

Développement d'une méthodologie DTS pour l'optimisation fonctionnelle des dispositifs d'incinération de déchets industriels





ETUDE N° 97-0216/2A

**DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE DTS POUR
L'OPTIMISATION FONCTIONNELLE DES DISPOSITIFS
D'INCINERATION DE DECHETS INDUSTRIELS**

RAPPORT FINAL

janvier 1999

G. ANTONINI - Nom du Laboratoire / Organisme

Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Développement d'une méthodologie DTS pour l'optimisation fonctionnelle des dispositifs d'incinération de déchets industriels, 1999, 74 p, n°97-0216/2A.
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 1999

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	4
2. RAPPEL DE LA METHODOLOGIE DE QUALIFICATION D'UNE ENCEINTE THERMIQUE	6
2.1 Préambule	6
2.2 Cinétique de destruction - Taux de conversion - DRE	7
2.3 Procédure de détermination de la température moyenne LAGRANGIENNE	8
2.4 Procédure de détermination de la teneur en oxygène moyenne LAGRANGIENNE	
3. MATERIELS ET METHODE	10
3.1 Le spectromètre de masse	10
3.2 L'unité pilote d'incinération par foyer cyclone	13
3.2.1 Le four d'incinération et ses utilitaires	13
3.2.2 L'instrumentation de l'unité d'incinération	16
3.3 L'unité d'incinération de Procedis	18
3.3.1 Composition des équipements de l'unité	18
3.3.2 Mode de fonctionnement général de l'installation	19
3.4 Implantation des équipements pour la caractérisation de l'enceinte thermique	23
3.4.1 Schéma d'implantation général	23
3.4.2 Systèmes d'injection	24
3.4.3 Systèmes de prélèvement/détection	25
3.5 Caractéristiques des gaz traceurs	26
3.5.1 L'Hexafluorure de soufre : SF ₆	26
3.5.2 L'Hélium	27
3.5.3 Le chlorure de méthyle ou chlorométhane	27
4. PROCEDURE OPERATOIRE	28
4.1 Préparation des appareillages	28
4.2 Etude avec le gaz traceur Hélium	28
4.3 Etude avec les gaz SF ₆ et CH ₃ Cl	29
5. PROCEDURE DE TRAITEMENT DES DONNEES	30
5.1 Caractéristiques du gaz naturel	30
5.2 Recueil des données	30
5.3 Etablissement d'un bilan matière/énergie du four	31
5.4 Détermination du temps de passage	32

5.5	Traitement des données avec l'Hélium	33
5.6	Traitement des données avec le SF₆	35
5.7	Traitement des données avec le CH₃Cl	36
6. RESULTATS EXPERIMENTAUX		37
6.1	Etude sur l'unité pilote d'incinération par foyer cyclone	37
6.1.1	Etude avec l'hélium	37
6.1.2	Influence de la température sur l'hydrodynamique	49
6.1.3	Etude avec le SF ₆	53
6.1.4	Etude avec le CH ₃ Cl	57
6.1.5	Essais d'incinération de mousse	59
6.2	Etude sur l'unité d'incinération PROCEDIS	62
6.2.1	Caractérisation de l'hydrodynamique du four tournant et postcombustion	62
6.2.2	Détermination de la température Lagrangienne du four et du postcombustion	65
6.2.3	Détermination du taux de conversion de CH ₃ Cl et du taux d'oxygène	67
7. CONCLUSIONS		68
8. ANNEXES		70

1. INTRODUCTION

L'association RECORD a confié à la DGTE (UTC - Compiègne) un contrat de recherche (n° 96-216/2A) pour le développement d'une méthodologie DTS pour l'optimisation fonctionnelle des dispositifs d'incinération de déchets industriels.

La première année de recherche avait permis de faire un inventaire précis des différentes techniques disponibles, et après prise en compte des contraintes liées aux unités d'incinération de déchets industriels de sélectionner une méthode basée sur l'utilisation d'un gaz traceur, détectable par spectromètre de masse. Cette méthode avait été mise au point sur une maquette froide et un logiciel d'acquisition et de traitement de données avait été également développé.

