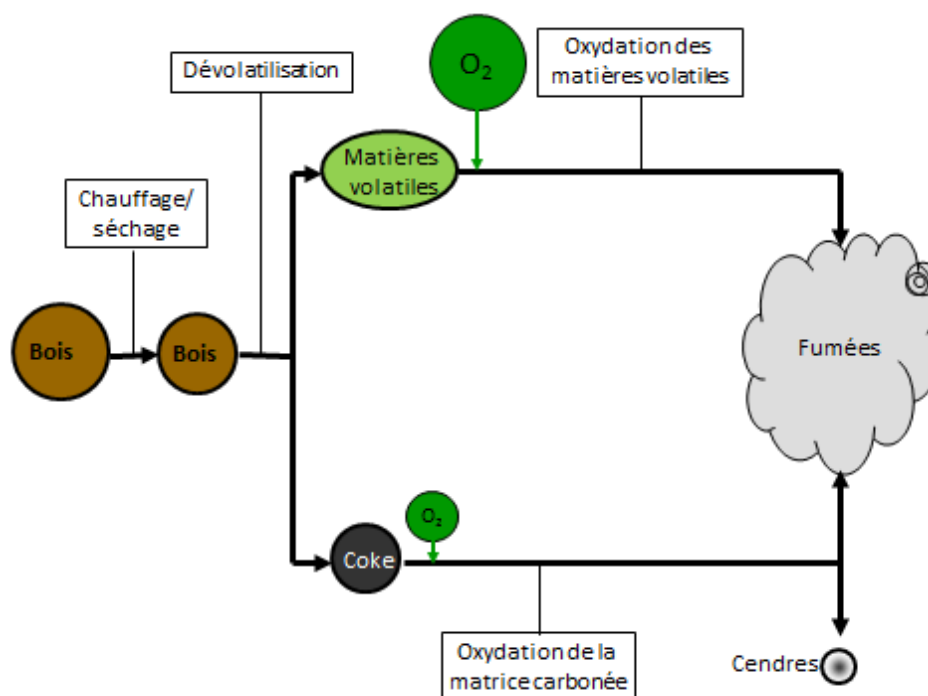


Figure 2 : Représentation schématique des processus de combustion du bois

Ce schéma réactionnel s'applique quel que soit le système de combustion mis en œuvre.

Dans les foyers à grille, les étapes 1, 2 et 4 se déroulent au niveau de la couche de combustible, tandis que l'espace surmontant ladite couche est le siège de l'étape 3 (nota : la combustion des matières volatiles peut aussi se développer partiellement au sein de la couche).

La réalisation des étapes 1 et 2 requiert un apport d'énergie, tandis que les étapes 3 et 4 en produisent.

1.4. Conception des foyers à biomasse

Pour obtenir une combustion de la biomasse régulière, complète et sans incident opératoire, tout foyer doit respecter les règles de base énumérées ci-après :

- **Stabilité de la combustion.** L'organe essentiel pour assurer cette stabilité est l'équipement de combustion (ou support de combustion). Il peut s'agir d'une grille, d'un brûleur, d'un lit fluidisé, etc. Sa première fonction est de maintenir à tout instant le rapport du débit de biomasse (combustible) sur le débit d'air (comburant) dans des limites qui évitent la formation d'imbrûlés ou de mâchefers. L'équipement de combustion a également pour fonction d'assurer le chauffage du combustible et de l'air entrant, jusqu'à la température de dévolatilisation, afin que la combustion soit auto-entretenu (nota : dans le cas des systèmes à grille, c'est surtout les parois chaudes du foyer qui assurent cette fonction).

- Eviter les mâchefers. Les mâchefers se forment quand les cendres atteignent ou dépassent les températures de fusion. Ces dernières sont toujours assez élevées avec les bois (cf. Figure 3), au-delà de 1 200 °C, mais elles peuvent être beaucoup plus basses avec les pailles par exemple (900 °C, voire moins). La présence de mâchefers se traduit par des incidents graves : encrassement du foyer et du conduit de fumées allant jusqu'à la chaudière, blocage des organes mécaniques (grille, soutirage des cendres), déséquilibre des apports en air (suroxygénation de certaines zones, tandis que d'autres sont en défaut trop prononcés d'oxygène), dégradation par corrosion des matériaux constitutifs du foyer, etc. C'est la raison pour laquelle les foyers à biomasse doivent impérativement travailler en cendres sèches, c'est-à-dire en ne franchissant à aucun moment les températures de fusion. Les deux principales solutions pour limiter les élévations de température dans un foyer sont :
 - o L'extraction de chaleur par des surfaces d'échange qui couvrent tout ou partie de l'intérieur du foyer (foyers à parois refroidies).
 - o D'opérer avec des excès d'air élevés, avec toutefois comme conséquence négative de dégrader le rendement global de la chaudière, à cause de pertes à la cheminée accrues.

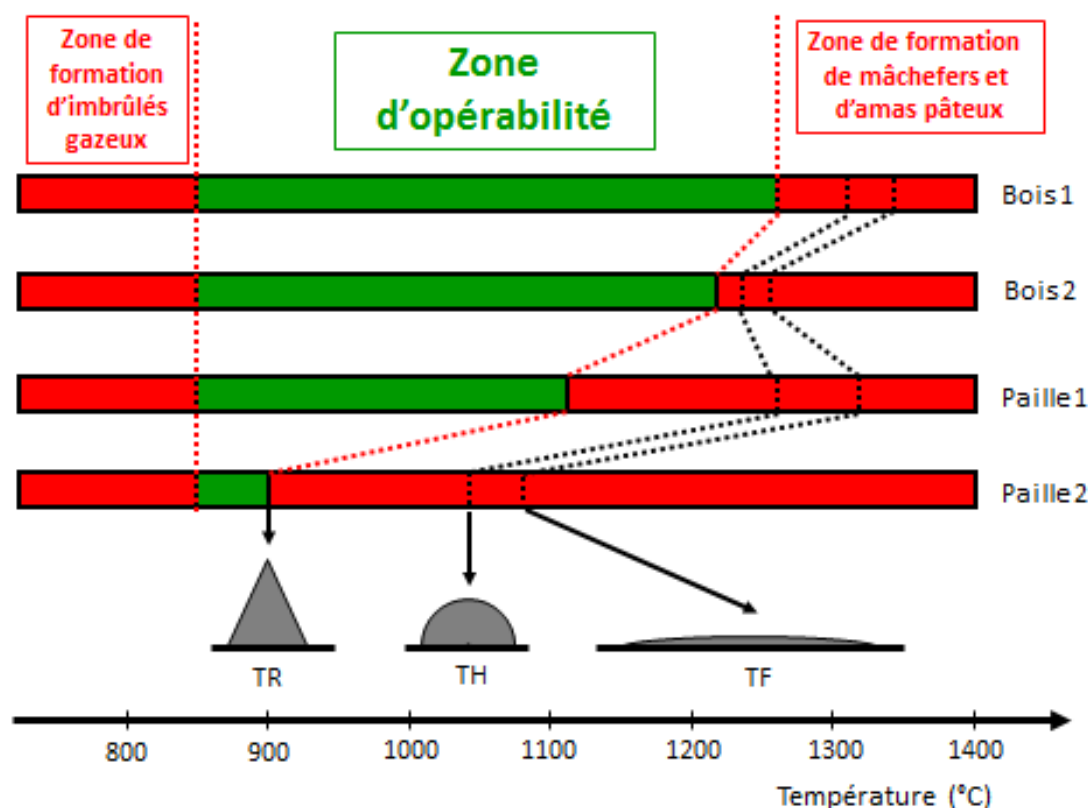


Figure 3 : Zone d'opérabilité de quelques biomasses

TR : Température de ramollissement.
 TH : Température d'hémisphère.
 TF : Température de fusion.

