Agrovalor

Rapport d'aide à la décision pour la définition de l'étude sur la réduction des fumées au sein des industries d'anacarde

Application au projet Agrovalor RCI

Mars – août 2020

nitidæ filières & territoires

Un projet financé par AFD Agence Française de Développement, FIRCA Fonds Interprofessionnel pour la Recherche et le Conseil Agricoles, RecycLivre Partageons le Savoir, ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Cadre de l'étude : Stage de fin d'étude d'ingénieur en génie énergétique et environnement réalisé avec Nitidæ sur le projet AGROVALOR RCI.

Sujet du stage : Réfléchir à une étude sur les impacts environnementaux et plus spécifiquement l'effet de réduction de la fumée induit par le pyrolyseur dans les usines d'anacarde. Se concentrer sur une étude spécifique sur la réduction et la composition de la fumée après combustion des gaz de pyrolyse.

—

Auteur : Grégory GUILLEMET, Étudiant ingénieur en Génie Énergétique et Environnement (GEn), INSA Lyon

Tutrice Industrielle : Julia ARTIGAS SANCHO, Chargée de projets énergie, Nitidæ

Tutrice INSA Lyon : Pascale NAQUIN, Directrice du CEFREPADE, INSA Lyon

Résumé

Ce rapport a pour vocation de regrouper les recherches autour du projet d'étude de fumées lancé par Nitidæ, afin de lui permettre de le mettre en œuvre. Il synthétise des recherches bibliographiques réalisées sur deux mois, ainsi que des échanges avec des potentiels prestataires pour le projet pendant un mois.

Dans les deux premières parties, sont détaillés le contexte et la méthodologie générale de l'étude. Ensuite, la troisième partie explicite le raisonnement qui a permis la sélection des polluants pertinents à étudier, ainsi que de la méthodologie de prélèvement la plus appropriée. La quatrième partie est une synthèse de veille bibliographique sur les réglementations autour des émissions à l'atmosphère. Elle se concentre notamment sur les VLE, les méthodes de prélèvement et de mesures, ainsi que les normes associées à ces dernières. La cinquième partie présente les étapes d'une campagne d'analyse d'émissions de sources fixes, ainsi qu'une investigation des méthodes mises en œuvre pour la mesure, le prélèvement et l'analyse. Une sixième partie vient apporter l'expertise des professionnels du domaine dans les mêmes thématiques que celles de la partie quatre. Enfin, la septième partie conclut sur le travail mené et sur l'orientation souhaitée du projet.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un stage de fin d'étude d'ingénieur en énergétique et environnement, d'une durée de cinq mois allant du 30 mars au 08 septembre 2020. Il a été rédigé par Grégory GUILLEMET, étudiant à l'INSA Lyon, en partenariat avec Julia ARTIGAS SANCHO, chargée de projets énergie chez Nitidæ.

Liste des acronymes

INSTITUTIONS

AQMCNI : Air Quality Management for Cashew Nut Industries (Cluster)

CIAPOL : Centre Ivoirien AntiPOLution

GSAAIC : Guide de surveillance dans l'air autour des installations classées

INAAQS : Indian National Ambient Air Quality Standards

MTES : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire

NAAQS : National Ambient Air Quality Standards

NEMA: National Environment Management Authority

PE(JOUE) : Parlement Européen, Journal Officiel de l'Union Européenne

ÉMISSIONS

AAQTL : Ambient Air Quality Tolerance Limits

AQS : Air Quality Standards

IL : Immission[1] limits

NCPE : Niveau critique pour la protection des écosystèmes

NCPV : Niveau critique pour la protection de la végétation

OQ : Objectif de qualité

SA : Seuils d'alerte

SIR : Seuil d'information et de recommandation

VCPSH : Valeurs cible pour la protection de la santé humaine

VLE : Valeur Limite à l'Émission

VLPSH : Valeurs limites pour la protection de la santé humain

POLLUANTS

B[a]P : Benzo[a]Pyrène

COSV : Composé Organique Semi-Volatil

COV : Composé Organique Volatil

COVNM : Composé Organique Volatil Non Méthanique

ETM : Éléments Traces Métalliques

HAP : Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

PM : Matière Particulaire (Particule Matter)

POPs : Polluants Organiques Persistants

AUTRES

AA : Ambiant Air ou Air Ambiant

CNC : Coques de Noix de Cajou

ESF (ou SSE) : Émissions des Sources Fixes (ou Stationary Sources of Emissions)

MEBA : Microscopie Électronique à Balayage Analytique

META : Microscopie Électronique à Transmission Analytique

MJ : Moyenne journalière, définie par le CIAPOL. Désigne une moyenne réalisée sur une journée de production. Différent de la moyenne sur 24h (M24h). (cf. lien)

MOCP : Microscopie Optique à Contraste de Phase

SMA (ou AMS) : Système de Mesurage Automatique (ou Atomated Measuring System)

WA : Working place Air

1 Les immissions désignent la concentration de polluants dans l'air ambiant mesurée par des stations (normalement au sol). (source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Immission)

Table des matières

Application au projet Agrovalor RCI 1
Résumé 3
1 Introduction 7
2 Définition des scenarii étudiés 7
2.1 Scénario de base (SBa) 7
2.2 Scénario amélioré (SAm) 8
2.3 Le site de SOBERY 9
3 Liste des polluants émis par la combustion de coque et de gaz de pyrolyse 10
3.1 Les polluants visés par l'étude 14
3.2 Les voies d'exposition et méthodes de captage 14
3.3 Conclusion sur la méthode de captage adoptée 16
4 État de l'art des réglementations pour les polluants sélectionnés (VLE, méthodes et normes) 16
4.1 Poussières totales, SPM, RPM et particules (PM_{10}, $PM_{2,5}$) 16
4.1.1 VLE et AAQTL 18
4.1.2 Méthodes et normes de prélèvement et d'analyse 22
4.2 Composés organiques : COV, COSV, COVNM 24
4.2.1 VLE et AAQTL 24
4.2.2 Méthodes et normes de prélèvement et d'analyse 25
4.3 Dioxines et Furanes : PCDD et PCDF 27
4.3.1 VLE et AAQTL 27
4.3.2 Méthodes et normes de prélèvement et d'analyse 28
4.4 Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) 29
4.4.1 VLE et AAQTL 30
4.4.2 Méthodes et normes de prélèvements et d'analyses 30
5 État de l'art des outils pour une campagne d'étude de fumées 31
5.1 Mesures 32
5.2 Prélèvements 34
5.2.1 Outils de prélèvement/échantillonnage 36
5.2.2 Outils de mesure 37
5.3 Analyses 38
6 Expertise des professionnels du domaine 40
7 Retours sur les propositions des laboratoires 41
Conclusions sur l'orientation du projet 42
Références 43
Annexes 44
Annexe 1 : Taux de O_2 de référence 44
Annexe 2 : Expression des résultats (Fiche A-I-1 ISSeP, § 10) 46
Annexe 3 : Liste des laboratoires contactés 48

Index des illustrations

Illustration 1: **Système classique**: chaudière à foyer ouvert, alimentation en bois ou CNC brutes 8
Illustration 2: Différence de couleur des fumées de combustion 8
Illustration 3: **Système amélioré**: Four à pyrolyse sous une chaudière verticale 9
Illustration 4 : Chaudière classique avant installation de l'H2CP, 2017 (SBa) 10
Illustration 5: Chaudière verticale et son H2CP, SOBERY 2019 (SAm) 10
Illustration 6: Chaudière verticale et son H2CP, SOBERY 2019 (SAm) 10
Illustration 7 : Chaudière classique avant installation de l'H2CP, 2017 (SBa) 10
Illustration 8: Caractérisation des Polluants Organiques Persistants (POP) pour l'étude (1/2) 13
Illustration 9: **Caractérisation** des Polluants Organiques Persistants (**POP**) pour l'étude (2/2) 13
Illustration 10: Voies d'exposition aux polluants (Réalisé à partir de la figure 13 p.39) 15
Illustration 11: Types de mesures associées aux voies d'exposition de chaque polluant 15
Illustration 12: Synthèse des données de contrôle pour les **Poussières totales** 19
Illustration 13: Synthèse des données de contrôle pour les **SPM** 20
Illustration 14: Synthèse des données de contrôle pour les **RPM_{10}** 20
Illustration 15: Synthèse des données de contrôle pour les **PM_{10}** 21
Illustration 16: Synthèse des données de contrôle pour les **$RPM_{2,5}$** 21
Illustration 17: Synthèse des données de contrôle pour les **$PM_{2,5}$** 22
Illustration 18: Synthèse des données de contrôle pour tous les **COV** 25
Illustration 19: Synthèse des données de contrôle pour les **PCDD** et **PCDF** 28
Illustration 20: Exemple de chaîne de mesure manuelle active extractive (source: Air Pollution and Greenhouse Gases) 33
Illustration 21: Exemple de brides de différents types fixées sur canalisations circulaires par l'ISSeP (A-I-2) 34
Illustration 22: Nombre de points de prélèvement minimum dans une canalisation circulaire par l'ISSeP (A-I-2) 35
Illustration 23: Emplacement de brides dans une canalisation circulaires par l'ISSep (A-I-2) 35
Illustration 24: Positionnement d'une zone de prélèvement dans un conduit par l'ISSeP (A-I-2) 36
Illustration 25: Les analyseurs des gaz majeurs par ISSeP (A-I-3) 38
Illustration 26: Techniques d'analyse pour les poussières par ISSeP (A-I-4) 38
Illustration 27: Système d'analyseur portatif utilisé pour l'analyse des gaz majeurs 39
Illustration 28: Références oxygène par l'ISSeP (A-I-1) 44
Illustration 29: Correction pour les taux de O_2 par l'ISSeP (A-I-1) 44
Illustration 30: Formule d'ajustement de la concentration vis-à-vis du taux de O_2 45

Index des tableaux

Tableau 1: Liste des polluants identifiés dans les fumées de combustion de CNC brutes, les fumées de combustion de gaz de pyrolyse et dans les gaz de pyrolyse non brûlés 11
Tableau 2: Méthodes et normes associées, pour la mesure des Particules dans les fumées 22
Tableau 3: Méthodes et normes associées, pour la mesure des COV dans les fumées 26
Tableau 4: Méthodes et normes associées, pour la mesure des PCDD et PCDF dans les fumées 29
Tableau 5: Méthodes et normes associées, pour la mesure des HAP dans les fumées 30
Tableau 6: Liste des laboratoires français contactés 48
Tableau 7: Liste des laboratoires ivoiriens contactés 48

1 Introduction

Dans le cadre du projet AGROVALOR RCI, Nitidæ souhaite mener une **étude sur la réduction des fumées** de combustion suite à l'installation de fours à pyrolyse chez les transformateurs d'anacarde. L'étude vise à **quantifier la réduction des odeurs et de la noirceur des fumées**, principales raisons des nuisances générées au sein et autour des usines. Elle permettra aux industriels d'avoir la mesure concrète de l'impact environnemental et social de cette technologie, ainsi qu'aux autorités environnementales Ivoiriennes de statuer sur les avantages qu'elle offre. À noter que cette étude n'a pas vocation à être reproduite, mais qu'elle pourra fournir de précieuses données qui permettront éventuellement – après analyses – l'optimisation des H2CP. Nitidæ a sélectionné l'industriel SOBERY SARL situé à Bouaké, comme partenaire pour cette étude. Leurs installations serviront à constituer une référence pour le projet AGROVALOR (cf. § 2.1).

Pour mener à bien ce projet, Nitidæ souhaite travailler en partenariat avec un laboratoire – au mieux ivoirien – afin de bénéficier de son expertise dans le domaine et de réaliser les prélèvements puis analyses des fumées.

2 Définition des scenarii étudiés

L'étude ayant pour objectif de quantifier les bénéfices apportés par le système amélioré, elle se doit alors de le comparer au système antérieur. Par conséquent, deux installations seront étudiées sur des critères communs (types de polluants contenus dans les fumées, concentration des polluants communs aux deux systèmes, caractère irritable des fumées générées, quantité de fumées générée, …) et selon des critères de production (quantité de vapeur générée, quantité de coques introduite[2] et celle de noix produite[3]). Ainsi, on pourra comparer les analyses de chaque installation, rapportées à une unité de production journalière et statuer des bénéfices apportés. Dans cette optique, deux scenarii seront mis en place. Ceux-ci sont détaillés dans les deux sous-sections suivantes.

2.1 Scénario de base (SBa)

Le scénario dit « de base » fait référence aux chaudières classiques, utilisées par les transformateurs d'anacarde. Il existe une diversité certaine d'installations classiques chez les partenaires de Nitidæ. Cependant, comme dit plus haut, le choix pour cette étude consiste à sélectionner une installation qui servira de référence. Ces installations se déclinent généralement en les deux systèmes suivants : chaudière verticale à foyer ouvert (généralement alimentée par des CNC), avec tirage naturel et sans traitement des

[2] Les coques d'anacarde, résidus de la transformation industrielle, sont introduites dans l'H2CP, servant à générer le gaz de pyrolyse. Ces gaz sont le combustible de la chaudière industrielle. À l'issue de cette étape, la matière restante (non volatilisée) est un charbon.

[3] Noix brutes d'anacarde – avec la coque – qui subissent plusieurs étapes de transformation ayant recours à l'énergie thermique ou pas : cuisson, décorticage, séchage des amandes, dépélliculage.

fumées en aval (cf. illustration 1) ; et chaudière horizontale à foyer ouvert, avec tirage forcé et traitement des fumées en aval (cyclones).

Dans ce scénario, des CNC brutes ou du bois de brousse servent de combustible dans le foyer. Par conséquent, une quantité plus importante de fumée est dégagée, elles sont de couleur noire (cf. illustration 2) et contiendraient des polluants que les gaz issus de la pyrolyse des CNC ou les fumées de combustion de ces gaz ne contiennent pas (Résorcinol, Hydroxybenzaldéhyde, 3-pentadecenyl phénol, 5-pentadecenyl résorcinol) [5]. Rappelons que c'est, entre autres, pour ces raisons qu'un système amélioré a été étudié et mis en place dans les chaufferies des usines de transformation de l'anacarde.