En considérant la réglementation qui impose aux industriels la présence d'une étape de post-combustion en sortie de four, avec des contraintes de température (supérieure à 850°C) de temps de passage (supérieur à 2 s) et de turbulence et taux d'oxygène (supérieur à 6%) pour s'assurer d'une combustion complète des gaz issus du four, l'UTC a proposé une nouvelle méthodologie de qualification d'enceintes thermiques, en complément aux mesures macroscopiques qui ne prennent pas en compte l'hydrodynamique interne des enceintes créant des zones stagnantes, des gradients thermiques, ..

La méthode de DTS initiale basée sur l'utilisation d'un seul gaz a été étendue à l'utilisation de 2 autres gaz pour caractériser une température et une teneur en oxygène moyennes Lagrangiennes en prenant en compte l'hydrodynamique interne de l'enceinte thermique étudiée.

Les objectifs de la seconde année de recherche concernaient :

- la validation définitive de la mesure de DTS sur une unité pilote d'incinération située à Compiègne
- la validation de la méthodologie globale utilisant 2 autres gaz pour déterminer une température et une teneur moyenne en oxygène Lagrangiennes
- la modification du logiciel pour intégrer les autres gaz
- la validation de l'ensemble sur une unité industrielle d'incinération (Rhône Poulenc ou autres) et la qualification de l'enceinte thermique avec les critères proposés.

Dans le présent rapport, nous présentons une nouvelle série d'essais conduits avec les gaz traceurs, hélium, SF₆ et CH₃Cl, sur l'unité pilote d'incinération à foyer cyclone située dans la halle de recherche de l'UTC. Ces essais ont été réalisés avec un nouveau spectromètre de masse avec de meilleures performances notamment au niveau sensibilité et constance dans le temps de cette sensibilité.

Compte tenu de la grande sensibilité du nouvel équipement, nous avons pu également valider un autre principe de détermination de la DTS par injection Dirac

ce qui permet de réduire les volumes de gaz traceurs injectés mais aussi de réduire les étapes de traitement des données et donc d'augmenter la précision.

Finalement, la validation globale de la méthodologie devait se faire sur un site industriel. Le site de Rhône Poulenc avait été retenu pour cette dernière phase. Suite à différents problèmes d'exploitation survenus au dernier moment, l'arrêt sur l'incinérateur a été réduit à son strict minimum, et aucune modification sur le four n'a pu être engagée pour permettre notre intervention. Les essais de validation ont été annulés et nous avons dû trouver en urgence un nouveau site de substitution. Ces essais ont été finalement menés sur l'unité semi-industrielle de PROCEDIS à Verneuil en Halatte.

Finalement, nous présentons en conclusion le bilan de cette étude et les principaux enseignements à tirer de l'ensemble de nos travaux.

2. RAPPEL DE LA METHODOLOGIE DE QUALIFICATION D'UNE ENCEINTE THERMIQUE

2.1 - PREAMBULE

La réglementation actuelle impose au niveau des enceintes thermiques et plus particulièrement des post-combustions, un temps de passage minimal de 2s, une température minimale de 850°C et une teneur en oxygène dans les fumées d'au moins 6% (exemple arrêtés 25/01/91 ou 16/10/96).

Ces valeurs imposées à l'industriel sont des valeurs macroscopiques qui ne prennent pas en compte ni les hétérogénéités liés aux écoulements réels ni la forme des enceintes, qui conduisent :

- à des variations des temps de passage pour chaque molécule gazeuse entrant dans l'enceinte liées à l'hydrodynamique des écoulements dans un réacteur
- à des gradients de température inévitables entre la zone d'injection du déchet, les parois de l'enceinte thermique et la sortie des gaz de réaction, ...
- à des zones de mauvais mélange liées au mode d'injection du déchet et du comburant mais également à la géométrie interne de l'enceinte.

La nouvelle méthodologie proposée par l'UTC dans le cadre du contrat RECORD n° 96-216/2A, repose sur l'utilisation de 3 gaz.

- un gaz traceur de type hélium pour définir précisément la distribution des temps de séjour des molécules gazeuses séjournant dans une enceinte, en remplacement du critère temps de passage de 2s.
- un gaz de type SF₆ peu sensible à la teneur en oxygène dans les fumées et dont la cinétique de décomposition dépend de la température. L'analyse du taux de conversion de cette espèce gazeuse entre l'entrée et la sortie de l'enceinte thermique nous permet de définir une température moyenne Lagrangienne de l'enceinte (température effective subie par les molécules au cours de leur mouvement dans l'enceinte) en remplacement du critère de température à 850°C.
- un gaz de type CH₃Cl dont la cinétique de décomposition dépend fortement de la teneur en oxygène dans les fumées. L'analyse du taux de conversion de cette espèce gazeuse entre l'entrée et la sortie nous permet de définir une teneur en oxygène moyenne Lagrangienne de l'enceinte (teneur en oxygène subie par les molécules au cours de leur mouvement dans l'enceinte) en remplacement du critère turbulence à 6% d'oxygène.