- Limitation de la production d'imbrûlés gazeux. Le monoxyde de carbone (CO) est le principal imbrûlé gazeux, mais quand la combustion est nettement dégradée, d'autres substances peuvent être présentes dans les fumées : méthane, composés hydrocarbonés oxygénés ou non, goudrons, etc. Les imbrûlés gazeux doivent être évités, car, en plus de leur impact nuisible pour l'environnement, ils conduisent à une diminution du rendement global de l'installation. Le CO étant un bon indicateur de la qualité de la combustion, on considère que celle-ci est satisfaisante, quand la teneur dans les fumées est inférieure à 100 mg/Nm³. Plusieurs causes peuvent être à l'origine des imbrûlés gazeux :

- Un apport en oxygène insuffisant. Le défaut d'air peut être permanent, si un ventilateur d'air est défectueux par exemple, ou ponctuel, si l'apport en combustible dans le foyer n'est pas régulier.
 - Un mélange imparfait du combustible et du comburant. Il peut s'agir d'injections d'air secondaire qui n'induisent pas un mélange suffisant avec les matières volatiles émises par le combustible sur la grille. La combustion est alors inaboutie et les fumées quittant le foyer pour pénétrer dans la chaudière sont inhomogènes, avec une partie suroxygénée et une autre partie sous-oxygénée (nota : les réactions de combustion cessent ou voient leur vitesses considérablement réduites, dès que les fumées pénètrent dans la chaudière, par suite de la chute des températures).
 - Un processus de combustion trop lent. Les imbrûlés, et le CO en particulier, sont difficiles à oxyder. Lorsque le temps de séjour des gaz dans le foyer est de 2 à 3 s, il faut que la température soit au minimum de 850 °C pour convertir tout le CO en CO₂.
- Limitation de la production d'imbrûlés solides. En combustion de biomasse, les imbrûlés solides peuvent être de deux types. Soit des suies, c'est-à-dire des particules essentiellement submicroniques qui se forment à partir d'espèces gazeuses imbrûlées, soit des éléments résiduels de la matrice carbonée. Ces derniers peuvent être extraits sous le foyer avec les cendres, s'ils sont de taille suffisante, ou être entraînés par les fumées lorsqu'il s'agit de produits fins. Comme pour les imbrûlés gazeux, les imbrûlés solides, essentiellement constitués par le carbone résiduel dans les cendres, induisent une perte de rendement de la chaudière. La présence d'imbrûlés dans les cendres peut être causée par :
- Un apport d'oxygène insuffisant.
 - Une température trop basse. Un compromis est à trouver, puisque la vitesse de combustion croît avec la température, mais que cette dernière ne doit pas être trop élevée, pour empêcher la formation de mâchefers.
 - Un temps de séjour du combustible dans le foyer trop court, compte tenu de sa distribution granulométrique et de la température qui y règne.

La nécessité d'éviter la formation d'imbrûlés, et surtout de mâchefers, impose une température minimale et une température maximale de foyer. Ces deux températures délimitent une zone d'opérabilité, qui est assez étendue avec les bois, mais réduite, voire quasi nulle, avec les biomasses d'origine agricole.

La maîtrise de l'apport d'air au combustible est fondamentale pour garantir une bonne qualité de combustion. Elle permet d'éviter la plupart des dysfonctionnements du foyer : formation de mâchefers, formation d'imbrûlés, présence de carbone dans les cendres, dégradation des réfractaires, etc.

2. Les oxydes d'azote

2.1. Définition

En pratique, on regroupe sous le terme oxydes d'azote (NOx), le monoxyde (NO), le dioxyde (NO₂) et le protoxyde (N₂O) d'azote. Lors de la combustion, on considère qu'environ 95 % des NOx sont produits initialement sous forme de NO. Le NO est ensuite converti dans l'air atmosphérique en NO₂ suivant divers processus.

Le NO est incolore, le NO₂ est de couleur rousse. Les nuances rousses des ciels urbains lors des pics de pollution sont liées à la présence de NO₂ en quantités importantes dans l'atmosphère.

Le NO et le NO₂ provoquent différents types d'affections pulmonaires. Le NO₂ est par ailleurs un des polluants impliqués dans la formation des pluies acides.

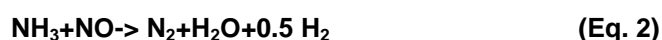
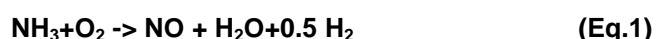
2.2. Mécanismes de formation

D'une manière générale, toute opération de combustion à l'air génère du monoxyde d'azote NO, qui se retrouve dans les fumées à des concentrations variant de quelques mg/Nm³, à plusieurs centaines (voire parfois milliers) de mg/Nm³.

Le NO se forme selon deux mécanismes principaux (Figure 4) :

- Le mécanisme dit « **NO-thermique** » correspond à l'oxydation d'une petite fraction de l'azote de l'air dans les zones les plus chaudes du foyer. L'azote N₂ étant une molécule extrêmement stable, il faut atteindre des températures élevées pour qu'elle réagisse avec l'oxygène. Cette réaction ne produit des quantités significatives de NO en regard des réglementations, qu'à partir de 1300 – 1400 °C. Pour une température donnée, la production de « NO thermique » augmente également avec l'excès d'air et avec le temps de séjour des produits de combustion dans les zones à haute température.
- Le mécanisme dit « **NO-combustible** » caractérise l'oxydation d'une partie des substances azotées présentes dans le combustible. La formation de « NO-combustible » est d'autant plus importante que la teneur en azote du combustible est élevée, mais il n'y a pas de relation linéaire entre les deux grandeurs. Dès l'entrée du combustible dans le foyer, ces substances azotées complexes se dégradent rapidement en d'autres molécules plus simples (HCN, NCO, NH_i, etc.). Deux types d'évolution peuvent ensuite être constatés pour ces molécules azotées :
 - o Si elles sont dans un milieu qui est localement oxydant (présence d'oxygène), elles évoluent vers NO par oxydation.
 - o Si elles ont un environnement réducteur (présence de substances hydrocarbonées CH_i, milieu déjà riche en NO), elles se convertissent en azote moléculaire N₂.

A titre d'illustration, dans le cas du NH₃, issu de la dévolatilisation de l'azote du combustible, les deux réactions bilan en compétition dans le foyer sont :



Tout facteur ayant tendance à favoriser la réaction (Eq.1) conduira à augmenter les émissions de « NO combustible ». Inversement, toute mesure favorisant la réaction (Eq.2) permettra de limiter les émissions. On voit que la réaction (Eq. 2) nécessite paradoxalement la présence de NO dans le foyer pour réduire le NH₃ en N₂.

A côté de NO, on trouve aussi des quantités moindres de dioxyde d'azote NO₂ dans les produits de combustion (quelques pourcent de l'ensemble des NOx), ainsi que du protoxyde d'azote N₂O, dans le cas des foyers opérant à des températures inférieures à 950 °C, comme les systèmes à lit fluidisé. Il est à noter que le NO se convertit progressivement en NO₂ lors de son refroidissement, en présence d'oxygène.

Les foyers à biomasse fonctionnant pratiquement toujours à des températures inférieures à 1300 – 1400 °C, c'est le mécanisme du « NO-combustible » qui est prépondérant dans la formation de NOx.

On estime généralement que l'azote du combustible contribue pour 65 à 95 % environ à la formation des NOx dans les foyers à biomasse, en fonction du taux d'azote dans le combustible et de la température atteinte dans le foyer (elle-même dépendante du taux d'humidité du combustible, de l'excès d'air, de la configuration du foyer...).

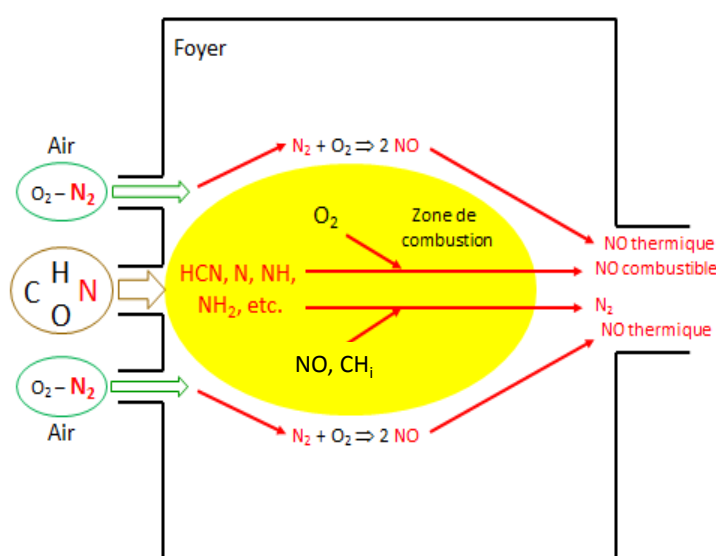


Figure 4 : Représentation schématique de la formation des NOx dans un foyer à biomasse.