*Illustration 1: **Système classique**: chaudière à foyer ouvert, alimentation en bois ou CNC brutes*

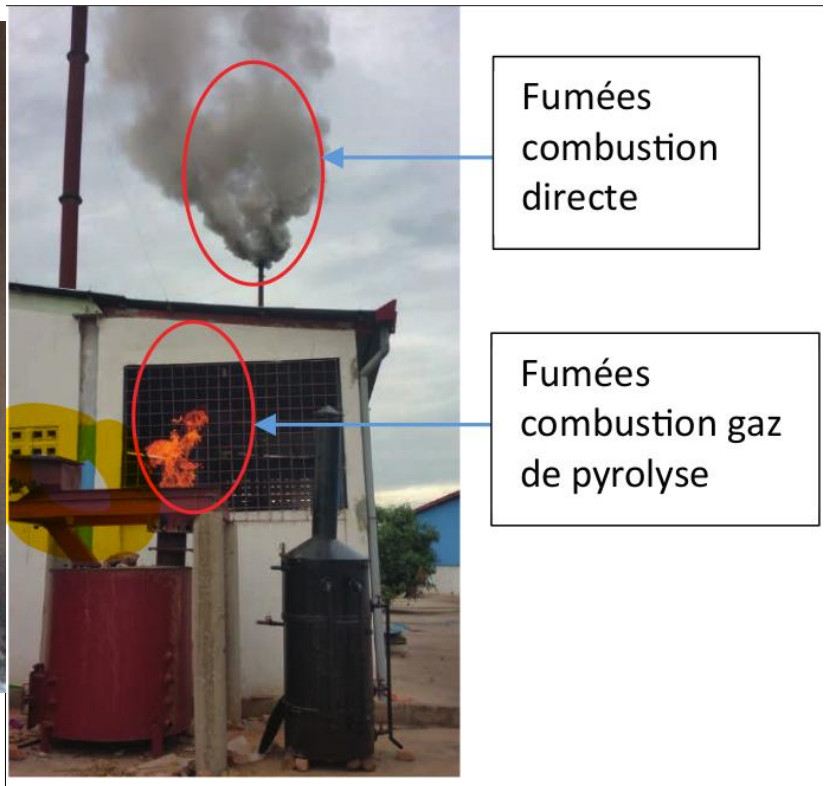

Illustration 2: Différence de couleur des fumées de combustion

2.2 Scénario amélioré (SAm)

Le scénario dit « amélioré » renvoie à l'ajout du four à pyrolyse de CNC (H2CP) sur la chaudière présente sur le site (cf. illustration 3). À l'issue de la pyrolyse, les CNC brutes introduites dans l'H2CP ont été transformées séparent en quatre types de matière : des gaz de pyrolyse (brûlés en direct à la sortie du four), du charbon de coques (utilisable comme combustible pour les ménages), des cendres (utilisables comme engrais) et du goudron (non valorisé, se cumulant sur les surfaces froides du système).

[5] Sur la base des premières études réalisées dans la matière (EEDEMS 2012, Ecometrix 2012). Des vérifications dans les conditions de combustion les plus proches de celles sur site doivent encore être réalisées.

Le gaz issu de la combustion des gaz de pyrolyse des CNC contiendrait (pour les mêmes raisons que précédemment) des polluants différents (2,3-dihydrobenzo furane, Benz[a]anthracène, Terphényl, Acénaphtylène, Acénaphtène, Cyclohexyl phénol, 3-Cyclohexyl phénol, Chrysène et Di-n-octyl phtalate), moins dangereux et en moins grandes proportions dans l'absolu. Dans ce système, le combustible de base (CNC brutes ou bois) est remplacé par le gaz de pyrolyse.

Les observations à l'utilisation montrent que la combustion de ces gaz génère moins de fumées, car les rejets de cheminée sont le plus souvent transparents et leur concentration en polluant (selon analyse visuelle et olfactive) est moindre. Les fumées sont alors moins irritantes et moins odorantes.

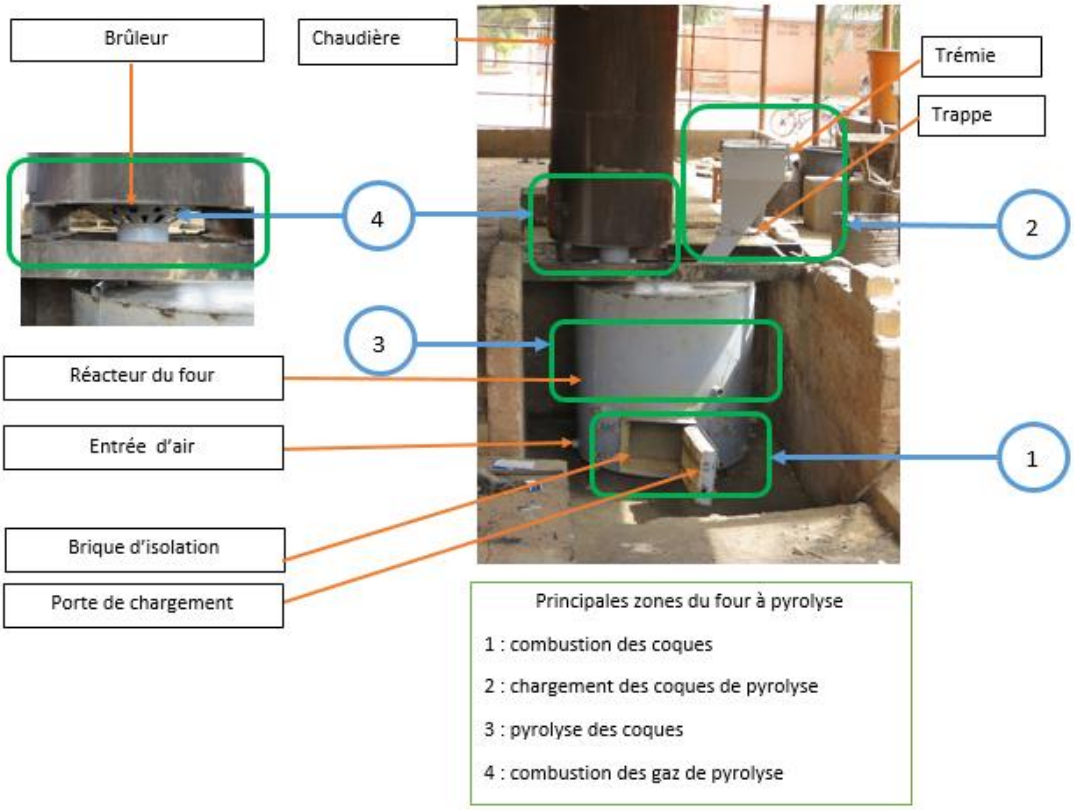

*Illustration 3: **Système amélioré**: Four à pyrolyse sous une chaudière verticale*

2.3 Le site de SOBERY

En 2018, SOBERY SARL a remplacé son système de production de vapeur par un système amélioré (cf. illustration 4). L'opération a consisté à rajouter l'H2CP en dessous de la chaudière verticale déjà en place – à foyer ouvert, à tirage naturel et sans traitement des fumées an aval (cf. illustration 5). Depuis lors, des améliorations du système ont été réalisées en 2019 et aujourd'hui, leur installation est en phase de servir de référence pour l'étude des fumées mené par Nitidæ.

Illustration 4 : Chaudière classique avant installation de l'H2CP, 2017 (SBa)

Illustration 5: Chaudière verticale et son H2CP, SOBERY 2019 (SAm)

3 Liste des polluants émis par la combustion de coque et de gaz de pyrolyse

À partir des analyses réalisées en 2013 – en partenariat avec PROVADEMSE[6], le réseau EEDEMS[7] et le laboratoire Ecometrix[8] (Floralis) – et d'articles issus de la littérature, une liste d'éléments à pu être érigée (cf. tableau 1). On y retrouve les **composés classiques** et les hydrocarbures, présents dans les gaz de pyrolyse non brûlés ainsi que dans les fumées issues de leur combustion (pour vérification et quantification). Les **COV**, **COVNM** et **COSV** de type **HAP légers** (pour vérification et quantification) et **HAP lourds** (pour identification et quantification) présents notamment sous forme de particules. Le tableau 1 ci-dessous regroupe les éléments déjà identifiés par ces travaux, dont la présence serait éventuellement à vérifier et qui n'ont plus qu'à être quantifiés :

---

6 Plateforme d'innovation technologique d'INSAVALOR dédiée au développement des écotechnologies. (Lien)

7 Groupement d'intérêt scientifique (GIS) créé en 2001 qui regroupe aujourd'hui 7 établissements. (Lien)

8 La valorisation de la recherche constitue le cœur de métier de Floralis. (Lien)

Tableau 1: Liste des polluants identifiés dans les fumées de combustion de CNC brutes, les fumées de combustion de gaz de pyrolyse et dans les gaz de pyrolyse non brûlés

Polluants			Analyse des fumées de comb.		Analyse des gaz[9]	Sources
Famille	Nom	Formule	CNC brutes	Gaz de pyrolyse		
Composés classiques	Monoxyde de carbone	CO			X	[1], [2], [3]
	Dioxyde de carbone	CO_2			X	[1], [2], [3]
	Dioxygène	O_2			X	[1], [2], [3]
	Hydrogène	H_2			X	[1], [2], [3]
	Hydroxyde de soufre	H_2S			X	[2]
Hydro-carbures	Méthane	CH_4			X	[1], [2], [3]
	Ethylène	C_2H_4			X	[2]
	Ethane	C_2H_6			X	[2]
	Résorcinol	$C_6H_6O_2$	X			[4]
	Hydroxybenzaldehyde	$C_7H_6O_2$	X			[4]
	2,3-dihydrobenzo furane (PDCF - Composé Polyaromatique de Furane)	C_8H_8O		X		[5]
	Naphtalène (HAP léger)	$C_{10}H_8$	X	X	X	[4], [5], [4]
	Méphénésine	$C_{10}H_{14}O_3$	X			[4]
	Phénanthrène (HAP léger)	$C_{14}H_{10}$	X	X	X	[4]
	Anthracène (HAP léger)	$C_{14}H_{10}$	X	X	X	[4], [5], [4]
	Benz[a]anthracène (HAP lourd - Dérivé du benzène)	$C_{18}H_{12}$		X		[4]
	Terphényl	$C_{18}H_{14}$		X		[4], [5]

[9] Gaz issus de la pyrolyse des CNC brute. Le gaz analysé n'est pas brûlé.

Polluants			Analyse des fumées de comb.		Analyse des gaz[9]	Sources
Famille	Nom	Formule	CNC brutes	Gaz de pyrolyse		
COV, COVNM et COSV	Acénaphtylène (HAP léger)	$C_{12}H_8$		X	X	[4], [5], [4]
	Acénaphtène (HAP léger)	$C_{12}H_{10}$		X	X	[4], [5], [4]
	Cyclohexyl phénol (HAP lourd et dérivé phénolé)	$C_{12}H_{16}O$		X		[4], [5]
	3-Cyclohexyl phénol (HAP lourd et dérivé phénolé)	$C_{12}H_{16}O$		X		[4]
	Chrysène (HAP lourd)	$C_{18}H_{12}$		X	X	[4], [5], [4]
	3-pentadecenyl phenol (Composé Phénolé, Cardanol)	$C_{21}H_{34}O$	X		X	[4]
	5-pentadecenyl resorcinol (Composé Phénolé, Cardol)	$C_{21}H_{34}O_2$	X		X	[4]
COV, COVNM et COSV	Di-n-octyl phtalate (Composé Polyaromatique de Phtalate)	$C_{24}H_{38}O_4$		X		[5]

[1] CEFREDAPE 2012 / [2] J. Abrego et al. 2018 / [3] R. Moreira et al. 2017 / [4] EEDEMS 2012 / [5] Ecometrix 2012

Des recherches complémentaires ont permis de détailler plus précisément le groupement des HAP (cf. illustration 6) permettant ainsi de mieux classifier les HAP déjà identifiés et ceux devant être considérés par l'étude.

POP
(Polluants organiques persistants)

** Contrairement à tous les autres polluants atmosphériques, les POP ne sont pas définis à partir de leur formule chimique mais par les propriétés qui les caractérisent: toxicité avérée sur la faune et la santé humaine, persistance dans l'environnement, bio-accumulation et transport à longue distance.*

Extrait convention de Stockholm (Prise en compte des polluants qui pourraient concerner le projet)

PCB (polychlorobi**phényles)**	**HCB** (hexachloro**benzène)**	**PeCB** (Pentachloro**benzène)**	**PCP** Pentachloro-**phénol**
PCN Polychlorinated **naphthalenes**	**PCDD** (Polychlorinated **dibenzo-p-dioxins)**	**PCDF** (Polychlorinated **dibenzofurans)**	

Illustration 8: Caractérisation des Polluants Organiques Persistants (POP) pour l'étude (1/2)

HAP (hydrocarbures aromatiques Polycycliques)

Tableau 1 : Liste des 16 HAP classés prioritaires par l'US-EPA[3]

Nom	Nombre de cycles	Formule chimique	
Naphtalène	2	$C_{10}H_8$	**HAP Légers : < 4 cycles**
Acénaphtylène	3	$C_{12}H_8$	
Acénaphtène		$C_{12}H_{10}$	
Fluorène		$C_{13}H_{10}$	
Anthracène		$C_{14}H_{10}$	
Phénanthrène		$C_{14}H_{10}$	
Fluoranthène	4	$C_{16}H_{10}$	
Pyrène		$C_{16}H_{10}$	
Benzo(a)anthracène		$C_{18}H_{12}$	
Chrysène		$C_{18}H_{12}$	
Benzo(a)pyrène	5	$C_{20}H_{12}$	
Benzo(b)fluoranthène		$C_{20}H_{12}$	
Dibenzo(ah)anthracène		$C_{22}H_{14}$	
Benzo(k)fluoranthène		$C_{20}H_{12}$	
Benzo(ghi)pérylène	6	$C_{20}H_{12}$	
Indeno(1,2,3-cd)pyrène		$C_{22}H_{12}$	

HAP Lourds : ≥ 4 cycles

Dioxynes et **Furanes**

PCDD (polychlhorodibenzodioxines)
dénombre 75 congénères de PCDD (la TCDD ou 2,3,7,8-tétrachlorodibenzo para-dioxine étant la plus étudiée et la plus toxique)

PCDF (polychlorodibenzofuranes)
135 congénères de PCDF

Illustration 9: Caractérisation des Polluants Organiques Persistants (POP) pour l'étude (2/2)

3.1 Les polluants visés par l'étude

Nitidæ ne souhaite pas identifier tous les éléments, figurants dans les tableau plus haut, notamment pour des soucis de faisabilité. En outre, au regard du contexte et du besoin exprimé, il n'est pas non plus nécessaire de tous les caractériser. Après quelques recherches, les éléments identifiés comme responsables des nuisances olfactives et de la noirceur sont les suivants :

- **Composés organiques totaux** sans distinction des COV, COSV ou COVNM ;
- **Hydrocarbures Aromatique Polycycliques** (HAP) dont le Benzo(a)pyrène ;
- **Dioxines** (PCDD) et **Furanes** (PCDF) ;
- **Poussières totales** sans distinction selon le diamètre aérodynamique des particules.