2.2 - CINÉTIQUE DE DESTRUCTION - TAUX DE CONVERSION - DRE

Nous rappelons ci-après les expressions déjà présentées dans le précédent rapport, appliquées à la détermination de la DTS, de la température moyenne Lagrangienne et de teneur moyenne en oxygène Lagrangienne.

La réaction globale généralement admise pour la destruction de composés organiques est du premier ordre et peut se présenter sous la forme suivante :

$$-\frac{d[F]}{dt} = k[F]$$

Avec :

k : constante cinétique

[F] : concentration de l'espèce à détruire

La dépendance avec la température se trouve dans la constante cinétique qui peut s'exprimer à l'aide de la relation d'Arrhénius, soit :

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}}$$

avec :

E : énergie d'activation

T : température

R : constante des gaz parfaits

A : constante de vitesse de la réaction

Afin de suivre, la décomposition d'une molécule, on peut utiliser son taux de conversion χ ou l'efficacité de destruction (DRE : Destruction Removal Efficiency) :

$$\chi = 1 - f = 1 - \frac{[F]}{[F_0]}$$

$$DRE = 100 \left(1 - \frac{[F]}{[F_0]} \right)$$

A partir de la connaissance de la distribution des temps de séjour dans une enceinte thermique, on peut connaissant la cinétique de destruction d'une molécule donnée, déterminer le taux de conversion global :

$$\chi = 1 - \int_0^{\infty} E(t)e^{-kt} dt$$

avec :

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}}$$

Ces deux équations mettent parfaitement en évidence :

- la dépendance avec la durée de traitement et plus particulièrement la répartition des temps de séjour dans l'enceinte réactive;
- la dépendance avec la température.

2.3 - PROCEDURE DE DETERMINATION DE LA TEMPERATURE MOYENNE LAGRANGIENNE

A l'aide des expressions précédentes, nous proposons de suivre la destruction thermique d'une espèce peu sensible à la teneur en oxygène, soit le SF₆. A partir de la distribution de temps de séjour du four et du taux de destruction du SF₆, mesuré dans les mêmes conditions opératoires, nous pouvons définir une température moyenne lagrangienne de l'enceinte qui conduirait à la même efficacité de destruction. Cette température T_m doit vérifier l'équation suivante :

$$\chi_{1\text{exp}} = \chi_{1\text{th}} = 1 - \int_0^{\infty} E_{\text{exp}}(t)e^{-k_1 t} dt$$

et

$$k_1 = k'_1 e^{-\frac{E_1}{RT_m}}$$

avec :

k'₁ et E₁ : constantes cinétiques de l'espèce concernée issues de la littérature, soit pour le SF₆, k'₁ = 3,64 10⁺¹⁰ et E₁ = 56,8 kcal/mole

T_m : température moyenne lagrangienne de l'enceinte

2.4 PROCEDURE DE DETERMINATION DE LA TENEUR EN OXYGENE MOYENNE LAGRANGIENNE

La troisième étape de l'approche de qualification d'un enceinte thermique, concerne la détermination de la teneur en oxygène moyenne dans le four. La problématique consiste ici, à injecter dans le four une molécule dont la cinétique de destruction dépend à la fois de la température et de la teneur en oxygène, soit par exemple le chlorure de méthyle CH_3Cl . A partir de la connaissance de la distribution de temps de séjour dans l'enceinte, de la température moyenne lagrangienne de l'enceinte, en mesurant le taux de destruction de la molécule choisie, dans les mêmes conditions opératoires, on recherche la teneur en oxygène moyenne lagrangienne qui vérifie l'égalité suivante :

$$\chi_{2\text{exp}} = \chi_{2\text{th}} = 1 - \int_0^{\infty} E_{\text{exp}}(t) e^{-k_2 t} dt$$

et

$$k_2 = k'_2 [O_{2,m}]^a e^{-\frac{E_2}{RT_m}}$$

avec :

k'_2 , E_2 , a : constantes cinétiques pour l'espèce concernée issues de la littérature, soit pour CH_3Cl , $k'_2 = 1,12 \cdot 10^8$ $E_2 = 39\,500$ cal/mole et $a = 1$