Les biomasses sont essentiellement composées de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Elles contiennent également un peu d'azote, de 0,1 à 1,0 % pour les bois, parfois plus de 1 % pour les biomasses d'origine agricole (Tableau 1). Dans le cas des foyers conventionnels (c.-à-d. non prévus pour avoir de faibles émissions de NOx), on considère que 20 à 60 % de cet azote est converti en NO lorsqu'on brûle des bois faiblement azotés (0,1 %), ces pourcentages passant à 10 et 30 %, s'il s'agit de bois à 1 % d'azote.

Les émissions de NOx augmentent avec la teneur en azote des biomasses, mais pour une même teneur et un même équipement de combustion, on peut observer de grands écarts d'un combustible à l'autre ; ces écarts étant non expliqués à ce jour.

Type de combustible	Teneur massique en azote sur anhydre
Plaquette de hêtre	0,3 %
Plaquette de résineux	0,3 %
Plaquette de chêne	0,3 %
Miscanthus	0,3 %
Paille de blé	0,3 %
Ecorces de chêne	0,5 %
Bois de classe A	0,5 %
Rafles de maïs	0,6 %
Briquettes de chanvre	1,0 %
Taillis à courte rotation	1,3 %
Résidus de distillerie	1,6 %
Granulés de malterie	2,1 %

Tableau 1 : Teneurs moyennes en azote mesurées sur différentes biomasses. Source : mesures réalisées par le LERMAB sur échantillons dans le cadre du projet ORENOX.

2.3. Lien entre émissions d'oxydes d'azote et d'imbrûlés

2.3.1. Facteurs influençant les émissions d'imbrûlés

De façon générale, les émissions d'imbrûlés sont réduites lorsque les conditions dans le foyer sont favorables aux réactions d'oxydation :

- **Températures élevées.** On considère généralement que les températures doivent être supérieures à 850 °C, aussi bien en phase gazeuse qu'en phase solide, pour limiter la production d'imbrûlés à des niveaux acceptables.
- **Excès d'air suffisant.** De l'oxygène en excès (par rapport à la stœchiométrie) favorise les réactions d'oxydation et permet de limiter les imbrûlés. Cependant, l'excès d'air ne doit pas être trop élevé, car les températures deviennent trop basses dans le foyer et la contrainte précédente n'est plus respectée. Les excès d'air optimaux sur les foyers actuels de plusieurs MW correspondent à des teneurs volumiques en oxygène dans les fumées proches de 7 % sur base humide.
- **Un temps de séjour suffisant.** Un temps de séjour des gaz suffisamment long (de l'ordre de deux secondes) dans une zone où les températures sont supérieures à 850 °C, est recommandé.
- **De bonnes conditions de mélange.** Il convient d'éviter d'avoir des zones de l'écoulement à basses températures ou en défaut d'air, riches en imbrûlés. De bonnes conditions de mélange permettent d'homogénéiser les températures et les concentrations en oxygène et évitent ainsi la formation de zones froides ou en défaut d'O₂. Par ailleurs, ces bonnes conditions de mélange sont souvent associées à des taux de turbulence élevés dans l'écoulement, qui accélèrent les cinétiques d'oxydation. Concrètement, on cherchera à favoriser le mélange entre l'air secondaire et le flux gazeux issus de la zone primaire (couche de combustible).

2.3.2. Facteurs influençant les émissions de NOx

Le facteur ayant le plus d'influence sur les émissions de NOx des chaudières à biomasse est la teneur en azote contenue dans le combustible. Les conditions de fonctionnement suivantes permettent aussi de limiter les émissions de NOx :

- **Excès d'air global aussi faible que possible.** Comme déjà mentionné, l'azote du combustible est principalement libéré sous forme de précurseurs azotés de type NH_i , HCN, etc. Plus l'excès d'air est important, plus les réactions d'oxydation de ces précurseurs en NO sont favorisées. Inversement, pour les faibles excès d'air, les réactions de réduction de ces précurseurs en N_2 par des espèces hydrocarbonées (CH_i) ou par NO lui-même, sont privilégiées. **De façon générale, toute mesure défavorisant les réactions d'oxydation, permet de limiter les émissions de NOx.**
- **L'étagement de la combustion.** Compte-tenu du fait que les molécules azotées issues de la pyrolyse du combustible peuvent soit être réduites en N_2 , soit être oxydées en NO en fonction des teneurs locales en oxygène, une combustion idéale du point de vue des émissions de NOx doit prendre place dans un premier temps en atmosphère réductrice (faibles teneurs locales en O_2) pour permettre la conversion de l'azote en N_2 et non en NO, et dans un second temps en atmosphère oxydante, avec une montée lente de la teneur en O_2 dans les gaz de combustion (étagement des arrivées d'air secondaire) pour éliminer les substances imbrûlées sans pour autant trop favoriser les réactions d'oxydation des précurseurs azotés en NO. C'est ce qu'illustre de façon schématisée la courbe « A » de la figure ci-après (Figure 5). La courbe « B », ayant rapidement après l'introduction du combustible des teneurs en oxygène plus fortes, correspond à une situation plus défavorable vis-à-vis de la formation des NOx. On notera que la situation « idéale » « A » ne doit pas faire abstraction des autres contraintes, en particulier celle d'achever la combustion dans le délai fixé par le temps de séjour dans le foyer ; ce qui impose des niveaux de température, des excès d'air suffisants et un temps de séjour suffisant en aval de la dernière injection d'air. Un compromis est donc à trouver entre combustion complète et faibles émissions de NOx.
- **Températures inférieures à 1300 °C.** On cherche à limiter la température sous 1300 °C dans les foyers à biomasse pour ne pas former massivement de « NOx thermique » (mais aussi, pour éviter la formation de mâchefers et l'endommagement des matériaux).

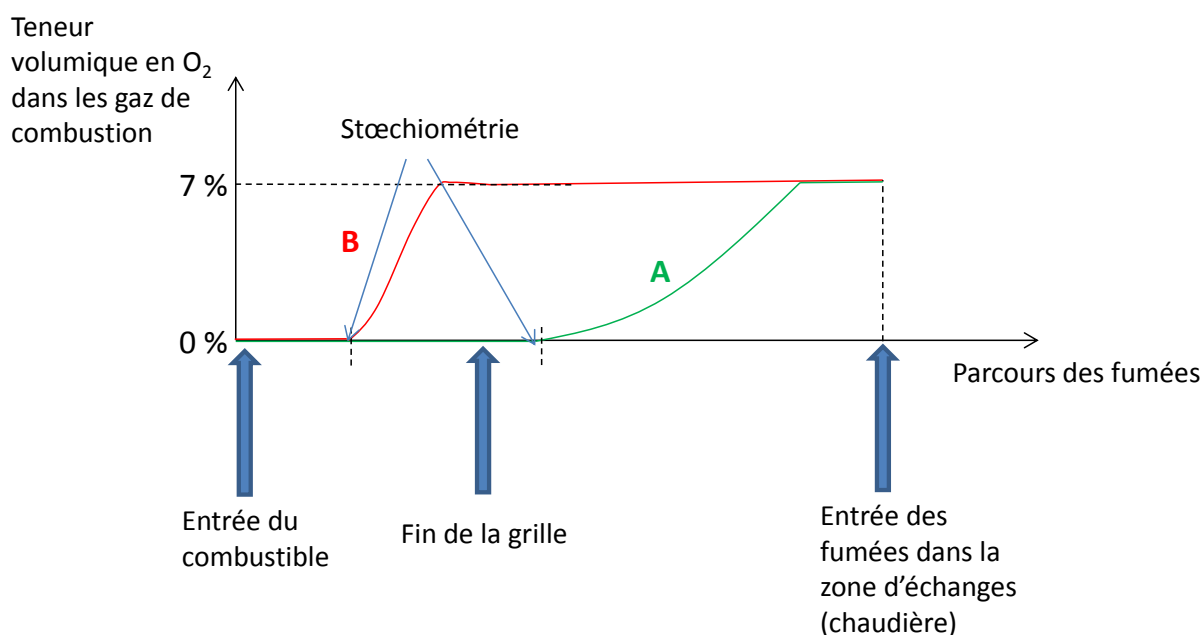


Figure 5 : Allures des teneurs volumiques en oxygène d'une combustion étagée (courbe verte) et peu étagée (courbe rouge), pour un taux d' O_2 dans les fumées en sortie, de 7 % sur humide.