En effet, les COT, HAP et PCDD/PCDF sont responsables des **nuisances olfactives** et se retrouvent – avec d'autres éléments issus d'une mauvaise combustion – sous forme particulaire et gazeuse dans les émissions. L'H2S en fait aussi partie cependant, il n'a été retrouvé qu'en très faible quantité dans les fumées de combustion de CNC, il est alors écarté. On doit s'attendre à retrouver des éléments provenant de ces catégories dans les fumées de combustion de CNC, dans les gaz de pyrolyse, ainsi que dans les fumées de combustion de ces gaz. Concernant la **noirceur**, ce sont les particules de toutes sortes qui en sont responsables. C'est pourquoi il a été décidé de collecter les particules directement dans les émissions sans distinction de composé ni de taille (PM_{10}, $PM_{2,5}$, PM_1) en plus de collecter les polluants précédents sous forme gazeuse et particulaire. Il reste dans tous les cas à déterminer le taux de O_2 dans les fumées de rejet ; ce composé classique devra être mesuré au cours des prélèvements pour des soucis de référencement (cf. Annexe 1 : Taux de O2 de référence).

3.2 Les voies d'exposition et méthodes de captage

Dans le rapport INERIS 2016[10], sont exposées les différentes voies de contact avec des polluants : l'ingestion et l'inhalation (cf. Illustration 7). L'inhalation concernant les polluants sous forme de **gaz** et de **particules en suspension** dans l'atmosphère et l'ingestion concernant les **particules sédimentaires**, trop lourdes pour rester en suspension. Le rapport y associe deux mesures distinctes pour les détecter (cf. illustration 8) : la mesure de **concentration dans l'air** des polluants sous formes **gazeuse** ou **particulaire** ; et la mesure des **dépôts atmosphériques** des polluants, aussi sous forme **particulaire** ou **gazeuse**, mais cette fois-ci mesurée **sur le sol** ou **sur les végétaux autour de l'exploitation** (principe de la bio-surveillance[11]).

L'application de ces principes au projet AGROVALOR se limitera sûrement à la mesure de concentration dans l'air, car les concentrations seront mesurées directement au niveau des rejets de cheminée. On comprend bien que les polluants mesurés dans les émissions directes sont ceux qui seront retrouvés ensuite dans l'atmosphère et dans l'environnement proche sous forme gazeuse ou particulaire. Néanmoins, en utilisant la méthode de mesure des retombées, on se concentre plus sur l'aspect « impacts » des

10 Guide : Surveillance dans l'air autour des installations classées, retombées des émissions atmosphériques

11 **Note du rapport p.49** : *Les méthodes de bio-surveillance de la qualité de l'air par technique « accumulatrice » sont décrites dans des normes française NFX43-901 pour le ray-grass, NFX43-902 pour les bryophytes (mousses) et NFX 43-904 pour les lichens (sur tronc d'arbres).*

émissions que sur l'aspect « origines » de celles-ci. Or, Nitidæ est toujours désireuse d'apporter des optimisations à ces installations alors, la caractérisation des émissions directes formera une meilleure base de travail dans cette optique.

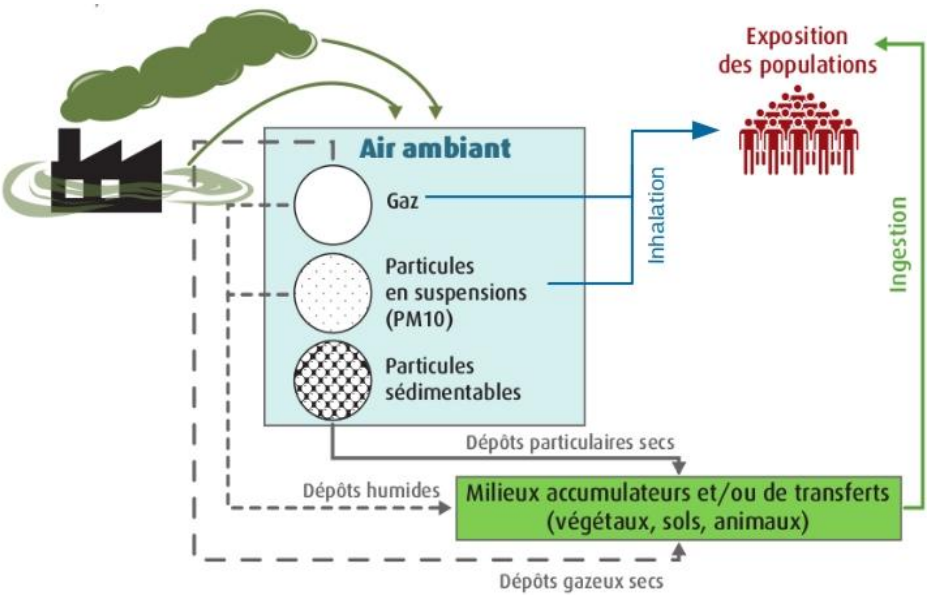

Illustration 10: Voies d'exposition aux polluants (Réalisé à partir de la figure 13 p.39)

	Concentrations dans l'air		Dépôts atmosphériques	
paramètres/ substances	Mesure des concentrations de gaz et/ou particules en suspension dans l'air ambiant		Mesure des flux de dépôts atmosphériques sec (particulaire) et humides (gazeux et particulaire)	Mesure de concentrations résultant de la la bioaccumulation des dépôts atmosphériques par le végétal utilisé (Biosurveillance de la qualité de l'air)
	µg/m³		µg/m²/j	µg/g
	Gaz	Particulaire (fraction PM10)		
COV	X			
HCl gazeux	X			
F et composés fluorés	X	X	X [70]	
SO_2,NOX	X			
PM_{10}		X		
ETM (hors Hg)		X	X	X
Hg	X		X	X
PCDD/F (17 congénères toxiques)			X	X
PCB-DL			X [71]	X
HAP	X (si moins de 3 cycles)	X	X	X [72]

Tableau 7 : Paramètre à mesurer en fonction des polluants (le choix devra être adapté aux enjeux locaux d'exposition)

[70] Méthode des papiers à la chaux - De Cormis, L. - Rapport d'activité annuels. Station d'études de la Pollution atmosphériques d'Avignon-Montfavet (INRA)

[71] PCB 81, 77, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189

[72] Fluorenthène, benzo(a) fluoranthène,benzo(b)fluoranthène, benz(k)fluoranthène, benzo(a)pyrène, dibenzo(a) anthracène, benzo(ghi)pérylène, indeno(123-cd)pyrène

Illustration 11: Types de mesures associées aux voies d'exposition de chaque polluant

Les documents ci-dessus montrent un aspect intéressant de la caractérisation des polluants rejetés dans l'atmosphère, en donnant la forme sous laquelle les retrouver. On voit que les COV, le SO_2 et les NO_X se retrouvent uniquement sous forme gazeuse ; les PM_{10} uniquement sous forme de particules en

suspension ; les PCDD/F et PCB uniquement sous forme de particules sédimentaires ; et le fluor, les composés fluorés et les HAP sous toutes les formes. Cela conforte le choix de Nitidæ de prélever les polluants d'intérêt pour l'étude, sous leurs deux formes.

3.3 Conclusion sur la méthode de captage adoptée

L'option qui semble être la plus adaptée – dans le cas de l'étude de réduction des fumées souhaitée par Nitidæ – est celle qui consiste à prélever directement dans les conduits de cheminée. Cette méthode fait référence aux techniques de gestion des émissions de sources fixes (ESF). À l'inverse de la méthode de prélèvement des retombées autour du site d'émission – faisant référence à la gestion de l'air ambiant (AA) – elle permet de caractériser plus directement les émissions des systèmes à l'étude et d'obtenir une base de comparaison plus pertinente pour l'étude.

4 État de l'art des réglementations pour les polluants sélectionnés (VLE, méthodes et normes)

Le Centre Ivoirien Anti POLution (*CIAPOL*) est organisme en charge de la définition du cadre réglementaire pour les émissions dans l'atmosphère en Côte d'Ivoire (CI). Il y travaille depuis 2019 mais n'est pas encore venu à bout de de sa démarche. Alors, dans le but de pallier le manque de données présentes pour la CI, une veille bibliographique fut réalisée autour des réglementations sur les émissions dans d'autres régions du monde. Ont été mis à l'étude des institutions Africaines (Tanzanie (*TZS*), Kenyanes (*NEMA*)), Indiennes (*AQMCNI* et *INAAQS*), Européennes (*PE[JOUE]*) , Françaises (*MTES*, *INERIS* et *LegiFrance*) et Américaines (*NAAQS*).

Le travail suivant fait état-de-l'art des Valeurs Limites à l'Émission (VLE) et des réglementations et directives qui les définissent, ainsi que des techniques et spécificités de contrôle de ces valeurs et des normes qui les décrivent. Les normes référencées dans les tableaux ci-dessous font référence aux méthodes de prélèvement et/ou d'analyse et/ou de traitement de l'information, pour le contrôle des émissions. Certaines font référence à la gestion de la qualité de l'air ambiant (AA) tandis que d'autres se réfèrent directement à la gestion des émissions provenant de sources fixes (ESF).

Dans les sous-sections suivantes, les informations sont répertoriées en termes de polluants, se référant à la liste des polluants définie pour l'étude dans la section précédente.

4.1 Poussières totales, SPM, RPM et particules (PM_{10}, $PM_{2,5}$)

Les particules sont appelées de différentes manières dans la littérature ce qui illustre en quelque sorte la grande diversité des éléments qu'elles regroupent. *Les techniques de l'ingénieur*[12] stipulent que : *« Contrairement aux polluants sous forme gazeuse, les rejets de particules dans l'atmosphère doivent être différenciés selon la taille des particules. La composition des particules peut être très diverse (carbone, métaux lourds…) et servir de support à d'autres substances en fixant par exemple des composés organiques. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont ainsi émis à la fois sous forme particulaire et gazeuse.*

12 Techniques de l'ingénieur : Méthodes de quantification des émissions dans l'air, ref : G1630 V1

Les émissions proviennent des phénomènes de combustion (en général particules de petites tailles d'autant que les installations sont généralement pourvues de dépoussiéreurs qui arrêtent plus efficacement les particules de taille élevée). »

Ainsi, les particules sont caractérisées, d'une part par leur taille et, d'autre part, par leur composition. La taille présente un intérêt particulier compte tenu du fait que seules les particules les plus fines (< 10 µm) sont susceptibles de pénétrer dans les voies respiratoires et d'avoir un impact sanitaire notable. Un discernement est donc effectué en fonction de la manière dont elles sont présente dans l'environnement, de leur capacité à pénétrer les voies respiratoires et ainsi de leur taille. On retrouve alors les grandes catégories suivantes :

- TSP pour « Total Suspended Particulates » : **poussières totales en suspension** dans l'air **quelle que soit la taille**. Il est admis généralement que les particules respirables ont **un diamètre maximal de 50 µm**. Les particules de très grosses tailles sédimentent très rapidement.[13]

À la catégorie précédente référencée par les *techniques de l'ingénieur*, s'ajoute les deux suivantes :

- SPM pour *« Suspended Particulates Matter » : NEMA*[14] les définie comme « *[…] toutes les particules de matière qui persistent dans l'atmosphère ou dans un flux de gaz de combustion pendant de longues périodes car,* ***les particules sont trop petites pour avoir une vitesse de chute appréciable*** ». *L'OMS*[15], *TZS*[16] et *l'ENVIS*[17] viennent compléter cette définition en désignant les SPM comme **toutes les particules en suspension dans l'atmosphère, regroupant les PM_{10}, $PM_{2,5}$ et le $PM_{0,1}$**. Elles correspondent alors aux dites **poussières totales** référencées dans les documents législatifs ivoiriens[18].

- RPM pour « *Respirable Particulates Matter* » ou fraction alvéolaire des particules en suspension : Elles désignent selon James S Brown et al. 2013 et la définition de la norme ISO 7708:1995 des particules inhalées **pénétrant les voies respiratoires non ciliées**[19] et **capables de passer au travers des voies respiratoires ciliées**[20] (structure de l'épithélium[21]). De plus, James S Brown et al. 2013 associent un **diamètre aérodynamique de 4** µm (faisant référence à une pénétration de 50%) à ces particules. Conjointement, le département de protection de l'environnement de Hong Kong dans son article « Health Effects of Air Pollutants - Respirable and Fine Suspended Particles (PM10 and PM2.5) » parle de « respirable suspended particulates » (RPM) comme pouvant être

13 Techniques de l'ingénieur : Méthodes de quantification des émissions dans l'air, ref : G1630 V1
14 THE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AND CO-ORDINATION (AIR QUALITY)REGULATIONS, 2014
15 Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide
16 DRAFT TANZANIA STANDARD
17 Environmental Information System, dans leur article Suspended Particulate Matter
18 E référer à la définition de MEST de l'Arrêté sur la réglementation des rejets0001 – 01164 du 04 Nov. 2008.
19 James S Brown et al. 2013
20 ISO 7708:1995 : Qualité de l'air — Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé
21 https://www.universalis.fr/encyclopedie/respiratoire-appareil-anatomie/3-l-epithelium-des-voies-respiratoires/

nommées aussi PM_{10}, désignant toutes particules dont le diamètre aérodynamique est inférieur à 10 µm.

Ces trois sources mises en parallèle, permettent de fixer une définition commune des RPM et de leur associer à priori un diamètre aérodynamique autour de 4 µm. Elles sont, en soi, peu distinguables des PM_{10}, elle sont même une sous-catégorie de celles-ci .

Les sous catégories de PM distinguée seulement selon leur diamètre aérodynamique sont définies par *Les techniques de l'ingénieur* et *Wikipédia* comme suit :

- **PM_{10}** pour « *Particulate Matter* » : particules dont le diamètre aéraulique équivalent est **inférieur à 10 µm** (seuil de coupure du système respiratoire). Elles sont aussi appelées « coarse Particulate Matter » pour particules grossières[22].
- **$PM_{2.5}$** : particules dont le diamètre aéraulique équivalent est **inférieur à 2,5 µm** (seuil de coupure des bronches). Aussi appelées « fine Particulate Matter » pour particules fines.
- **$PM_{1.0}$** : particules ultra-fines dont le diamètre aéraulique équivalent est **inférieur à 1 µm**. Aussi appelées « ultra-fine Particulate Matter » pour particules très fines.

4.1.1 VLE et AAQTL

Dans les *Techniques de l'ingénieur* citées précédemment, la loi française à laquelle elles font référence stipule que[23] :

- Pour les effluents gazeux, les valeurs limites s'imposent à des mesures, prélèvements et analyses moyens réalisés sur une durée qui est fonction des caractéristiques de l'appareil et du polluant et voisine d'une demi-heure.
- Lorsque la valeur limite est exprimée en flux spécifique, ce flux est calculé, sauf dispositions contraires, à partir d'une production journalière.