2.3.3. Relation entre émissions d'oxydes d'azote et d'imbrûlés

Avec la plupart des équipements de combustion, on observe une relation entre la concentration en NOx dans les fumées et la concentration en imbrûlés (CO, suies, etc.) (Figure 6). Ces deux grandeurs évoluent en sens inverse. Ainsi, dans la figure qui suit, une réduction de l'excès d'air se traduira par une baisse de la teneur en NOx, mais dans le même temps, la teneur en CO sera accrue (passage du point « A » au point « B »). Cette modification de réglage ne constitue pas véritablement une amélioration sur le plan environnemental, puisqu'on se déplace uniquement sur la « courbe » ou domaine caractéristique de l'équipement de combustion. On ne pourra parler de système « bas-NOx », que si l'aménagement de l'équipement de combustion permet de passer du point « A » au point « C », avec une réduction simultanée des taux de NOx et CO dans les fumées.

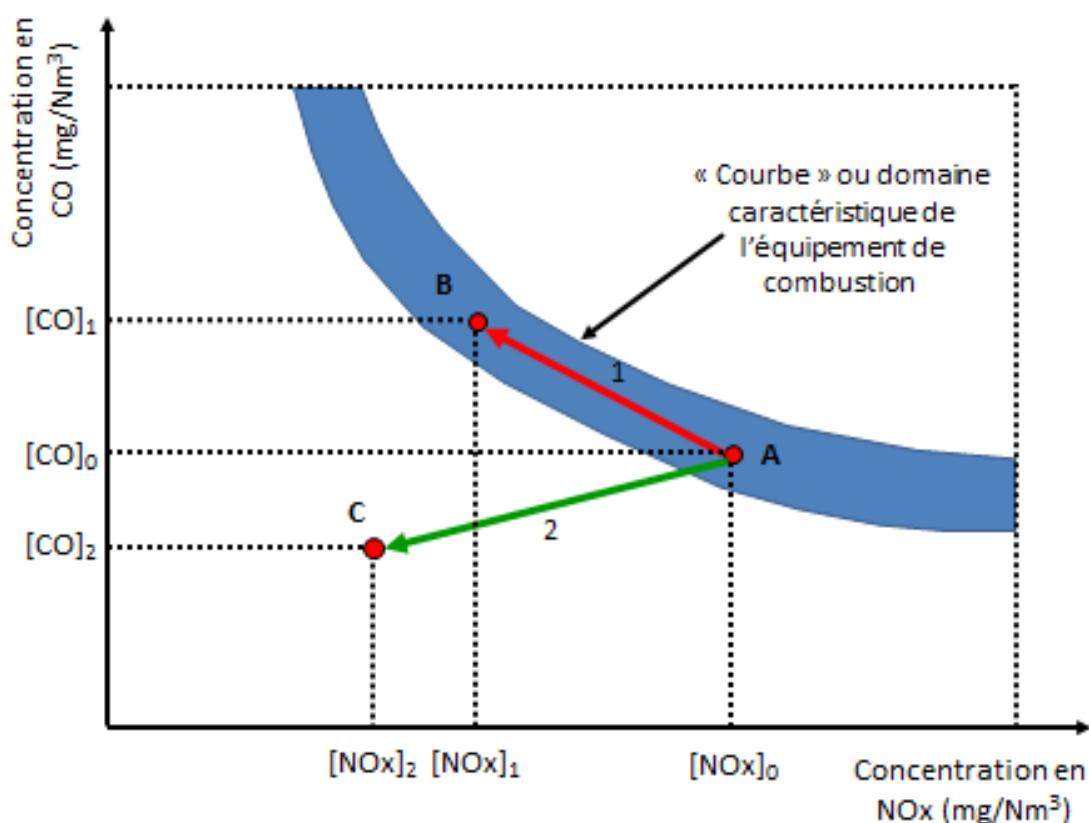


Figure 6 : Exemple de relation entre émissions de NOx et émissions d'imbrûlés

3. Techniques de réduction des émissions de NOx

3.1. Différents types de techniques

En matière de limitation des rejets de polluants, on distingue les mesures primaires et les mesures secondaires. Les mesures primaires ont pour objet de limiter la formation des polluants pendant l'étape de combustion, tandis que les mesures secondaires sont destinées à détruire les polluants déjà formés. En général, les mesures primaires sont celles qui ont le moindre coût. On doit donc les privilégier en premier lieu. Elles ne sont accompagnées de mesures secondaires que si elles se révèlent insuffisantes pour satisfaire aux exigences réglementaires. Les niveaux types d'émissions de NOx sont comparés sur la Figure 7, dans le cas de foyers à biomasse intégrant des mesures primaires (foyers bas-NOx) ou des mesures secondaires (SNCR, SCR). Les taux de réduction des émissions d'oxydes d'azote associés à chaque type de mesure sont indiqués dans le Tableau 2.

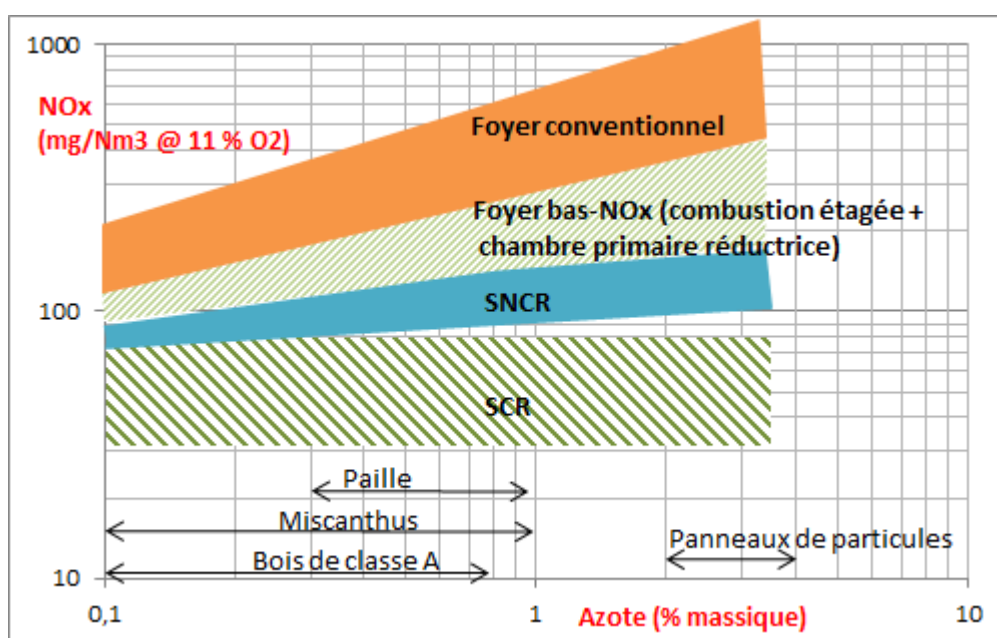


Figure 7 : Niveaux d'émission types de NOx atteints en fonction des stratégies DÉNOx retenues et des teneurs en azote des combustibles. Source : Th. Nussbaumer.

Type de mesure	Taux de réduction des émissions
Mesures primaires	Jusqu'à 50 %
SNCR	Jusqu'à 60 %
SCR	Jusqu'à 95 %

Tableau 2 : Taux de réduction maximum des émissions d'oxydes d'azote pour différents types de mesures.

3.2. Mesures primaires

3.2.1. Chaudières à biomasse en exploitation

Le retour d'expérience acquis au cours du projet ORENOX, montre que :

Pour un combustible donné, il n'est pas possible de réduire significativement les émissions de NOx d'une chaudière biomasse en exploitation en modifiant ses conditions de fonctionnement (ajout d'un recyclage des fumées, réduction du facteur d'air global, modification des répartitions des débits d'air primaire et secondaire...), sans, dans le même temps, augmenter les émissions d'imbrûlés.