Le *CIAPOL* se réfère aux mêmes VLE que celles de la législation Française (au détail près de la limite basse) de 1998 concernant les **Poussières totales** (cf. illustration 9), établissant un seuil de 40 mg/m³ pour un flux supérieur à 1 kg/h et de 100 mg/m³ dans le cas contraire. De plus, les moyennes sont à réaliser sur une base journalière ou au choix. La *Directive du parlement européen de 2010* définissait un seuil de **5 mg/m³** à **moyenner sur 24h** si la mesure en continu tout au long de la vie de l'installation n'était pas obligatoire. Elle fut complétée par la *Décision d'exécution* datant de 2017, qui fixe deux plages pour *des émissions résultant de la combustion de biomasse solide*[24] : de **2 à 15 mg/Nm³** pour les installations de moins de 100 MW_{th} **moyennée sur une année** ; et de **2 à 22 mg/Nm³** pour une **moyenne journalière ou sur la période d'échantillonnage** déterminée. *TZS* fait référence à un seuil de 250 mg/Nm³ pour une moyenne sur 24h

[22] https://en.wikipedia.org/wiki/Particulates#Size, shape and solubility matter
[23] Arrêté du 2 février 1998, article 21
[24] Seule référence exploitable du document pour le cas des H2CP.

ce qui paraît bien trop éloigné des valeurs préconisées par le parlement européen. De plus, le document *TZS* est un « draft » ce qui incite d'autant plus à se référer aux textes européens.

Sources	Flux Tot	VLE	AAQTL	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
CIAPOL 2008	≤ 1 kg/h	100	-	mg/m³	Au choix Ou MJ	-	-
	>1 kg/h	50	-	mg/m³		-	-
INERIS LegiFrance2009	-	-	-	-	-	Méthode gravimétrique manuelle	NF X44-052 et NF EN 13284-1
PE(JOUE) DIRECTIVE 2010/75/UE	-	5	-	mg/m³	À définir		EN 13284-1 et EN 13284- 2
DÉCISION D'EXÉCUTION (UE) 2017/1442	-	2 à 15 2 à 12 2 à 10	-	mg/Nm³	MA		EN 13284-1 et EN 13284- 2
	-	2 à 22 2 à 18 2 à 16	-	mg/Nm³	MJ ou Sur période		
TZS 845: 2012 Air Quality Specifications (2018)	-	250	-	mg/Nm³	M24h		ISO 12141
Tech. Ingé 2006 Ref : arrêté 2/02/98	≤ 1 kg/h	100	-	mg/m³	Au choix Ou MJ	Opacimétrie parr Masse totale Photométrie par Comptage en nombre [Comptage optique, Jauge piézoélectrique, Jauge bêta, Classification électrostatique, Méthode aérodynamique (sédimentation, cyclone, centrifugation…)] Par Comptage en masse	AFNOR. – Qualité de l'air
	>1 kg/h	40	-	mg/m³			

Illustration 12: Synthèse des données de contrôle pour les ***Poussières totales***

Concernant les **SPM** (cf. illustration 10), les deux seules sources référençant la catégorie sous cette appellation, *NEMA* et *TZS*, donnent les mêmes valeurs d'**AAQTL**. Lorsqu'il y à trois valeurs par case, c'est pour trois zones différentes : zones industrielles (valeur la plus faible) ; zones résidentielles et autres ; et zones contrôlées (valeur la plus importante). Enfin, lorsqu'il n'y a qu'une valeur par case, il s'agit de seuils pour la deuxième zone et dont le dépassement ne doit pas advenir plus d'une fois sur la période de mesure – contrairement à trois fois pour les cas précédents. Ainsi on retiendra les valeurs pour les **zones résidentielles** de **140 µg/m³** pour une **moyenne annuelle** (100 µg/m³ pour un unique dépassement autorisé) et de **200 µg/m³** pour une **moyenne sur 24h** (180 µg/m³ pour un unique dépassement autorisé). *TZS* fait référence à une plage de **VLE** plus basse que les valeurs précédentes, de **60 à 90 µg/m³** pour une **moyenne annuelle** (avec une limite de dépassement pour la moyennes journalière - à partir de relevés horaires - de 0,1 µg/m³ et une limite pour les valeurs horaires de 0,2 µg/m³). Ma préconisation tend vers la plage la plus restrictive pour des soucis environnementaux et sanitaires, ainsi qu'au regard des valeurs définies plus bas pour les RPM_{10} et les PM_{10} (cf. illustrations 11 et 12).

Sources	Flux Tot	VLE	AAQTL	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
NEMA 2016	-	-	70, 140 À 360	µg/m³	MA	Mechanical collectors (dust cyclones, multicyclones) Electrostatic precipitators Fabric filters(baghouses) Particulate scrubbers	-
	-	-	100, 200 À 500	µg/m³	M24h		-
	-	-	100	µg/m³	MA		-
	-	-	180	µg/m³	M24h		-
TZS 845: 2012 Air Quality Specifications (2018)	-	-	70, 140 À 360	µg/m³	MA	Prélèvement sur filtre	ISO 9835:1993
	-	-	100, 200 À 500	µg/m³	M24h		
	-	-	100	µg/m³	MA		
	-	-	180	µg/m³	M24h		
	-	60 to 90 (00.077 – 0.116 Mg/kg)		µg/m³	MA		

*Illustration 13: Synthèse des données de contrôle pour les **SPM***

De même que précédemment, seul deux organismes, *NEMA* et *TZS* font référence aux **RPM** (cf. illustration 11) et donnent exactement les mêmes valeurs d'**AAQTL**. On y retrouve trois valeurs s'appliquant aux trois zones énoncées plus haut. On retiendra les valeurs pour les zones résidentielles de **50 µg/m³** pour une **moyenne annuelle** et de **100 µg/m³** pour une **moyenne sur 24h**.

Sources	Flux Tot	AAQTL	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
NEMA 2016	-	50, 50 à 70	µg/Nm³	MA	Mechanical collectors (dust cyclones, multicyclones) Electrostatic precipitators Fabric filters(baghouses) Particulate scrubbers	-
	-	75, 100 à 150	µg/Nm³	M24h		-
TZS 845: 2012 Air Quality Specifications	-	50, 50 à 70	µg/m³	MA	Prélèvement sur filtre	ISO 9835:1993
	-	75, 100 à 150	µg/m³	M24h		

*Illustration 14: Synthèse des données de contrôle pour les **RPM_{10}***

Concernant les **PM_{10}** (cf. illustration 12), *NEMA* donne une plage de **VLE** de 30 à 50 µg/Nm³ pour une moyenne annuelle. La *Directive européenne de 2008* quant à elle, donne : **40 µg/m³** pour une **moyenne annuelle** et **50 µg/m³** pour une **moyenne journalière.**

Sources	Flux Tot	VLE	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
MTES 2016 & INERIS (2018) R221-1 C.env	-	-	µg/m³	MA	-	NF EN 12341
	-	-	µg/m³	MJ	-	
PE(JOUE) DIRECTIVE 2008/50/C	-	50	µg/m³	MJ	Détermination de la fraction PM10 de matière particulaire en suspension	
	-	40	µg/m³	MA		
INAAQS 2016	-	-	µg/m³	MA	Mesurage gravimétrique, TOEM ou Beta atténuation	
	-	-	µg/m³	MJ		
AQMCNI 2016	-	-	mg/Nm³	-	-	-
NEMA 2016	-	-	-	-	Gravimétrie automatique et manuelle Analyse par rayons Beta Spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES)	KS ISO 10473 KS ISO 12141 KS ISO 15202-1 KS ISO 15202-2 KS ISO 15202-3
NEMA 2020	-	30 à 50	mg/Nm³	MA	Mechanical collectors (dust cyclones, multicyclones) Electrostatic precipitators Fabric filters(baghouses) Particulate scrubbers	
GSAAIC 2016	-	-	-	-	**Méthode automatique** Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOMFDMS) Gravimétrie	NF EN 12341
INERIS LegiFrance2009	-	-	-	-	-	NF EN 12341
NAAQS – US EPA 2008	-	-	µg/m³	M24h	Method 005 et Method 0005I Prélèvement sur filtre en fibre de verre et analyse par gravimétrie (M 0005 et 0005I)	-

Illustration 15: Synthèse des données de contrôle pour les PM_{10}

Les $RPM_{2,5}$ ainsi que les $PM_{2,5}$ sont traités conjointement puisque les valeurs de référence sont les mêmes (cf. illustrations 13 et 14) pour les deux appellations. On retrouve *TZS* pour les $RMP_{2,5}$ et *NEMA* pour les $PM_{2,5}$, qui préconisent des AAQTL de 35 **µg/m³** pour une moyenne annuelle et 75 **µg/m³** pour une moyenne journalière. Ajouté à cela, *INERIS* fait référence à des VLE de 20 (à respecter en 2020) et 25 (à respecter en 2015) **µg/m³** pour une moyenne annuelle.

Sources	Flux Tot	AAQTL	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
TZS 845: 2012 Air Quality Specifications (2018)	-	35	µg/m³	MA	-	ISO 9835:1993
	-	75	µg/m³	M24h	-	

Illustration 16: Synthèse des données de contrôle pour les $RPM_{2,5}$

Sources	Flux Tot	VLE	AAQTL	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
MTES 2016	-	-	-	µg/m³	MA	-	-
PE(JOUE) DIRECTIVE 2008/50/C	-	-	-	µg/m³	MA	Mesurage gravimétrique	-
INAAQS 2016	-	-	-	µg/m³	MA	Mesurage gravimétrique, TOEM ou Beta atténuation	-
	-	-	-	µg/m³	MJ		-
AQMCNI 2016	-	-	-	mg/Nm³	-	-	-
NEMA 2016	-	-	35	µg/m³	MA	Gravimétrie automatique et manuelle Analyse par rayons Beta Spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES)	KS ISO 10473 KS ISO 12141 KS ISO 15202-1 KS ISO 15202-2 KS ISO 15202-3
	-	-	75	µg/m³	M24h	Mechanical collectors (dust cyclones, multicyclones) Electrostatic precipitators Fabric filters(baghouses) Particulate scrubbers	
GSAAIC 2016	-	-	-	-	-	**Méthode automatique** Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOMFDMS) Gravimétrie	NF EN 12341
INERIS LegiFrance2009	-	-	-	-	-	-	
INERIS (2018) R221-1 C.env	-	25 → 20	-	µg/m³	MA	-	-
NAAQS – US EPA 2008	-	-	-	µg/m³	MA	Method 005 et Method 0005I Prélèvement sur filtre en fibre de verre et analyse par gravimétrie (M 0005 et 0005I)	-
	-	-	-	µg/m³	M24h		

Illustration 17: Synthèse des données de contrôle pour les $PM_{2,5}$

4.1.2 Méthodes et normes de prélèvement et d'analyse

Pour la mesure des **poussières totales**, la **gravimétrie manuelle par détermination de concentration en masse** est renseignée par *Legifrance*, la *Directive de 2010 du PE* et sa *Décision d'exécution de 2017*, ainsi que par *TZS*. *Les techniques de l'ingénieur* font référence à l'**opacimétrie par masse totale** et la **photométrie par comptage en masse** et en **nombre**. Concernant les **SPM**, les **RPM_{10}** et les **$RPM_{2,5}$**, *NEMA* et *TZS* font référence aux mêmes **méthodes manuelles et mécaniques de prélèvement** (filtres, cyclones, classification électrostatique, …). Pour les **PM_{10}** et **$PM_{2,5}$**, la méthode d'**analyse gravimétrique automatique** est largement dominante dans les références, puisque *MTES*, *LegiFrance* via *INERIS* et la réglementation 221-1 du code de l'environnement, *la Directive de 2008 du PE*, l'*INAAQS* et le *GSAAIC* la préconisent. L' *INAAQS* et le *GSAAIC* mentionnent la **technique de TEOM** (Tapered Element Oscillating Microbalance) et celle de **Beta atténuation**. Ensuite, *NEMA* fait référence à une méthode d'**analyse gravimétrique manuelle**, une méthode d'**analyse par utilisation de rayonnements Beta**, une méthode de **spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif** ainsi qu'à des **méthodes spécifiques de prélèvements mécaniques avec collecteurs**. Enfin, l'*NAAQS* évoque une méthode de **prélèvement sur filtre chauffé en fibre de verre** et d'**analyse par gravimétrie**. Le tableau suivant fait le point sur les différentes méthodes et les normes qui leurs sont associées :

Tableau 2: Méthodes et normes associées, pour la mesure des Particules dans les fumées

POLLUANT	MÉTHODE	NORME	DESCRIPTION de la norme
Poussières totales	Gravimétrie manuelle	NF X44-052	ESF - Détermination de fortes concentrations massiques de poussières (CMP). Méthode gravimétrique manuelle
		NF EN 13284-1	ESF - Détermination de la faible CMP Partie 1: Méthode gravimétrique manuelle
		NF EN 13284- 2	ESF - Partie 2 : assurance qualité des systèmes de mesurage automatisés
		ISO 12141	ESF - Détermination d'une faible CMP - Méthode gravimétrique manuelle
	Opacimétrie par Masse totale	NF X43-302	ESF - Détermination de la concentration de poussière par opacimétrie à lumière réfléchie.
	Photométrie par comptage en nombre	NF X43-269	WAQ - Prélèvement sur filtre à membrane pour la détermination de la concentration en nombre de fibres par les techniques de microscopie : MOCP, MEBA et META - Comptage par MOCP
SPM, RPM_{10} et $RPM_{2,5}$	Prélèvement sur filtre	ISO 9835	AA - Determination of a black smoke index
PM_{10} et $PM_{2,5}$	Gravimétrie automatique	NF EN 12341	AA - Méthode normalisée de mesurage gravimétrique pour la détermination de la concentration massique MP10 ou MP2,5 de matière particulaire en suspension
	Gravimétrie manuelle	KS ISO 12141	ESF - Determination of mass concentration of PM (dust) at low concentrations - Manual gravimetric method
	Analyse par rayons Beta	KS ISO 10473	AA - Measurement of the mass of PM on a filter medium - Beta-ray absorption method
	Spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES)	KS ISO 15202-1	WA - Determination of metals and metalloids inairborne PM by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry - Part1: Sampling
		KS ISO 15202-2	WA - Part2: Sample preparation
		KS ISO 15202-3	WA - Part3: Analysis
	Prélèvements sur filtres et analyse gravimétrique	-	ESF - Method 0005 : PM & Method 0005I : Low Level PM
Légendes	AA : Air Ambiant / ESF (ou SSE) : Émissions des Sources Fixes / SMA (ou AMS) : Système de Mesurage Automatique / WAQ : Workplace Air Quality / Méthode de prélèvement / Méthode d'analyse / Méthode complète		

4.2 Composés organiques : COV, COSV, COVNM

Les composés organiques volatils « COV » regroupent un très grand nombre de molécules de propriétés physico-chimiques très différentes. Ils sont décrits par la Directive 1999/13/CE comme « *des composés organiques ayant une pression de vapeur saturante de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K ou ayant une volatilité correspondante dans des conditions d'utilisation particulières* ». Ils se divisent en plusieurs catégories tels que les suivantes qui nous intéressent :

- *COSV* : Composés Organiques Semi-Volatils, qui se distinguent de par leur concentration de saturation effective C^* (10^{-1} µg.m^{-3} < C* < 10^3 µg.m^{-3}), à comparer avec celle des COV de supérieure à 10^6 µg.m^{-3}.
- *COVNM* : Composés Organiques Volatils Non Méthaniques, qui se distinguent par l'absence de méthane en leur sein, ce qui affecte leur impact environnemental et leur longévité dans l'atmosphère.[25]

Ce sont essentiellement des solvants, des plastifiants, des composés soufrés et azotés susceptibles d'induire des nuisances olfactives, des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques. Leur part d'émission attribuée à la combustion est très faible (quelques pour-cent), mais peut ponctuellement être significative dans les cas de combustion de la biomasse dans des foyers ouverts ou semi-ouverts[26].