Comme déjà mentionné, ceci s'explique par le fait que toute condition de fonctionnement améliorant les conditions d'oxydation dans le foyer permet de réduire les émissions d'imbrûlés, mais augmente celles de NOx. Toute condition de fonctionnement détériorant les conditions d'oxydation, entraîne l'effet inverse.

3.2.2. Chaudières à biomasse neuves

Pour réduire les émissions de NOx sans augmenter les émissions d'imbrûlés, il est nécessaire de prévoir deux zones spécifiques : une première zone où l'on va chercher à limiter la formation des NOx en travaillant en défaut d'air (afin de favoriser les réactions de réduction des précurseurs azotés en N₂), et une seconde zone où l'on va au contraire favoriser les réactions d'oxydation pour parfaire la combustion et réduire les émissions d'imbrûlés.

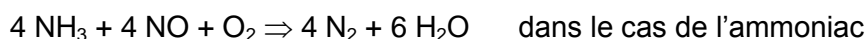
Ce type de mesure nécessite un dimensionnement dédié, afin de pouvoir séparer spatialement les deux zones de combustion spécifiques. En pratique, ceci conduit à augmenter le volume du foyer, le plus souvent par ajout d'une chambre supplémentaire.

Remarque : La gazéification de la biomasse, directement couplée à une combustion des gaz pauvres obtenus, est un cas extrême d'étagement, avec deux étapes successives réalisées dans des équipements distincts. La deuxième étape est cruciale, car tout l'azote contenu dans la biomasse n'est pas converti en azote moléculaire N₂ lors de la gazéification (le déficit en oxygène du milieu est trop important pour obtenir une conversion complète) et il subsiste des espèces azotées telles que l'ammoniac dans le gaz combustible. En conséquence, la combustion de ce gaz doit être menée en appliquant les mêmes précautions que celles mentionnées plus haut : faible excès d'air, absence de pressions partielles en oxygène élevées, etc., sachant que ces conditions opératoires sont beaucoup plus faciles à mettre en œuvre avec un combustible gazeux qu'avec un combustible solide.

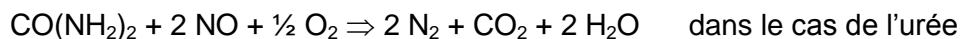
Au final, les mesures primaires DéNOx ne concernent que le marché des installations neuves, compte-tenu des aménagements spécifiques qu'elles nécessitent sur le foyer.

3.3. Mesures secondaires

La quasi-totalité des mesures secondaires de destruction des NOx présents dans les fumées sont basées sur leur mise en contact avec un agent réducteur, avec le concours ou non d'un support catalytique. Parmi tous les procédés développés, les deux les plus courants sont le procédé de réduction sélective non catalytique (dont l'acronyme usuel en anglais est « SNCR », sans équivalent français) et le procédé de réduction sélective catalytique (SCR pour l'acronyme). Ces deux procédés utilisent l'ammoniac (NH₃) ou l'urée (CO(NH₂)₂) comme agent réducteur, soit sous forme gazeuse ou liquide pour le premier, soit sous forme liquide ou solide pour le second. Ils mettent en œuvre la même réaction globale :



Ou



Le procédé par SNCR est mis en œuvre à températures élevées, typiquement comprises entre 900 et 1050 °C, à la sortie du foyer ou en fond de foyer (Figure 8), tandis que le procédé par SCR se satisfait de températures plus faibles, allant de 250 à 450 °C, et est installé en aval de la chaudière (Figure 9 et Tableau 3).

Un catalyseur est une substance qui facilite une réaction chimique donnée, c'est-à-dire qui permet d'abaisser la température à laquelle elle se déroule normalement. C'est un intermédiaire chimique qui n'est pas consommé par la réaction, à l'inverse d'un réactif (comme l'ammoniac dans le cas des procédés par SCR ou SNCR). Un catalyseur peut aussi avoir pour fonction de privilégier une réaction parmi plusieurs. Il sert alors à améliorer la « sélectivité » du processus chimique. C'est le cas également avec le procédé par SCR, puisqu'il favorise l'une ou l'autre des deux réactions mentionnées plus haut, parmi d'autres possibles.

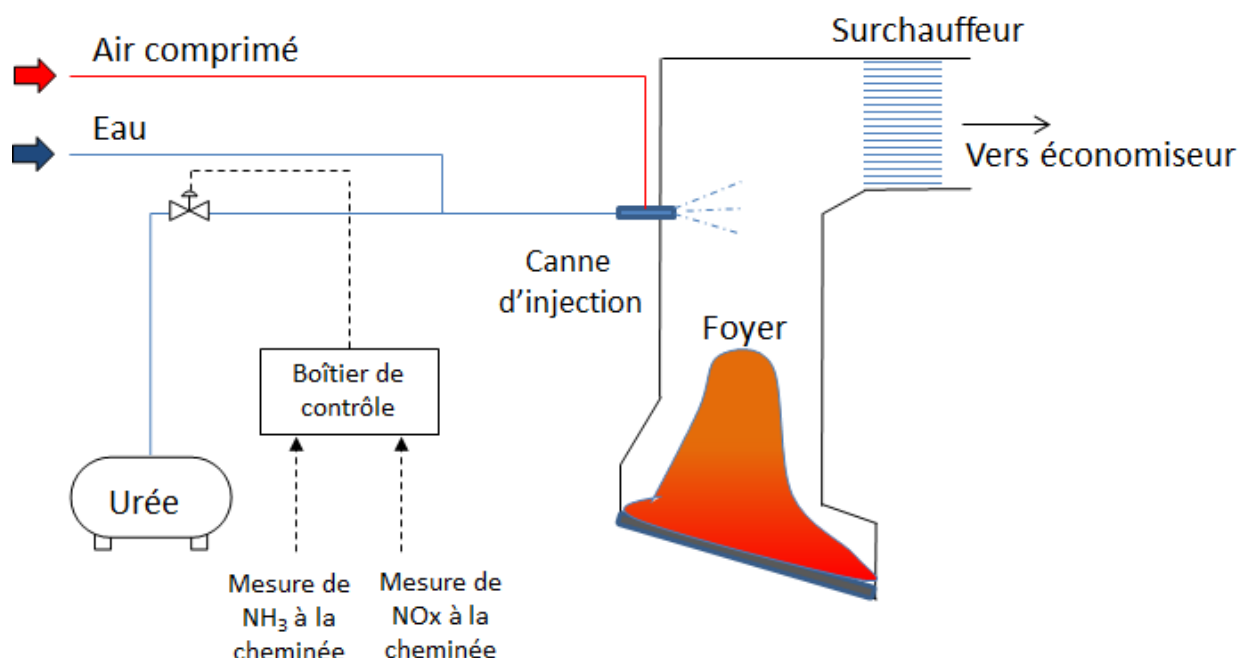


Figure 8 : Schéma d'une chaudière à grille équipée d'un traitement DéNOx par SNCR.
Source : ATANOR.

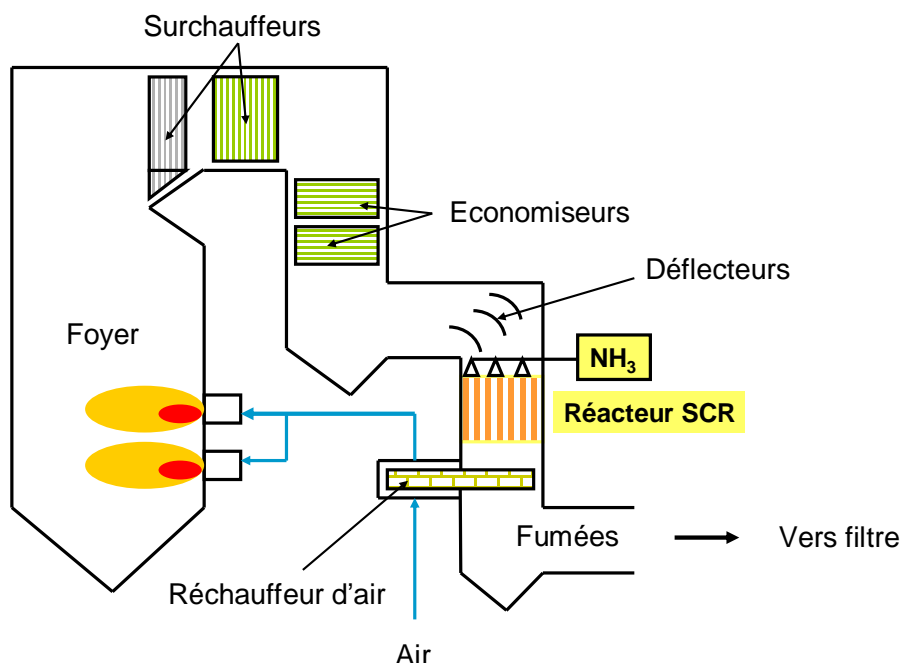


Figure 9 : Schéma d'une chaudière à combustibles solides équipée d'un traitement DéNOx par SCR. Source : ATANOR.

	SCR	SNCR
Catalyseur	Oui (oxydes métalliques ou zéolithes)	Non
Température	250 – 450 °C ⁽¹⁾	950 – 1 050 °C
Réactifs	NH ₃ (ou NH ₃ préparé à partir d'urée)	NH ₃ , CO(NH ₂) ₂
Rendement DéNOx	> 95 %	Jusqu'à 60 % ⁽²⁾

Tableau 3 : Comparatif des procédés par SNCR et par SCR

(1) : Possibilité d'aller jusqu'à 500 – 550 °C avec les zéolithes

(2) : Possibilité d'aller au-delà de 60 % avec des conditions particulières

Les deux procédés se distinguent également par leur niveau de performance (jusqu'à 95 % de taux d'abattement des NOx, voire plus, avec le procédé par SCR, mais rarement plus de 60 % avec le procédé par SNCR) et par leur consommation de réactif. Si le réactif est utilisé de façon optimale avec le procédé par SCR, chaque mole de NH₃ permettant de détruire une mole de NO, ce n'est pas le cas avec le procédé par SNCR, car une partie non négligeable de l'agent est détruite thermiquement et convertie en N₂, avant d'avoir réagi avec NO. Cela entraîne des surconsommations importantes, puisqu'il faut généralement 2 à 3 fois plus de réactif que ce qu'exigerait la stricte stœchiométrie.

Malgré cet inconvénient qui conduit à des frais opératoires plus élevés, la solution de la SNCR reste toutefois largement employée, surtout dans les installations de tailles moyennes (4 à 50 MW), car les investissements qu'elle impose sont nettement plus faibles que ceux d'une installation de type SCR (cf. comparatif technico-économique du § 4.)

Les règles à respecter pour l'obtention du meilleur taux d'abattement des NOx et la moindre consommation de réactif, aussi bien pour le procédé par SCR que pour celui par SNCR, sont les suivantes :

- **Réaliser la réaction de dénitrification dans la plage de température prévue.** Pour le procédé par SNCR, cette plage est comprise entre 900 et 1050 °C (cf. Figure 10). Au-delà de 1050 °C, l'oxydation de l'ammoniac ou de l'urée en NO prend le pas sur la réduction en N₂, et peut aller jusqu'à accroître la teneur en NOx des fumées si on s'écarte fortement de cette valeur limite supérieure. Par exemple, cela peut être le cas si le réactif est injecté dans le foyer, dans des conditions telles qu'une partie va vers des zones à hautes températures, sous l'effet de recirculations internes. En dessous de 900 °C, les réactions de réduction des NOx deviennent plus lentes, de même que celles d'oxydation du réactif en N₂. Des fuites d'ammoniac peuvent alors être relevées en cheminée. Dans le cas du procédé par SCR, la plage de température à respecter est celle définie par le fabricant de catalyseur. Elle se situe généralement entre 250 et 450 °C, mais il existe aussi des produits qui peuvent descendre jusqu'à 200 °C ou aller jusqu'à 500 °C, voire au-delà. Lors des variations de charge de la chaudière, les températures à l'endroit du système DéNOx peuvent être sensiblement modifiées et sortir de l'intervalle de température. Pour éviter cette situation, les solutions adoptées sont généralement de mettre en place des by-pass au niveau des échangeurs de chaleur pour contrôler les puissances extraites (cas du procédé par SCR) ou déplacer la zone réactionnelle, en faisant appel à plusieurs étages d'injection placés à des niveaux thermiques différents (cas du procédé par SNCR).
- **Le réactif doit être uniformément réparti sur les fumées à traiter,** avant d'entrer en réaction avec NO. Si ce n'est pas le cas, celui-ci sera détruit dans les zones de surconcentration, tandis que dans les zones de sous-concentration, les oxydes d'azote seront insuffisamment abattus. En pratique, cela signifie que les écoulements gazeux à l'intérieur de l'installation (dans et à la sortie du foyer pour le procédé par SNCR et en amont du catalyseur pour le procédé par SCR) doivent être connus et que le dispositif d'injection (nombre de buses, forme des jets produits par les buses, distribution granulométrique des gouttelettes dans le cas des réactifs liquides, vitesse d'éjection du réactif, emplacement et orientation des buses par rapport à l'écoulement) soit dimensionné en fonction de ces écoulements. La caractérisation des écoulements (détermination des champs de vitesse) s'effectue le plus souvent en utilisant des outils de calcul dits « CFD » (Computational Fluid Dynamics) et en ajustant les résultats, si nécessaire, par des mesures de températures de gaz locales. Il importe également, quand le réactif est sous forme liquide ou solide, qu'il n'entre pas en contact avec les parois, pour éviter les fuites d'ammoniac et/ou l'érosion desdites parois.
- **Maîtriser le rapport molaire « NH_{injecté}/NO_{fumées} ».** Le rapport molaire « NH_{injecté}/NO_{fumées} » est une grandeur largement utilisée pour caractériser la performance d'un procédé d'abattement des NOx à l'ammoniac ou à l'urée. Dans le cas idéal, on a un taux d'abattement des NOx de 100 % avec un rapport de 1 (ou de 50 % avec un rapport de 0,5 par exemple). Pour une SCR parfaitement réglée, des taux d'abattement des NOx de 95 à 98 % peuvent être atteints avec un rapport « NH_{injecté}/NO_{fumées} » de 1. Avec le procédé par SNCR, le réactif n'étant pas utilisé de manière optimale, les rapports « NH_{injecté}/NO_{fumées} » sont souvent compris entre 1 et 2, pour avoir des taux d'abattement allant sur des foyers standards de 30 à 60 %, voire jusqu'à 90 % sur des foyers pilotes, spécifiquement adaptés à la SNCR (ce qui est le cas pour les courbes représentées sur la Figure 10). Lorsque le rapport « NH_{injecté}/NO_{fumées} » est supérieur à 2,5, il y a un risque non négligeable d'apparition d'une fuite d'ammoniac.

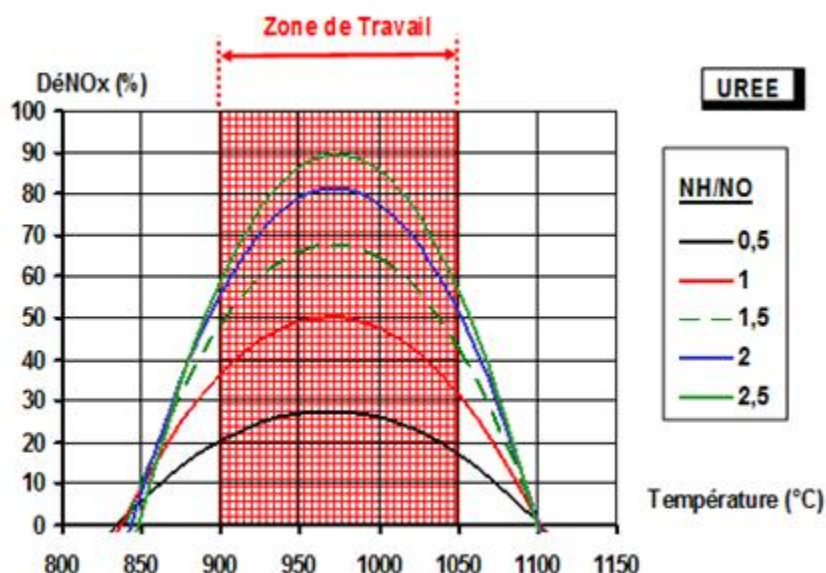


Figure 10 : Influence de la température et du rapport molaire NH/NO sur le rendement DéNOx du procédé par SNCR. Courbes réalisées sur la base de tests réalisés sur un foyer spécifiquement adapté à la SNCR. Source : BABCOCK Entreprise/IFP.