4.2.1 VLE et AAQTL

Les valeurs de la littérature pour les COV sont assez disparates puisque aucune des sources consultées renseigne sur la même chose. En effet, *NEMA* et *TZS* parlent d'émissions de **COV totales** (regroupant tous types de COV) donnent une **AAQTL** de **0,6 mg/m³ pour une moyenne sur 24h** et de **6 mg/m³ pour une moyenne sur 8h** (cf. illustration 15). Les techniques de l'ingénieur[27] quant à elles font référence aux COVNM et à d'autres types de COV mis à l'écart[28]. Pour les **COVNM**, elles renseignent une **VLE** seuil à **110 mg/m³** pour les installations dont le flux massique totale de COV est supérieur à 2 kg.h^{-1}. Une règle spécifique fait référence à un flux comportant seulement les **COV mis à l'écart** et fixe une **VLE** seuil de **20 mg/m³** si le flux total de ces polluants dans les rejets dépasse 0,1 kg.h^{-1}. Notons que dans *Les techniques de l'ingénieur* citées précédemment, la loi française à laquelle elles font références stipule que[29] :

- *Pour les effluents gazeux, les valeurs limites s'imposent à des mesures, prélèvements et analyses moyens réalisés sur une durée qui est fonction des caractéristiques de l'appareil et du polluant et voisine d'une demi-heure.*

25 HAL : Caractérisation expérimentale et statistique des sources de Composés Organiques Volatils (COV) en région Île-de-France, Alexia Baudic
26 Les techniques de l'ingénieur : Traitement des fumées, 18 Avril 2018, Réf. : BE8856 V2
27 Arrêté du 2 février 1998, article 27
28 Arrêté du 2 février 1998, annexe III
29 Arrêté du 2 février 1998, article 21

- *Lorsque la valeur limite est exprimée en flux spécifique, ce flux est calculé, sauf dispositions contraires, à partir d'une production journalière.*

Sources	Flux Tot	VLE	AAQTL	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
NEMA 2016	-		600	µg/m³	M24h	Adsorption systems, such as activated carbon Flares, Thermal oxidizers Catalytic oxidizers, Biofilters, Absorption (scrubbing), Cryogenic condensers Sampling and analysis by GC : - Pumped sampling - Diffusive sampling active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID Sampling and analysis by sorbent tube/thermal desorption/capillary gas chromatography (GC)	KS ISO 16200-1 KS ISO 16200-2 KS ISO 16000-5 KS ISO 16000-6 KS ISO 16017-1 KS ISO 16017-2
TZS 845: 2012 Air Quality specifications (2018)	-		6	mg/m³	M8h	Active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID	ISO16000-6
INERIS LegiFrance2009	-	-	-	-	-	Méthode du détecteur continu à ionisation de flamme	NF EN 12619
Tech. Ingé 2016	> 2 kg .h^{-1}	110	-	mg/m³	-	Mesure globale par Ionisation de flamme FID Chromatographie gazeuse (GC) par Spectrométrie de masse (MS) OU Spectrométrie infrarouge (IR)	LENS (P.N.L.), KENNES (C.), LE CLOIREC (P.) DESHUSSES (M.A.) London (2006). ADEME , Angers (1998).
	< 2 kg .h^{-1}	20	-	mg/m³	-	Échantillonnage par adsorption et extraction par solvant ou thermodésorption	XP CEN/TS 13649 (2015)
	> 0,1 kg .h^{-1}	20, 50 à 110	-	mg/m³	-		
	> 0,1 kg.h^{-1}	20	-	mg/m³	-		
NAAQS – US EPA 2008	-	-	-	-	-	Method 18 : measurement of gaseous OC emissions by	-
Tech. Ingé 2016	> 0,01 kg.h^{-1}	2	-	mg/m³	-	Échantillonnage par adsorption et extraction par solvant	XP CEN/TS 13649

Illustration 18: Synthèse des données de contrôle pour tous les COV

4.2.2 Méthodes et normes de prélèvement et d'analyse

Tous COV confondus, les méthodes préconisées sont les mêmes. En effet, chaque source fait référence à la méthode d'analyse par chromatographie en phase gazeuse (CPG ou GC) utilisant conjointement la spectrométrie de masse (MS) et la détection par ionisation de flamme (FID), abrégée « CPG par MS/FID ». Les méthodes divergent plus concernant le prélèvement des échantillons (échantillonnage). *NEMA* mentionne différentes techniques d'absorption (charbon actif, oxydation thermique ou catalytique, …), deux méthodes de prélèvement : par pompage ou par captage diffusif ; ainsi qu'une utilisation de la sorption/désorption citée aussi par *TZS*.

Les techniques de l'ingénieur font aussi référence à l'absorption pour le prélèvement mais mentionnent l'extraction par utilisation de solvant ou de thermosiphon pour les COVNM et à d'autres types de COV mis à l'écart.

Le tableau suivant fait le point sur les différentes méthodes citées et les normes qui leur sont associées :

Tableau 3: Méthodes et normes associées, pour la mesure des COV dans les fumées

POLLUANT	MÉTHODE	NORME	DESCRIPTION de la norme
COV (tous confondus)	Stratégie de prélèvement	KS ISO 16000-5	IA - Part5: Sampling strategy for VOCs
	Prélèvement actif sur sorbant « Texas TA » associé à une désorption thermique et une analyse par CPG - MS/FID	KS ISO 16000-6	IA- Part6: Determination of VOCs in indoor and test chamber air by active sampling on Tenax TA sorbent, thermal desorption and GC using MS/FID
	Prélèvement sur sorbant, désorption thermique et analyse capillaire par CPG : Cas de prélèvement par pompage	KS ISO 16017-1	IA, AA and WAQ - Sampling and analysis of VOCs by sorbent tube / thermal desorption / capillary GC - Part1: *Pumped sampling*
	Prélèvement sur sorbant, désorption thermique et analyse capillaire par CPG : Cas de prélèvement par captage diffusif	KS ISO 16017-2	IA, AA and WAQ - Sampling and analysis of v VOCs by sorbent tube / thermal desorption / capillary GC - Part2: Diffusive sampling
	Sorption/désorption par utilisation de solvants et analyse par CPG : Cas de prélèvement par pompage	KS ISO 16200-1	WAQ - Sampling and analysis of VOCs by solvent desorption / GC - Part1: *Pumped sampling method*
	Sorption/désorption par utilisation de solvants et analyse par CPG : Cas de prélèvement captage diffusif	KS ISO 16200-2	WAQ - Sampling and analysis of volatile organic compounds by solvent desorption/GC - Part2: *Diffusive sampling method*
	Méthode continue de CPG - FID	NF EN 12619	ESF - Détermination de la concentration massique en CO total - Méthode du détecteur continu à ionisation de flamme
		-	ESF - Method 18 : Measurement of gaseous OC emissions by GC
COV, COVNM et Autres	Échantillonnage par adsorption et extraction par solvant ou thermo-désorption	XP CEN/TS 13649 (2015)	ESF - Détermination de la concentration massique en CO gazeux individuels - Échantillonnage par adsorption et extraction par solvant ou thermo-désorption
Légendes	AA : Air Ambiant / ESF (ou SSE) : Émissions des Sources Fixes / SMA (ou AMS) : Système de Mesurage Automatique / WAQ : Workplace Air Quality / Méthode de prélèvement / Méthode d'analyse / Méthode complète		

4.3 Dioxines et Furanes : PCDD et PCDF

D'après le gouvernement canadien[30], on compte 210 dioxines et furanes différents. Toutes les dioxines ont la même structure chimique de base et possèdent toutes des atomes de chlore. C'est la même chose pour les furanes, sauf que leur structure chimique de base est différente. La toxicité de ces substances varie grandement, la dioxine la plus toxique étant appelée 2,3,7,8-TCDD, ou simplement TCDD. L'incinération à grande échelle des déchets municipaux et médicaux constitue la source la plus importante de dioxines mais, la combustion de biomasse figure aussi dans la liste des sources émettrices. De plus, il est à noter que les dioxines et les furanes sont les noms communs de substances chimiques toxiques qu'on trouve en très petites quantités dans l'environnement, notamment dans l'air, l'eau et le sol. Comme elles sont présentes dans l'environnement, on les trouve aussi dans certains aliments.

Ainsi, même si leur présence semble faible dans notre cas d'étude, ils doivent quand même être caractérisés et quantifiés.

4.3.1 VLE et AAQTL

Deux références françaises donnent des VLE pour les émissions de PCDD et PCDF (cf. illustration 16). *Les techniques de l'ingénieur* évoquent un seuil de 0,1 ng I-TEQ/Nm^3 tandis que la *Décision d'exécution de 2017* de la *Directive de 2010* du *PE* fixe une plage plus restrictive de 0,01 à 0,03 ng I-TEQ/Nm^3 pour une moyenne sur la période d'échantillonnage déterminée (des mesures devant être réalisées tous les 6 mois), et pour les émissions atmosphériques de PCDD/F et de COV totaux résultant de la co-incinération de déchets avec de la biomasse, de la tourbe, du charbon ou du lignite.

Rappelons que dans *Les techniques de l'ingénieur* citées précédemment, la loi française à laquelle elles font références stipule que31 :

- *Pour les effluents gazeux, les valeurs limites s'imposent à des mesures, prélèvements et analyses moyens réalisés sur une durée qui est fonction des caractéristiques de l'appareil et du polluant et voisine d'une demi-heure.*
- *Lorsque la valeur limite est exprimée en flux spécifique, ce flux est calculé, sauf dispositions contraires, à partir d'une production journalière.*

30 https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/vie-saine/votre-sante-vous/environnement/dioxines-furanes.html

31 Arrêté du 2 février 1998, article 21

Sources	Flux Tot	VLE	Unité	Mesure	Méthodes associées	Normes associées
NEMA 2016 & NEMA 2020	-	-	-	-	Cyclone Electrostatic precipitator Bag filterWet scrubber Quenching & subsequent wet scrubber Catalytic oxidation (selective catalytic reaction) Catalytic bag filter Dry absorption in resins (carbon Particles dispersed in a polymer matrix) Entrained flow reactor with added activated carbon or coke/lime or limestone solutions and subsequent fabric filter Fixed bed or circulating fluidized bed reactor, adsorption with activated carbon Or open hearth coke	-
INERIS LegiFrance2009	-	-	-	-	-	NF EN 1948-1-2-3
Tech. Ingé 2016	-	0,1	ng I-TEQ/Nm³	-	Préconcentration et chromatographie gazeuse GC par Spectrométrie de masse MS et Étalonnage préalable	-
DÉCISION D'EXÉCUTION (UE) 2017/1442	-	< 0,01-0,03	ng I-TEQ/Nm³	Une fois tous Les 6 mois	-	NF EN 1948-1-2-3
NAAQS – US EPA 2008	-	-	-	-	Method 23 : determination of PCDD/F from stationary sources – sampling train Method 5 Method 23.A : sampling method for PCDD/F emissions from stationary sources – sampling train method 10	-

Illustration 19: Synthèse des données de contrôle pour les PCDD et PCDF

4.3.2 Méthodes et normes de prélèvement et d'analyse

Concernant les méthodes de prélèvement et d'analyse des PCDD et PCDF, *NEMA* énumère un certain nombre de méthodes de prélèvement : mécaniques (cyclones, captation électrostatique, filtre et laveur), d'absorption sur résine, de réacteur à flux entraîné et de réacteur à lit fixe ou fluidisé couplés à de l'absorption via des solutions de charbon actif, de coke/chaux ou encore de calcaire et filtre à tissu consécutifs. *Les techniques de l'ingénieur* et *NAAQS* parlent d'analyses par GC-MS, ils y associent respectivement une pré-concentration de polluant et des prélèvements et mesures (sonde de prélèvement, filtre en fibre de verre et colonne à absorption) au sein d'une chaîne de mesure.

Le tableau suivant fait le point sur les différentes méthodes cités et les normes qui leur sont associées :

Tableau 4: Méthodes et normes associées, pour la mesure des PCDD et PCDF dans les fumées

POLLUANT	MÉTHODE	NORME	DESCRIPTION de la norme
PCDD et PCDF	Méthode complète	NF EN 1948-1	ESF - Détermination de la concentration massique en PCDD/PCDF et PCB de type dioxine - Partie 1 : prélèvement
		NF EN 1948-2	ESF - Partie 2 : extraction et purification
		NF EN 1948-3	ESF - Partie 3 : identification et quantification
		NF EN 1948-4+A1	ESF - Partie 4 : prélèvement et analyse des PCB de type dioxine
		NF EN 1948-4/IN1	ESF - Partie 4 : prélèvement et analyse des PCB de type dioxine
		XP CEN/TS 1948-5	ESF - Partie 5 : prélèvement à long terme
	Prélèvements (chaîne de mesure) et analyse par GC-MS	-	ESF – Sampling (Method 23.A) and analysis by GC-MS (Method 23)
Légendes	AA : Air Ambiant / ESF (ou SSE) : Émissions des Sources Fixes / SMA (ou AMS) : Système de Mesurage Automatique / WAQ : Workplace Air Quality / Méthode de prélèvement / Méthode d'analyse / Méthode complète		

4.4 Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Wikipédia[32] résume très bien la situation concernant les HAP comme suit : « *Depuis de nombreuses années, les HAP sont très étudiés car ce sont des composés présents dans tous les milieux environnementaux et qui montrent une forte toxicité. D'ailleurs, c'est une des raisons qui ont conduit à leur ajout dans la liste des polluants prioritaires par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA US Environmental Protection Agency), dès 1976. Aujourd'hui, ils font également partie des listes de l'OMS (Organisation mondiale de la santé) et de la Communauté européenne. Bien qu'ils ne soient pas cités dans la liste déclaratoire de la convention de Stockholm portant sur les polluants organiques persistants (POP), ils sont répertoriés en tant que tels dans le protocole d'Aarhus (en)* ».

32 https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrocarbure_aromatique_polycyclique

4.4.1 VLE et AAQTL

Comme le montre le Tableau 1, les **HAP** se retrouvent dans la **catégorie des COV, COSV et COVNM**. De plus, la littérature ne renseigne **ni VLE ni AAQTL** spécifiques pour les HAP. Ainsi, les valeurs prises en compte seront celles discutées dans la sous-section sur les COV.