On retiendra que la maîtrise des rapports molaires locaux « $NH_{\text{injecté}}/NO_{\text{fumées}}$ » est essentielle pour garantir une performance DéNOx élevée avec les procédés par SNCR et SCR, et prime sur le contrôle des autres paramètres opératoires. Des rapports « $NH_{\text{injecté}}/NO_{\text{fumées}}$ » trop élevés, outre le surplus de consommation de réactif, peuvent entraîner en effet des fuites d'ammoniac.

La présence d'ammoniac dans les fumées, après traitement DéNOx par SCR ou SNCR, peut conduire à des encrassements importants des parties situées en aval dudit traitement, par combinaison de l'ammoniac avec des anions acides, pour former des sels d'ammonium tels que $(NH_4)_2SO_4$, NH_4HSO_4 , NH_4Cl , etc. La teneur en ammoniac dans les fumées doit être contrôlée en continu et ne jamais dépasser $5 \text{ mg}/\text{Nm}^3$.

4. Comparaison technico-économique des différentes stratégies DéNOx

4.1. Respect d'une VLE dite « bas-NOx »

Pour cette comparaison technico-économique, on considère que les chaudières standards actuelles peuvent garantir un niveau d'émission de NOx de 250 mg/Nm³ à 11 % d'O₂ avec un combustible dont le taux massique d'azote est inférieur à 0,5 % et le taux d'humidité compris entre 30 et 50 %.

On suppose par ailleurs que dans le cadre de la construction d'une chaufferie à biomasse **neuve**, la Valeur Limite d'Emission (VLE) spécifiée est la suivante :

- 150 mg de NOx par Nm³ de fumées à 11 % d'O₂ sur sec (VLE dite « bas-NOx »).

Le taux de réduction des émissions de NOx devant être atteint pour respecter cette VLE, par rapport à une chaudière standard, est donc de 40 %. Les différentes configurations d'installation permettant d'atteindre ces 40 % de réduction sont :

- **Chaudière avec foyer bas-NOx** : chaudière ayant un foyer spécialement adapté pour mettre en œuvre des mesures primaires (une chambre supplémentaire notamment par rapport au foyer standard).
- **Chaudière avec foyer standard + SNCR.**
- **Chaudière avec foyer standard + SCR.**

Le Tableau 4 compare les investissements relatifs requis par chaque configuration pour deux tailles de chaudière : 10 et 20 MW. Les frais de fonctionnement et financiers cumulés sur 10 ans sont aussi indiqués dans le cas de l'installation de 10 MW. Les calculs ont été réalisés sur la base des prix de vente moyens pratiqués par COMPTE-R (hors génie civil), et dans le cas de la SNCR et de la SCR, sur la base d'indications fournies par ATANOR Industries. Les investissements et les frais de fonctionnement ou financiers sont normalisés par le montant de l'investissement requis pour l'installation d'une chaudière standard. Ces calculs montrent que :

- La configuration bas-NOx la plus compétitive économiquement pour les puissances inférieures à 20 MW est celle intégrant un foyer bas-NOx (mesures primaires uniquement).
- La solution bas-NOx basée sur l'ajout d'une SNCR à un foyer standard devient économiquement avantageuse pour les fortes puissances (P > 20 MW).
- La configuration bas-NOx basée sur l'utilisation d'une SCR n'est pas économiquement compétitive.

Les différents risques opératoires associés à chaque stratégie DéNOx sont indiqués dans le Tableau 5. Sans surprise, ce sont les mesures primaires (foyer bas-NOx) qui présentent le moins de risques. Concernant la SNCR et la SCR, il convient de mentionner que ces deux technologies sont matures et comptent de nombreuses références, y compris dans le domaine de la biomasse. Les risques mentionnés induisent des incidents lorsque ces technologies ne sont pas installées en respectant les règles de l'art ou lorsque le suivi ou la conduite dérogent aux règles opératoires définies.

Notons enfin que les risques associés à la SNCR sont d'autant mieux maîtrisés que l'installation est de grande taille. En effet, plus la taille du foyer est importante, plus l'espace dans lequel on injecte le réactif est suffisamment vaste pour ne pas avoir d'effets de parois, susceptibles d'entraîner des fuites d'ammoniac. On recommande en pratique de n'envisager l'installation d'une SNCR que sur des installations de puissance supérieure à 10 MW. Pour la SCR, le risque d'empoisonnement/colmatage du catalyseur est identique sur toutes les tailles d'installation.

	Niveau d'émissions de NOx visé	Investissement relatif/chaudière standard. Cas 10 MW.	Investissement relatif/chaudière standard. Cas 20 MW.	Frais financiers et de fonctionnement sur 10 ans (normalisés par rapport à l'investissement pour une chaudière standard). Cas 10 MW.
Chaudière avec foyer bas-NOx	150 mg/Nm ³ à 11 % d'O ₂ .	1,15	1,16	0,08
Chaudière avec foyer standard + SNCR		1,19	1,16	0,15
Chaudière avec foyer standard + SCR		1,44	1,45	0,29

Tableau 4 : Investissements relatifs requis par les différentes configurations de chaudières de 10 et 20 MW respectant les VLE dites « bas-NOx ».

	Risques
Chaudière avec foyer bas-NOx	- Pas de risques particuliers identifiés.
Chaudière avec foyer standard + SNCR	- Risque d'émissions d'ammoniac à la cheminée, si installation SNCR mal réalisée. - Risque de corrosion chaudière, si émissions d'ammoniac. - Difficulté à gérer la variabilité des conditions de combustion inhérente à certaines installations biomasse (variabilité combustible, variabilité du taux de charge).
Chaudière avec foyer standard + SCR	- Risque d'empoisonnement/colmatage du réacteur catalytique (implications financières si changement fréquent du catalyseur). - Risque (limité) d'émissions d'ammoniac à la cheminée, si installation SCR mal réalisée. - Risque (limité) de corrosion économiseur, si émissions d'ammoniac.

Tableau 5 : Risques opératoires associés à chaque stratégie DéNOx.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, ci-dessous, indique les technologies les mieux adaptées pour limiter les émissions de NOx.

	Niveaux d'émissions de NOx visés : 150 mg/Nm ³ à 11 % d'O ₂		
	P < 10 MW	10 MW < P < 20 MW	P > 20 MW
Solution recommandée pour chaudières neuves	Foyer dimensionné bas-NOx (mise en œuvre de mesures primaires)	Foyer dimensionné bas-NOx (mise en œuvre de mesures primaires)	Foyer standard + SNCR
Solution recommandée pour chaudières existantes	Pas de solution viable	SNCR	SNCR

Tableau 6 : Solutions les mieux adaptées pour réduire les émissions de NOx des chaudières à biomasse jusqu'à 150 mg/Nm³ à 11 % d'O₂.

- Jusqu'à 20 MW, dans le cas d'une installation neuve, la configuration la plus avantageuse sur le plan économique est celle intégrant un foyer dimensionné bas-NOx.
- Dans le cas d'une installation neuve, la configuration associant une unité SNCR à un foyer standard est la plus avantageuse sur un plan économique pour les puissances élevées ($P > 20$ MW).
- Pour des installations existantes, la SNCR est la technologie recommandée, mais pour des puissances supérieures à 10 MW.
- La SCR n'est pas aujourd'hui une solution économiquement compétitive pour abattre les NOx. Elle ne pourrait se justifier que si la réglementation évoluait vers des valeurs nettement plus basses (< 80 mg/Nm³) que celles imposées actuellement.

4.2. Respect d'une VLE dite « ultra-bas-NOx »

On suppose que dans le cadre de la construction d'une chaufferie à biomasse **neuve**, la Valeur Limite d'Emission (VLE) spécifiée est la suivante :

- 80 mg de NOx par Nm³ à 11 % d'O₂ sur fumées sèches¹.

Le taux de réduction des émissions de NOx devant être atteint par rapport à une chaudière standard est de 68 %. L'utilisation de mesures primaires seules via la mise en œuvre d'un foyer bas-NOx ne suffit pas à respecter cette VLE. Les configurations permettant de respecter cette VLE sont les suivantes :

- Chaudière avec **foyer bas-NOx + SNCR**.
- Chaudière avec **foyer standard + SCR**.

On peut là encore montrer que la solution intégrant la SCR n'est pas compétitive sur un plan économique. La configuration mêlant mesures primaires (foyer bas-NOx) et SNCR est la mieux adaptée.

¹ Cette valeur limite est définie à titre d'illustration et est inférieure à la VLE la plus stricte définie par la réglementation en vigueur au 01/01/2013 : 150 mg/Nm³ à 6 % d'O₂, soit 100 mg/Nm³ à 11 % d'O₂ dans le cas d'installations neuves de plus de 300 MW (voir ANNEXE C).

ANNEXES

A. Documentation complémentaire

Documentation sur l'exploitation des chaufferies à biomasse :

- « Guide d'exploitation des chaufferies ». G. Martin. Publication ATEE - 2010.
- « Boiler Operator's Handbook ». K. Heselton. Marcel Dekker Editor - 2005.
- « Mise en place d'une chaufferie au bois ». J.C. Pouet. ADEME/EDP Sciences - 2007.
- « Référentiel combustible bois énergie : les plaquettes forestières – Définitions et exigences » - Etude réalisée par le FCBA pour compte de l'ADEME - 2008.

Article de revue sur les différentes problématiques afférentes aux chaudières à biomasse à grilles (émissions de polluants, corrosion...) :

- « Grate-firing of biomass for heat and power production ». Chunggen Yin et al. Progress in Energy and Combustion Science. Vol 34, pp 725-754 - 2008.

Documentation sur les émissions d'imbrûlés (CO) des chaudières à biomasse :

- « Caractérisation et optimisation de la combustion de bois fragmenté en chaufferies automatiques ». Claude Bernard. Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré-Nancy 1 - 2005.

Documentation sur les mécanismes de formation des NOx :

- « Mécanismes de formation et de destruction des oxydes d'azote dans la combustion ». De Soete.G. Revue Générale de Thermique. N° 330-331, pp. 353-373 - 1989.
- « Caractérisation expérimentale et modélisation de l'émission de polluants lors de l'incinération des déchets ménagers ». Thomas Rogaume. Thèse de doctorat de l'ENSMA, Poitiers – 2001

B. Les biocombustibles solides

Méthodes de mesure	Références CEN
Taux Humidité	14774-1
	14774-2
	14774-3
Pouvoir calorifique	14918
Granulométrie	15149:1
	15149:2
	15149:3
Teneur en cendres	14775
Température fusion cendres	15730-1
Teneur en azote	15104
Teneur en chlore et soufre	15289
Echantillonnage	14778-1
	14778-2

Tableau 7 : Normes relatives à la caractérisation des biocombustibles solides.




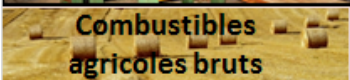
Catégorie	Dénomination	Taux d'humidité type	Usage type
	Bûches	< 25 %	Chauffage domestique
	Plaquettes forestières sèches	< 30 %	Chaufferie automatique de moyenne puissance (P < 800 kW)
	Plaquettes forestières humides	30 à 50 %	Chaufferie automatique de forte puissance (P > 800 kW)
	Bois de classe A (non traité). Ex : broyat de palettes.	20 à 30 %	Chaufferie automatique de forte puissance
	Ecorces	30 à 50 %	Chaufferie automatique de forte puissance
	Copeaux	< 10%	Chaufferie automatique, toutes puissances
	Plaquettes industrielles	10 à 50 %	Chaufferie automatique, toutes puissances
	Granulés, briquettes	< 10 %	Chauffage domestique
	Paille, miscanthus, noyaux...	15 à 20 %	Chaufferie automatique

Tableau 8 : Différents types de combustibles biomasses utilisables en chaufferies ou pour le chauffage domestique.

C. Réglementation sur les émissions applicable aux chaudières à biomasse au 01/01/2013.

Types d'installations	2 < P < 20 MWth (déclaration). Installations déclarées après le 10/08/98	P > 20 MWth (autorisation). Installations autorisées après le 01/11/10	P > 20 MWth (autorisation). Installations autorisées existantes
Textes réglementaires	Arrêté du 25 juillet 1997	Arrêté du 23 juillet 2010	30 juillet 2003 modifié par l'arrêté du 31 octobre 2007
Teneur O ₂ de référence	11%	6%	6%
Poussières (mg/Nm ³)	150 pour P < 4 MWth 100 pour P > 4 MWth 50 pour P > 10 MWth si aggro > 250 000 hab	30 pour 20 < P < 50 MWth 20 pour P > 50 MWth	100 pour 20 < P < 500 MWth 50 pour P > 500 MWth 50 pour tout P si aggro > 250 000 hab (2)
NOx (mg/Nm ³)	500	400 pour 20 < P < 50 MWth 250 pour 50 < P < 100 MWth 200 pour 100 < P < 300 MWth 150 pour P > 300 MWth	600 pour 20 < P < 500 MWth 500 pour P > 500 MWth 200 pour P > 500 MWth au 1er janvier 2016 (3)
CO (mg/Nm ³)	250	200 pour 20 < P < 100 MWth 150 pour P > 100 MWth	300
SO ₂ (mg/Nm ³)	200	200 pour 20 < P < 300 MWth 150 pour P > 300 MWth	2000 pour 20 < P < 100 MWth 2400-4xP pour 100 < P < 500 MWth 400 pour P > 500 MWth (4)
HAP (mg/Nm ³)	-	0,01	0,1
COV (mg/Nm ³)	50 en eq CH ₄	50 en C total	110 en C total
Ammoniac	-	5 (1)	20

Tableau 9 : Valeurs limites d'émission de polluants atmosphériques pour les chaudières à biomasse.

- (1) Lorsqu'une chaudière est équipée d'un dispositif de traitement des oxydes d'azote à l'ammoniac ou à l'urée ; cette valeur peut être adaptée par le préfet sur la base d'éléments technico-économiques fournis par l'exploitant, sans toutefois dépasser 20 mg/Nm³.
- (2) La valeur limite en poussières est de 100 mg/Nm³ pour les installations existantes anciennes d'une puissance thermique maximale supérieure ou égale à 500 MWth qui brûlent un combustible solide dont le contenu calorifique est inférieur à 5 800 kJ/kg (valeur calorifique nette), la teneur en eau supérieure à 45 % en poids, la teneur combinée en eau et en cendres supérieure à 60 % en poids et la teneur en oxyde de calcium supérieure à 10 %.
- (3) La valeur limite en NOx est de 1 200 mg/Nm³ jusqu'au 1^{er} janvier 2018 pour les installations qui fonctionnaient dans les douze mois ayant précédé le 1^{er} janvier 2001 et continuent de fonctionner avec des combustibles solides contenant moins de 10 % de composés volatils.

Les installations existantes anciennes d'une puissance thermique maximale supérieure à 500 MWth utilisant un combustible solide, pour lesquelles l'exploitant s'est engagé, par un courrier adressé au préfet, à ce que l'utilisation annuelle (moyenne mobile calculée sur une période de cinq ans) ne dépasse pas 2 000 heures, sont soumises pour les émissions d'oxydes d'azote à une valeur limite de 600 mg/Nm³ jusqu'au 1^{er} janvier 2016.

Les installations existantes utilisant un combustible solide, pour lesquelles l'exploitant s'est engagé, par un courrier adressé au préfet, à ce que l'utilisation annuelle (moyenne mobile calculée sur une période de cinq ans) ne dépasse pas 1 500 heures, sont soumises pour les émissions d'oxydes d'azote à une valeur limite de 450 mg/Nm³ à compter du 1^{er} janvier 2016.

- (4) Les installations d'une puissance thermique maximale égale ou supérieure à 400 MWth, utilisant un combustible solide, pour lesquelles l'exploitant s'est engagé, par un courrier adressé au préfet, à ce que l'utilisation annuelle (moyenne mobile calculée sur une période de cinq ans) ne dépasse pas 2 000 heures jusqu'au 31 décembre 2015 ou 1500 heures à compter du 1^{er} janvier 2016, sont soumises à une valeur limite de 800 mg/Nm³ pour les émissions de dioxyde de soufre.

On notera qu'au premier janvier 2013, les arrêtés relatifs aux installations soumises à déclaration et à autorisation sont en cours de révision. Ces révisions auront pour effet d'abaisser les VLE applicables.