4.4.2 Méthodes et normes de prélèvements et d'analyses

En revanche, quelques normes sont associées à la catégorisation spécifique des HAP. De plus, le cas des **B{a]P** est traité à part et des méthodes figurent dans la littérature telles que l'**extraction par sorbant associée à une CLHP ou une CPG** cité par l'*INAADS* mais pour laquelle ne figure aucune norme. Les éléments normatifs figurent dans le tableau ci dessous :

Tableau 5: Méthodes et normes associées, pour la mesure des HAP dans les fumées

POLLUANT	MÉTHODE	NORME	DESCRIPTION de la norme
HAP	Prélèvement, mesure et analyse	KS ISO 11338-1	ESF -Determination of gas and Particle-phase HAP - Part1: Sampling
		KS ISO 11338-2	ESF -Part2: Sample preparation, clean-up and determination
	Collecte sur sorbant et GC-MS	KS ISO 12884	AA - Determination of total (gas and Particle-phase) HAP - Collection on sorbent-backed filters with gas chromatographic/mass spectrometric analyses
	Chromatographie liquide	KS ISO 16362	AA - Determination of Particle-phase HAP by high performance liquid chromatograph
	Prélèvement et mesurage	NF X43-329	ESF - Prélèvement et mesurage d'HAP à l'émission
B[a]P	Mesurage	NF EN 15549	Qualité de l'air - Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration du B[a]P dans l'air ambiant
Légendes	AA : Air Ambiant / ESF (ou SSE) : Émissions des Sources Fixes / SMA (ou AMS) : Système de Mesurage Automatique / WAQ : Workplace Air Quality / Méthode de prélèvement / Méthode d'analyse / Méthode complète		

5 État de l'art des outils pour une campagne d'étude de fumées

Le rapport INERIS 2016[33] parle de méthodes de mesure AUTOMATIQUES qui permettent des mesures en temps réel (résolution temporelle : sec. à la min.) ; et MANUELLES, qui permettent de réaliser une moyenne des concentrations dans l'air sur la durée du prélèvement (résolution temporelle : 1h à 14j). De plus, ces méthodes se distinguent par leur complexité et leur coût de mise en œuvre, la méthode automatique pouvant apporter des surcoûts dus à la quantité de matériel à installer sur place car elle prévoit des analyses en direct et aussi plus de complexité liée aux appareils d'analyse à gérer. À l'inverse, la méthode manuelle peut s'avérer être moins complexe et moins coûteuse à court terme car elle suppose l'intervention d'un laboratoire externe pour l'analyse des prélèvements. Enfin, le rapport évoque des méthodes manuelles ACTIVES requérant le pompage de l'effluent à examiner (donc une alimentation électrique) ; ou PASSIVES avec la mise en place de récupérateur au sein de l'effluent à étudier. Ces méthodes diffèrent légèrement lorsqu'il s'agit d'analyse d'émissions de sources fixes. En effet, le pompage n'est pas forcément nécessaire car les effluents mesurés ont déjà une vitesse propre en revanche, l'alimentation électrique l'est pour alimenter les systèmes de mesure et d'analyse sur place.

Dans le cas de l'étude prévue par Nitidæ, l'effluent est contenu dans une cheminée et à une vitesse propre. De plus, les industries sur place sont moins propices à l'installation d'une plateforme de laboratoire conséquente pour la réalisation d'analyses directes. Ainsi, le plus adapté semblerait être :

- une méthode automatique non intrusive[34] afin de caractériser les émissions sur une longue période (ex : 1 semaine) ;
- une méthode manuelle active non intrusive (utilisant un analyseur équipé d'un système de prélèvement) pour caractériser des polluants majeurs précis lors de phases décisives de la production (durée de la min. à l'heure) et enfin ;
- une méthode manuelle passive non intrusive (seuls les prélèvements ont lieu sur place sauf si un appareil portatif de mesure directe est disponible) afin de caractériser certains polluants particuliers dont l'analyse ne peut être réalisée sur place et dont le prélèvement s'avère être spécifique (COV, HAP , PCDD/F), ou encore pour mesurer le taux de O_2 dans l'effluent avec les appareils déjà disponibles.

33 GUIDE : Surveillance dans l'air autour des installations classées, retombées des émissions atmosphériques

34 Qui ne vient pas perturber les phases de production de l'usine.

5.1 Mesures

Des mesures de O_2, de **température**, de **pression** ainsi que de **vitesse** sont requises lors d'une campagne de caractérisation de polluants pour plusieurs raisons. Premièrement, les réglementations définissant les VLE pour les émissions de sources fixes le font pour une température et une pression de référence – et parfois même selon un taux de O_2 de référence (cf. § Annexe 2) – comme c'est le cas pour la Directive 2008/50/CE[35] et sa Décision d'exécution 2017/1442[36], ou encore par la Directive 2010/75/UE[37]. Deuxièmement, la vitesse est une donnée importante pour l'homogénéité des mesures (plus de détails au § 5.3) en vue de pouvoir les comparer et elle est même impérative dans certains cas comme les poussières. Troisièmement, il peut être intéressant de caractériser le fonctionnement des installations soumises à l'étude des fumées, vis-à-vis de ces paramètres. En effet, prenons l'exemple de la température des fumées. Connaître sa valeur pendant différentes phases de fonctionnement du four et voir son évolution peut être indicateur de dysfonctionnement et peut donner des pistes d'amélioration du système.

L'ISSeP distingue deux types de mesures[38] :

Les mesures in-situ : *Le terme "mesures in situ" étant utilisé pour indiquer que l'échantillon n'est pas extrait du conduit mais que l'analyte est directement mesuré dans le flux de gaz. Ces mesures peuvent être réalisées en installant directement le capteur dans le flux. Cette technique permet notamment la détermination des paramètres physiques des fumées : température, pression et débit. On peut également citer l'exploitation de phénomènes physiques (zircone, induction,...) permettant de déterminer la composition chimique des fumées. Celle-ci est cependant, le plus souvent, déterminée in-situ par des techniques optiques. Un rayon lumineux traverse le conduit entre un émetteur et un récepteur et l'absorption (ou la réflexion) de ce rayon est proportionnelle à la concentration de l'analyte recherché.*

Les mesures extractives : *Les mesures extractives sont réalisées au moyen d'un système de prélèvement. Une sonde est utilisée pour extraire un échantillon représentatif des fumées du flux principal. On peut dans ce cas parler de prélèvement. En général, les mesures extractives sont utilisées pour déterminer la composition chimique des fumées et la concentration en poussières.*

---

35 Pour les polluants gazeux, le volume doit être normalisé à une température de **293 K** et à une pression atmosphérique de **101,3 kPa**. Pour les particules et les substances à analyser dans les particules (par exemple, le plomb), le volume d'échantillonnage se rapporte aux conditions ambiantes en termes de température et de pression atmosphérique au moment des mesures. (cf. Annexe VI, § c. Normalisation)

36 Les niveaux d'émission dans l'air associés aux meilleures techniques disponibles (NEA-MTD) qui sont indiqués dans les présentes conclusions sur les MTD désignent des concentrations exprimées en masse de substance émise par volume d'effluents gazeux dans les conditions standard suivantes: gaz secs à une température de **273,15°K** et à une pression de **101,3 kPa**; concentrations exprimées en mg/Nm3, µg/Nm3 ou ng I-TEQ/Nm3. (cf. § NEA-MTD pour les émissions dans l'air)

37 Toutes les valeurs limites d'émissions ont calculées à une température de **273,15 K**, à une pression de **101,3 kPa** et après correction en fonction de la teneur en vapeur d'eau des gaz résiduaires, et pour une **teneur normalisée en O_2** [..] de 3 % dans le cas des installations de combustion autres que les turbines à gaz et les moteurs à gaz utilisant des combustibles liquides et gazeux [...]. (cf. Annexe V, Partie 1, § 1)

38 Fiche ISSeP A-I-1 : https://www.issep.be/cwea-table-des-matieres-2/

Il existe deux types de mesures extractives suivant qu'elles soient continues ou non.

- *Lorsque l'on réalise des prélèvements en continu, une portion des fumées est prélevée de la cheminée et est injectée dans un analyseur qui indique directement la concentration de l'analyte.*
- *Lorsque l'on réalise des prélèvements en discontinu, une portion des fumées est prélevée et l'analyte est fixé par un système de captation (filtre, solution d'absorption, solide d'adsorption,...) dans lequel il s'accumule. L'échantillon est ensuite analysé au laboratoire. Dans ce cas, le volume de gaz prélevé doit être mesuré précisément afin de ramener la masse d'analyte capté déterminée par le laboratoire à une concentration volumique.*

Un exemple d'application extractive active est la chaîne de mesure schématisée à l'Illustration 20. Elle débute avec une mesure de température à l'aide d'une sonde et de vitesse (dont découle le calcul du débit) à l'aide d'un tube de Pitot (vitesse obtenue par mesure de pression différentielle). S'en suit une filtration dans un conduit chauffé, une multitude de prélèvements de différents polluants à l'aide d'impacteurs plongés dans un bac de glace (pour obtenir une température de 273,15 K). Et on retrouve en fin de course une pompe à vide permettant le soutirage de l'effluent au sein de la canalisation.

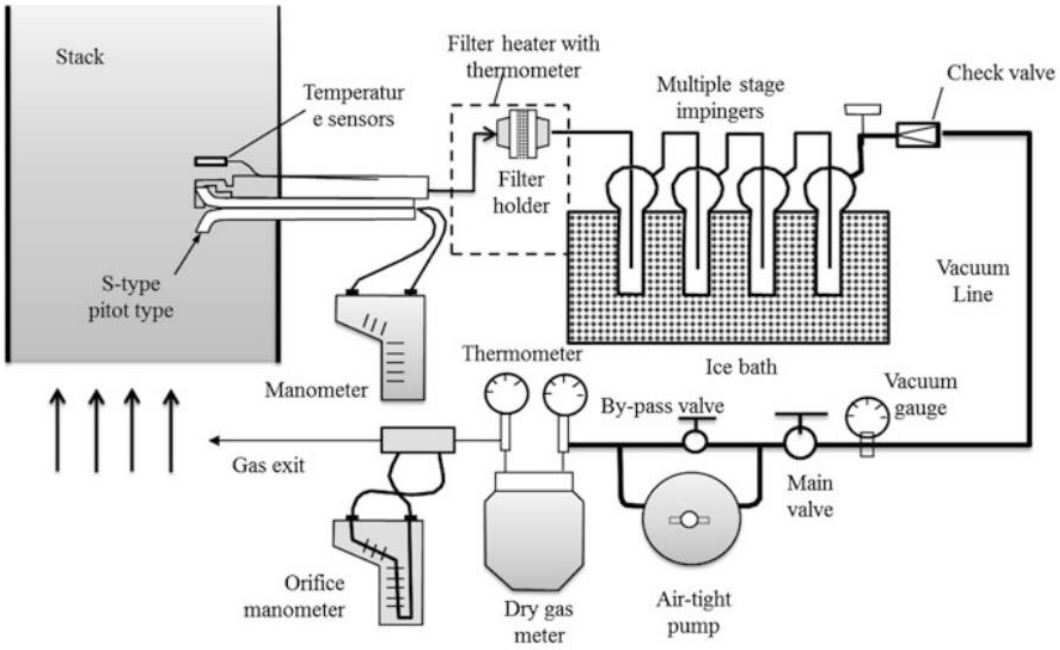

Fig. 15.2 Sampling train for particulate matter (US EPA Method 5)

Illustration 20: Exemple de chaîne de mesure manuelle active extractive (source: Air Pollution and Greenhouse Gases)

Ainsi, pour reprendre les termes de *méthode manuelle active ou passive* utilisés dans le rapport INERIS 2016[39], on parle de ***méthode manuelle passive extractive*** lorsque la chaîne de mesure n'inclue pas de pompe (c'est le cas lorsque l'isocinétisme[40] peut être obtenu sans) et de ***méthode manuelle active (extractive ou in-situ)*** si elle nécessite une pompe (afin d'obtenir l'isocinétisme).

5.2 Prélèvements

On parle de prélèvements dans le cadre de **mesures manuelles extractives**, qu'elles soient **actives ou passives**. Les prélèvements sont réalisés à l'aide de bride « gaz » pour les polluants sous forme gazeuse et de brides « poussières » pour les polluants sous forme particulaire. Leur emplacement et leur nombre sont à déterminer en fonction du diamètre de la canalisation et du type d'écoulement, selon la fiche A-I-2 de l'ISSeP[41] (cf. illustrations 18 à 21).

Illustration 21: Exemple de brides de différents types fixées sur canalisations circulaires par l'ISSeP (A-I-2)

Le nombre de points de prélèvements est fonction du diamètre de la canalisation. Ceci est dû au fait que chaque prélèvement ne doit pas perturber les autres. Ainsi, il est possible de déterminer le nombre minimum de points de prélèvement par rapport au diamètre de la canalisation (cf. illustration 19). De plus, pour garantir une indépendance des mesures, l'emplacement des points de prélèvement doit aussi être strictement définit et ceci en fonction du diamètre de la canalisation encore une fois (cf. Illustration 20). Plus de détails théoriques ainsi qu'une formule de calcul de l'emplacement des points à l'intérieur du conduit sont donnés par le livre « Air Pollution and Greenhouse Gases » à la section « *15.2.3 Multiple Sampling Locations* ».

39 GUIDE : Surveillance dans l'air autour des installations classées, retombées des émissions atmosphériques

40 Condition sur la vitesse nécessaire notamment pour la captation des poussières : la vitesse à l'entrée de la sonde de prélèvement doit être la même que celle dans le conduit en ce point. Rapport A-I-1 de l'ISSeP : https://www.issep.be/cwea-table-des-matieres-2/

41 Fiche ISSeP A-I-2: https://www.issep.be/cwea-table-des-matieres-2/

Diamètre du conduit (m)	Nombre minimum de lignes d'échantillonnage	Nombre minimum de points par ligne		Nombre minimum de points de prélèvement	
		y compris le centre	à l'exclusion du centre	y compris le centre	à l'exclusion du centre
< 0,35	-	1	1	1	-
0,35 à 0,70	2	3	2	5	4
> 0,70 à 1,00	2	5	4	9	8
> 1,00 à 2,00	2	7	6	13	12
> 2,00	2	9	8	17	16

Table 1: nombre minimum de points de prélèvement – conduit circulaire

Illustration 22: Nombre de points de prélèvement minimum dans une canalisation circulaire par l'ISSeP (A-I-2)

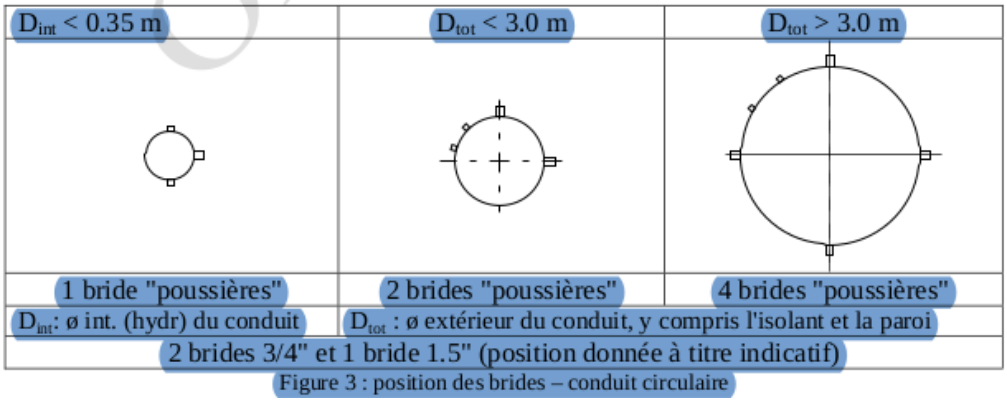

Figure 3 : position des brides – conduit circulaire

Illustration 23: Emplacement de brides dans une canalisation circulaires par l'ISSep (A-I-2)

L'emplacement des brides (soit de la zone de prélèvement ou de mesure) est fonction de l'écoulement à l'intérieur de la canalisation. En effet, l'écoulement doit être laminaire dans la majorité des cas afin de réaliser des mesures homogènes. Pour les PM par exemple, l'écoulement doit être laminaire afin de respecter la condition d'isocinétisme car les particules se caractérisent par leur spectre granulométrique, leur forme, leur couleur, leur densité… Ainsi, l'isocinétisme permet de capter des poussières possédant les mêmes caractéristiques afin de constituer un échantillon représentatif des fumées.

Afin que la condition d'écoulement laminaire soit remplie, il est impératif de choisir convenablement ce qu'on appel le plan de mesure. Celui-ci doit être caractérisé par un écoulement laminaire, sans giration, ni turbulence. Il doit être situé dans une zone de conduit droit ayant une forme et une section constante. Ce plan de mesure doit être situé le plus loin possible tant en aval qu'en amont de tout élément (coude, ventilateur, silencieux, registre,…) qui pourrait perturber l'écoulement (cf. illustration 21).

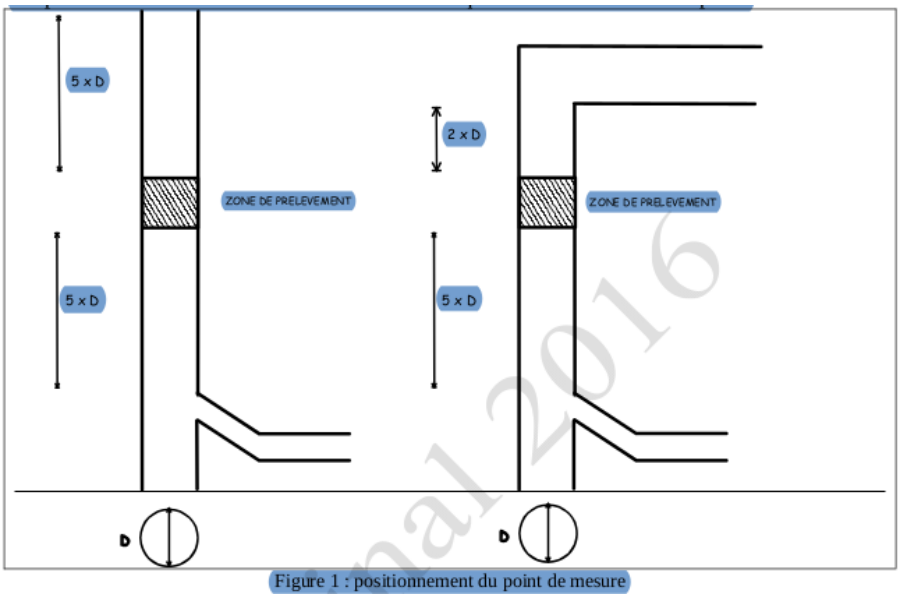

Illustration 24: Positionnement d'une zone de prélèvement dans un conduit par l'ISSeP (A-I-2)

Concernant la **condition d'isocinétisme**, le livre « *Air Pollution and Greenhouse Gases* » en explique très clairement les détails. Il stipule notamment que cette condition n'est requise que pour la mesure de polluants sous forme particulaire et qu'elle **ne concerne pas la mesure de polluants sous forme gazeuse**.

5.2.1 Outils de prélèvement/échantillonnage

Le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) à rédiger à ce titre un *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales* contenant notamment son *Cahier 4 : Échantillonnage des émissions atmosphériques en provenance de sources fixes*. Celui-ci décrit les démarches à suivre afin de mettre en place une campagne échantillonnage sur site. Le *Cahier 7 : Méthodes de mesure du débit* est aussi intéressant. De plus, la lecture du *Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail* publié par l'IRSST[42] fourni une liste d'appareillages.

Le prélèvement, qu'il soit intégré ou non à une chaîne de mesure, fait intervenir des outils qui serviront à capter le polluant sous sa forme gazeuse, particulaire ou encore condensée. La section suivante présente quelques-uns des outils à disposition.

42 Institut de Recherche Robert-sauvé en Santé et en Sécurité au Travail

Les sacs de prélèvement

Ils sont fabriqués de différents matériaux polymérisés, sont disponibles en différents volumes, se placent toujours en dehors du conduit de cheminée et permettent de collecter les polluants sous leur forme gazeuse. En revanche, ce type de sac n'est pas recommandé notamment pour le sulfure d'hydrogène (H_2S), le dioxyde de soufre (SO_2) et le dioxyde d'azote (NO_2)[43].

Les tubes absorbants

Ce sont des tubes en verre contenant deux sections d'absorbant (charbon actif, gel de silice, polymères, ...) qui permettent de capter les polluants dans les gaz et la vapeur. On considère l'échantillonnage comme acceptable si moins de 10% du produit se retrouve dans la seconde section.

Les filtres à poussières

Les méthodes de prélèvement dépendent du type de poussières que l'on désire examiner. Les matériaux employés généralement dans les filtres incluent les fibres de verre ou de quartz, la cellulose ("papier"), les membranes organiques ou la mousse de polyuréthane, chacune de ces matières pouvant servir à réaliser des filtres de diverses porosités.

NB : L'extraction des poussières peut aussi être réalisée par un cyclone qui minimise les turbulences et les pertes de charge. Le cyclone a un rendement très dépendant de sa taille se qui nécessite de le dimensionner pour débit de gaz fixe or, le débit de gaz est variable dans les installations du projet. Cette solution n'est alors pas envisageable.

Piégeage par absorption

Cette technique consiste à utiliser une chaîne d'absorption afin d'en extraire le polluant souhaité pour le doser plus facilement. En pratique, on fixe sélectivement le constituant à doser sous la forme d'une solution ou d'un précipité que l'on analysera. Le piégeage par absorption implique donc une dissolution dans un milieu absorbant, suivie d'une réaction chimique entre ce milieu et le composé recherché. Il en résulte la formation d'un composé stable et non volatil, comme un précipité caractéristique.

NB : Cette méthode est particulièrement utilisée pour la mesure des aldéhydes, comme le formaldéhyde, qui sont piégés par réaction avec la DNPH (dinitrophénylhydrazine) en solution acétonitrile pour former des hydrazones facilement séparables par chromatographie en phase liquide et détectées par absorption UV grâce à la présence d'un noyau aromatique dans la molécule.

5.2.2 Outils de mesure

Parler des instruments à lecture directe (ILD)[44].

---

43 Thèse de BOUDAOUD, Chahrazed : Détection des pollutions dans l'air à l'intérieur des bâtiments 2010 - chap 1 §II.4.1 sacs d'échantillonnage

44 Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail, IRSST 2012 - page 30

5.3 Analyses

Le document A-I-3 de l'ISSeP fait le point sur les différentes méthodes d'analyse des gaz majeurs dans les émissions de sources fixes.

	SO_2	NOx	CO	CO_2	O_2	COT
Absorption IR	X	X	X	X		X
FTIR	X	X	X	X		X
Absorption UV	X	X				
Corrélation par filtre gazeux	X	X	X	X		X
Cellules électrochimiques	X	X	X		X	
Fluorescence UV	X					
Chimiluminescence		X				
Ionisation de flamme						X
Paramagnétisme					X	
Sonde zircone					X	

Tableau 1

Illustration 25: Les analyseurs des gaz majeurs par ISSeP (A-I-3)

Le document A-I-4 de l'ISSeP fait le point sur les différentes méthodes d'analyse des poussières dans les émissions de sources fixes.

	Opacimétrie	Scintillation	Diffusion	Dépression	Absorption β	Triboélectrique	Electrodynamique
In-situ	X	X	X			X	X
Extractif			X	X	X	X	
LD (mg/m³)	20	2	< 0.05	< 0.1	< 0.3	0.1	0.1
Gamme (mg/Nm³)	> 1000	-	0-100		0-1000	0-200	

Tableau 1

Illustration 26: Techniques d'analyse pour les poussières par ISSeP (A-I-4)

Un document particulièrement intéressant pour la partie d'analyse est le rapport de thèse de Florent LE GLÉAU[45] de 2012, évoquant **l'analyse des gaz majoritaires (O_2, CO_2, NOx, CO, SO_2) se fait par un analyseur multi-gaz portatif, l'Horiba PG-250**.

45 Étuded'un dispositifdetraitement de fumées issues de l'incinération de déchets industriels spéciaux

Figure 2.1 Système d'analyse in-situ des gaz majoritaires.
(A) : filtre M&C PSP4000H ; (B) : conditionneur M&C PSS-5 ; (C) : Analyseur PG-250

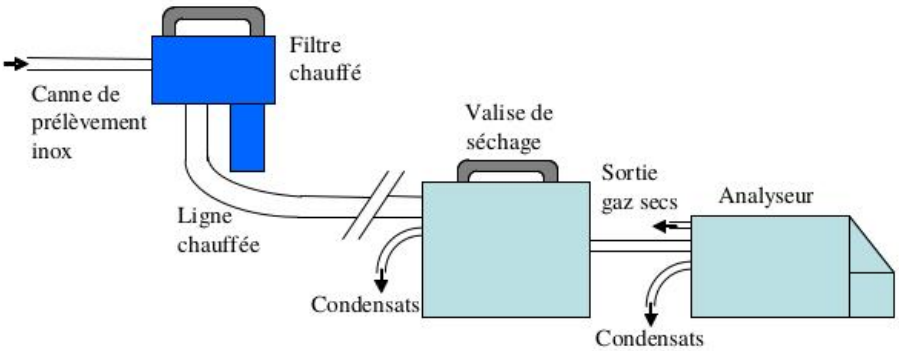

Figure 2. 2 Schéma du montage du système d'analyse des gaz en continu

Illustration 27: Système d'analyseur portatif utilisé pour l'analyse des gaz majeurs

Cet appareil est capable de réaliser les mesures (analyses) directes suivantes :

Tableau 2.8 Techniques de mesure des composés gazeux

Gaz	Lieu de mesure	Technique
H_2O	Ex situ	Barboteur + pesée
O_2	In situ	Paramagnétique (Horiba)
CO_2	In situ	NDIR (Horiba)
SO_2	In situ	NDIR (Horiba)
NO/NOx	In situ	Chimiluminescence (Horiba)
CO	In situ	NDIR (Horiba)
HCl	Ex situ	Barboteurs + CI

Dans cette étude, il est cité les analyses complémentaires suivantes réalisées en laboratoire sur des solides :

Tableau 2.9 Techniques d'analyses de solides utilisées

Technique	Analyse
Fluorescence X	Analyse semi-quantitative
ICP-OES	Analyse quantitative
Diffraction X	Analyse cristallographique
Chromatographie ionique	Analyse quantitative de la phase hydrosoluble
MEB	Imagerie, Analyses semi-quantitative ponctuelles

6 Expertise des professionnels du domaine

Des échanges avec plusieurs laboratoires (Bureau veritas CI, SGS CI, Manumesure, Micropolluants, Apave, Wessling et Eurofins) situés en Côte d'Ivoire (2/7) et en France (5/7) ont permis de compléter l'étude bibliographique. Ils ont apporté un point de vue beaucoup plus pragmatique, reflétant la réalité du terrain de manière générale ainsi que les particularités du contexte ivoirien. Ci-après, des éléments pertinents rapportés par les professionnels du domaine :

- La réalisation d'une campagne de prélèvement et de mesure, suivie des analyses des éléments souhaités représentent un **chantier complexe**, qui **demande une quantité certaine de matériel**[46] **spécifique et dédié**. Par conséquent, c'est une intervention qui **requiert du personnel qualifié et expérimenté sur place**. Tout cela implique plusieurs choses. Premièrement, **il semble exclu que Nitidæ réalise la partie terrain de l'étude par elle-même** (cf. complexité/spécificité des protocoles et du matériel), une équipe d'expert devra alors être missionnée. Deuxièmement, **les coûts de transport du matériel**, s'il n'est pas disponible sur place, seront **très élevés** et parfois, le matériel n'est même pas disponible à la location et demande d'être acheté. Tout ceci pourrait représenter un coût total allant de 20 à 30 k€ (la majorité étant dédiée à l'envoi du matériel sur place) et un délai de livraison d'un mois, si le laboratoire prestataire est en France.

- **Les prélèvements que l'on souhaite réaliser** (HAP, Dioxines et Furanes, COT) **sont obligatoirement réalisés de manière ACTIVE** (cf. § 5). Il est alors nécessaire d'utiliser des chaînes de prélèvements et mesures composées de pompes, refroidisseurs, cuves, barboteurs, sondes chauffées, etc.

- Ci-dessous, quelques détails des **méthodes utilisées par les laboratoires pour réaliser les prélèvements** des éléments souhaités :

  - **HAP** : Nécessite 6 h de prise de mesure, sur 3 prélèvements différents : Un prélèvement de la phase particulaire avec une canne munie d'une sonde à son extrémité ; Un prélèvement de la phase condensable après passage dans un serpentin de refroidissement ; et un prélèvement de la phase gazeuse sèche en faisant passer l'effluent sur une résine.

  - **COV** : Nécessite un appareil alimenté par un mélange d'hydrogène (60 %) et d'Hélium (40 %) dans des bonbonnes de type B 110. Le conduis qui achemine l'effluent doit être chauffé (160 °C + sonde filtrante). Les gaz chauds humides sont envoyés sur l'appareil. Il y a un chalumeau à l'intérieur, dont la flamme augmente en présence de composés carbonés, ce qui permet de quantifier les COT.

  - **Composés classiques** et **PCDD/PCDF** : Nécessite 4 h de prise de mesure. On utilise un FID (Flame Ionization Detector) sur place pour analyser les composés.

- Ci-après, une liste de matériels nécessaires et pouvant êtres trouvés sur place : du gaz d'étalonnage (propane) ; une alimentation électrique en 220V (2 lignes de 16A) ; un accès à de l'eau pour le nettoyage

46 Le matériel dans son ensemble occupe un volume donné de 2 m^3.

du matériel ; de l'acide, des chlorures et du mercure[47] (quantités non transmises). De plus, il faut prévoir de travailler en hauteur donc d'installer une plateforme ou de disposer d'un moyen pour monter et travailler de manière stable (échafaudages, nacelle, …).

7 Retours sur les propositions des laboratoires

Les laboratoires cités plus haut ont proposé leurs services sous différentes formes, les paragraphes suivants en font le bilan.

Concernant les propositions des partenaires français, il semblerait que le plus accessible techniquement parlant soit de faire venir une équipe de spécialiste sur place. Le matériel à utiliser est complexe et les prélèvements demandent une certaine expertise que Nitidæ ne possède pas. Une seconde option techniquement accessible, proposée par Wessling, serait de passer par le prélèvement de retombées atmosphériques autour de l'usine (cf. AA). Ceci nécessite un matériel bien moins complexe (le nombre de techniciens spécialisés diminue) ce qui fait baisser le coût de la prestation. La précision ne sera pas du tout la même, néanmoins, ce pourrait être un compromis acceptable. De plus, vis-à-vis de l'absence actuelle de réglementations, rien n'empêche de baser l'étude sur des analyses de retombées atmosphériques plutôt que sur des prélèvements dans les conduits de cheminées.

Financièrement parlant, qu'il s'agisse de louer le matériel ou de l'acheter, ce sont deux solutions qui coûtent très cher. Néanmoins, elles reposent sur deux visions différentes du projet. Acheter le matériel pourrait être intéressant pour Nitidæ, si elle souhaite l'utiliser pour reproduire l'étude plus tard ou l'utiliser sur d'autres projets. Cela nécessiterait la formation d'une équipe spécialisée sur place – une formation ayant une durée de 6 mois et un coût sûrement non-négligeable – ce qui permettrait à Nitidæ de développer un nouveau pan de son expertise si elle le souhaite. Dans le cas contraire, louer le matériel s'avère être une meilleure option. Il demeure, cependant, que les coûts d'acheminement du matériel, s'il provient de France, reste non-négligeables.

Alors, la solution la plus économique si un partenaire français est choisi serait d'opter pour l'évaluation des retombées atmosphériques, quitte à perdre en précision de mesures.

Travailler avec des laboratoires ivoiriens permettrait de réduire tous les coûts liés à la procuration du matériel : pas d'achat de matériel, pas d'acheminement par bateau ou avion pour la location, pas de déplacement d'une équipe depuis la France. De plus, cela réduirait la complexité logistique globale du projet pour les mêmes raisons de transport de matériels et de personnes. Malheureusement, le secteur du contrôle des rejets à l'environnement n'est pas encore très actif. Par conséquent, il est difficile de trouver des laboratoires susceptibles de pouvoir intervenir sur le projet. Et quand bien même les laboratoires existent, ils ne disposent pas encore tous du matériel, ni de l'expertise nécessaire.

[47] Ces composés chimiques sont utilisés dans les processus de séparation des éléments (pré-concentration) avant analyses. Ils sont introduits dans la chaîne de prélèvement. Par exemple, on fait passer les gaz comme les HAP dans une chaîne de mesure type : sonde ⇒ barboteurs (acide, soude) ⇒ pompe ⇒ …

Conclusions sur l'orientation du projet

Trois mois après le lancement du projet, **Nitidæ dispose de trois options pour réaliser son étude** :

➢ Option A : Caractérisation des émissions canalisées

Cette option est celle qui répond le mieux aux besoins du projet, elle se décline en deux possibilités par ordre de priorité :

A.1 : collaborer avec SGS CI qui réaliseraient les prélèvements, mesures et analyses par eux-mêmes. Ils utiliseraient le matériel de pointe dans l'industrie et respecteraient les protocoles réglementaires des tests ;

A.2 : profiter de nos relations avec PROVADEMSE pour renouer une collaboration sur le projet. Ils pourraient déléguer une équipe sur place, qui viendrait avec du matériel (moins sophistiqué) pour réaliser la campagne. Ils se chargeraient aussi des analyses une fois retournés en France.

➢ Option B : Caractérisation des retombées autour de l'usine

L'option serait envisagée si aucune des options A n'aboutit. Elle a l'inconvénient de faire perdre en précision de résultats, mais répond tout de même à l'objectif de l'étude. Wessling est le laboratoire français qui propose cette éventualité, pour les raisons de coûts évoquées dans les parties 6 et 7.

➢ Option C : Reproduction des conditions de fonctionnement, et réalisation des prélèvements, mesures et analyses en laboratoire

Cette dernière option est une solution de repli si aucune des interventions sur place ne peut avoir lieu. Elle consisterait à faire un maximum de mesures lors du fonctionnement des installations à Sobery, afin de pouvoir caractériser leur fonctionnement et de pouvoir le reproduire en laboratoire. La reproduction se ferait grâce à des appareillages différents des installations réelle, ce qui ferait perdre de la pertinence aux résultats. Néanmoins, une référence de comparaison serait établie et pourrait remplir l'objectif de l'étude, sous réserve de précautions vis-à-vis de l'exhaustivité des résultats. PROVADEMSE pourrait être missionné sur l'étude, ainsi d'autres laboratoires contactés (cf. Annexe 3).

De plus, en vue du contexte réglementaire dans le pays ainsi que du manque de moyens et d'experts sur place[48], **Nitidæ n'inscrira pas ce travail dans le cadre du respect des VLE**. Il ne s'agit pas de mauvaise volonté, mais bien de réalité du terrain, puisque l'étude n'aboutirait sûrement pas aujourd'hui si les VLE devaient être respectées. Néanmoins, la synthèse bibliographique sur le sujet permettra de situer les installations étudiées par rapport à la réglementation et de sensibiliser les industriels. Enfin, ceci pourra alimenter les réflexions de tous les acteurs pour améliorer le système et ses conditions de fonctionnement.

[48] Éléments de contexte constatés dans la bibliographie et rapportés par des professionnels français.

Références

(à compiler)

Annexes

Annexe 1 : Taux de O_2 de référence

Le document A-I-1 de l'ISSeP fait notamment point sur l'importance du taux d'O_2 dans les fumées lors des mesures. Ce taux renvoie à l'« excès d'air dans la cheminée », il correspond au taux de dioxygène au point de mesure considéré et il joue le rôle de référence pour toutes les mesures de concentration de polluants. En effet, il permet la bonne mise en œuvre de l'étude en assurant la construction de résultats exploitables car basés sur la même référence. Il est important de définir le taux de O_2 dans l'environnement de mesure en choisissant une référence [$O_{2,ref}$] comme celles présentées illustration 25 et de relever le taux réel sur l'installation [$O_{2,mes}$] au cours de toutes les prises de mesures.

Installations	Taux d'O_2 de référence
Incinérateur de déchets ménagers	11 %
Cimenteries	10 %
Moteurs de CET (biogaz)	5 %
Cogénération	6 ou 11 %
Turbines à gaz	15 %

Tableau 2 : exemple de taux de référence O_2

Illustration 28: Références oxygène par l'ISSeP (A-I-1)

Si le taux réel [$O_{2,mes}$] diffère, il est alors nécessaire d'y associer un facteur de correction comme indiqué avec les exemples figurant à l'Illustration 29, afin de réaliser les calculs de concentration en polluants ramenés au taux de O_2 faisant référence [$O_{2,ref}$]. Le calcul consiste à multiplier la concentration mesurée [C_{mes}] par le facteur d'ajustement correspondant. Par exemple, si je mesure une concentration de COV totale de 0,6 mg/m³ (conformément au § 3.2.2.1) à un taux mesuré $O_{2,mes}$ de 5 % et que je choisit la référence $O_{2,ref}$ de 11 % (cogénération) alors la concentration au taux de référence faisant foi et ainsi référence pour mon étude sera $C_r = C_{mes} * 0,63$.

Valeur mesurée	Taux de référence		
	5 %	11 %	15 %
5 %	1	0.63	0.38
6 %	1.07	0.67	0.40
7 %	1.14	0.71	0.43
8 %	1.23	0.77	0.46
9 %	1.33	0.83	0.50
10 %	1.45	0.91	0.55
11 %	1.60	1	0.60
12 %	1.78	1.11	0.67
13 %	2.00	1.25	0.75
14 %	2.29	1.43	0.86
15 %	2.67	1.67	1
16 %	3.20	2.00	1.20
17 %	4.00	2.50	1.50
18 %	5.33	3.33	2.00
19 %	8.00	5.00	3.00
20 %	16.00	10.00	6.00

Tableau 3 : coefficient de correction référence O_2

Illustration 29: Correction pour les taux de O_2 par l'ISSeP (A-I-1)

Dans la situation de l'étude, le $O_{2,ref}$ pour les fumées de combustion du gaz de pyrolyse (autour de 9 % dans les gaz de pyrolyse selon le CEFREPADE49) sera à déterminer. En effet, la littérature ne donnant pas d'information à ce sujet, le $O_{2,ref}$ devra être fixé par l'équipe qui réalisera l'étude. Un moyen serait en mesurant le O_2 pour chaque campagne de mesure et de le moyenner sur le total des mesures réalisées. C'est donc un paramètre qui peut être déterminé après coup. Ensuite, le taux de conversion adapté devra être calculé à chaque fois pour obtenir la concentration au taux de référence [C_r] pour chaque mesure, comme figurant dans la relation illustration 27.

$$C_r = C_{mes} \cdot \frac{21-[O_{2,ref}]}{21-[O_{2,mes}]}$$

Avec :

C_r : concentration au taux d'oxygène de référence

C_{mes} : concentration brute mesurée

$[O_{2,ref}]$: concentration de référence en oxygène en %

$[O_{2,mes}]$: concentration mesurée en oxygène en %

Illustration 30: Formule d'ajustement de la concentration vis-à-vis du taux de O_2

NB : La référence peut aussi être prise sur le CO, voir doublé par le CO.

Le document A-I-1 traite aussi des différents types de contrôles : Autosurveillance (continue ou ponctuelle dans le cas de l'autocontrôle, menée par l'industriel) ou Mesures ponctuelles (continue ou ponctuelle, menée par un laboratoire). En outre, le document stipule la non-conformité des mesures avec la turbulence dans les conduits. Il évoque aussi l'influence de particules et vésicules, de la vitesse de l'écoulement, du découpage du plan de mesure dans la conduite et du choix de calculs de la moyenne. Pour remédier à certaines de ces considérations, la section suivante détaille les spécificités et bonnes pratiques pour le prélèvement dans les conduites notamment circulaires. Autrement, retourner au document A-I-1.

[49] Pyrolyse et torrefaction noix de cajou

Annexe 2 : Expression des résultats (Fiche A-I-1 ISSeP, § 10)

10 Expression des résultats

Selon les méthodes d'analyse, les résultats bruts obtenus sont exprimés de différentes manières dans des unités et des conditions différentes Afin d'être uniformisés entre eux suivant le type d'installation industrielle et les permis d'environnement, les résultats sont ramenés à des valeurs de références.

10.1 Conditions de pression et de température

A l'émission, on exprime les concentrations par rapport à une température de 273 K (soit 0 °C) et à pression atmosphérique (101.3 kPa soit 1013 mbar), les gaz étant supposés suivre la loi des gaz parfaits.
On rencontre dans des documents les concentrations exprimées en "Nm³" soit Normal mètre cube ou encore m³ ramené à 273 K et 101.3 kPa.
La formule ci-après permet d'effectuer les corrections en concentration :

$$C(T_r, P_r) = C(T,P) \cdot \frac{T}{P} \cdot \frac{P_r}{T_r} = C(T,P) \cdot 0.371 \cdot \frac{T}{P} \qquad \text{(Equation 1)}$$

Avec :
C : concentration massique dans les conditions précisées entre parenthèses
T_r : température de référence : 273 K (soit 0 °C)
P_r : pression de référence : 101.3 kPa (soit 1013 mbar)
T : température réelle de mesure de $C(T,P)$ en K
P : pression réelle de mesure de $C(T,P)$ en kPa

10.2 Conditions humides-sèches

Le plus souvent, en Wallonie, les permis d'environnement prévoient d'exprimer les résultats sur gaz secs. La formule suivante permet d'effectuer la conversion de concentration exprimée en conditions humides vers sèches:

$$C_S = C_H \cdot \frac{100}{100 - H} \qquad \text{(Equation 2)}$$

Avec :
C_S : concentration exprimée en conditions sèches
C_H : concentration exprimée en conditions humides
H : humidité des gaz exprimée en %

On rencontre dans des documents les concentrations exprimées en "m³sec" soit mètre cube exprimés sur gaz sec...

10.3 Conversion ppm-mg/Nm³

Les analyseurs de gaz, de par leur principe de fonctionnement, fournissent des concentrations volumiques en % ou en ppm (part par million : 10^{-6}) ou plus rarement en ppb (part par billion : 10^{-9}). D'autre part, les valeurs dans les permis d'environnement sont indiquées en concentration massique (mg, µg…) par unité de volume (le plus souvent m³).
La conversion entre les valeurs en ppm et en mg/Nm³ est réalisée au moyen de la formule suivante :

$$\begin{aligned} C_m &= C_v \cdot \frac{M}{V} \\ &= C_v \cdot \frac{M}{22.4} \end{aligned} \qquad \text{(Equation 3)}$$

Avec :
C_m : concentration massique en mg/Nm³
C_v : concentration en volume (ppm)
M : masse molaire de l'analyte
V : volume molaire dans les conditions normales (22.4 l)

Le tableau suivant reprend le coefficient de conversion ppm↔mg/Nm³ de quelques composés.

Gaz	Coefficient
CO	1.250
SO_2	2.858
NO	1.339
NO_2	2.058
NOx (exprimé en NO_2)	2.058
HCl	1.626
C_xH_y (exprimé en C) Étalon C_3H_8	1.608
C_xH_y (exprimé en C) Étalon CH_4	0.536

Tableau 1 : coefficient ppm↔mg/Nm³sec

Original 2016

Annexe 3 : Liste des laboratoires contactés

Tableau 6: Liste des laboratoires français contactés

N°	LABORATOIRES en France	À contacter par
1	EEDEMS	Mail
2	Floralis (Ecometrix)	Mail
3a et b	APAVE (FR) APAVE (International)	Mail
4	EUROFINS	Mail
5a et b	Laboratoire de l'INSA Rouen	Mail
6	Groupe CARSO	Mail
7	CERECO	Site Web
8	IANESCO	Mail
9	WESSLING	Mail
10	TERA Environnement	Mail
11	MICROPOLLUANTS TECHNOLOGIE S.A.	Mail
12	ANECO	Mail
13	COELYS	Mail
14	MANUMESURE	Site Web
15	QUALAB	Site Web
16	IRH Ingénieur conseil	Site Web
17	Bureau Veritas	Site Web
18	CME Environnement	Site Web
19	INERIS	Site Web
20	MAPE Groupe	Mail

Tableau 7: Liste des laboratoires ivoiriens contactés

N°	LABORATOIRES en Côte d'Ivoire	À contacter par
1	APAVE CI	Mail
2	NALCO (ECOLAB)	Mail
3	ECKOLAB West Africa	Mail
4	ENVAL	Mail
5a	SGS CI	Site Web
5b	SGS CI	Site Web
6	SOCOTEC Africa	Mail

NB : les contacts pour ces laboratoires sont disponibles ici.