$[O_{2,m}]$: teneur en oxygène moyenne lagrangienne dans l'enceinte thermique

3. MATERIELS ET METHODE

Dans ce chapitre, nous rappelons les différents matériels que nous avons utilisés dans le cadre de ce projet, soit :

- le spectromètre de masse utilisé pour l'analyse en temps réel de la concentration de gaz dans les fumées;
- les dispositifs pour réaliser une DTS constitués de la ligne d'injection et la ligne de prélèvement/détection;
- l'unité pilote d'incinération utilisée pour les essais;
- l'unité d'incinération pour la validation de la méthodologie.

Nous rappelons ensuite le protocole opératoire utilisé pour les différents essais sur four.

3.1 - LE SPECTROMETRE DE MASSE

Pour la mesure des gaz en sortie de l'enceinte, nous utilisons un spectromètre de masse qui permet de réaliser en temps réel la mesure simultanée de différentes espèces gazeuses.

Les différents essais présentés dans les rapports précédents avait été effectués par un spectromètre de masse quadripôle de la société VG instrument. Le matériel qui nous avait été prêté pour l'étude s'est dégradé avec le temps. En effet, ce dernier a perdu en sensibilité, en temps de réponse et également en qualité du signal (bruit de fond élevé). Par ailleurs, avec ce type d'appareil et le logiciel couplé, une étude quantitative n'est pas possible.

Nous avons donc décidé de nous procurer un nouvel équipement plus récent, qui a été utilisé pour les différents essais que nous présentons ci-après. Après une consultation des différents fournisseurs potentiels, avec les critères de sélection présentés ci-dessous, nous avons retenu le spectromètre de masse QMS 300 de la société PFEIFFER-BALZERS INSTRUMENT.

Les critères de sélection du spectromètre de masse étaient :

- la compacité pour faciliter des intervention sur site
- la sensibilité
- la possibilité de traitement quantitatif
- un logiciel de contrôle/commande le plus convivial possible

- le service après vente
- le coût

Les caractéristiques technique du matériel retenu sont :

- type Thermostar QMS 300 M
- société Pfeiffer
- gamme de masse : 1 à 300 uma;
- filtre quadripolaire;
- source d'ion radiale;
- double détection Faraday et multiplicateur d'électrons;
- groupe de pompage turbomoléculaire constitué d'une pompe turbomoléculaire et d'une pompe à membranes, résistantes aux gaz acides;
- pression partielle minimale détectable : 10^{-14} mbars
- limite de détection pour quelques espèces gazeuses :
 - He = 1 ppm
 - CH₄ = 5 ppm
 - O₂ = 2 ppm
 - SF₆ = 1 ppm
 - CH₃Cl = 1 ppm
- masse de l'équipement : 47 kg

Le capillaire de prélèvement :

Le prélèvement de gaz est fait en continu, par l'intermédiaire d'un capillaire de prélèvement. Ce capillaire, d'une longueur de 1 m, est constitué d'une superposition de deux capillaires l'un dans l'autre. Le capillaire extérieur est en acier inoxydable d'un diamètre intérieur de 2 mm. Le capillaire intérieur est en silice fondue d'un diamètre intérieur de 175 µm. Le tout est inséré dans une gaine permettant éventuellement de chauffer le capillaire jusqu'à 200°C au maximum. Le temps de passage dans le capillaire est de 100 ms comme celui dans le spectromètre.

Le logiciel QUADSTAR 421

Les principales spécificités du spectromètre de masse, sont :

- fonctionnement sous Windows
- modes de visualisation : analogique (normale ou en 3 D), bargraphe
- mode MID (Monitoring Ions Detection), 65 canaux de mesures sur des ions sélectionnés en gain fixe ou autorange (calibration automatique), suivi de plusieurs gaz multiplexés
- possibilités de transformation de fichiers sous mode ASCII
- acquisition d'un signal externe pression ou température en corrélation avec le suivi

Pour les essais, nous suivons la variation de concentration de chaque gaz injecté en fonction du temps.

Principe d'utilisation du spectromètre de masse pour la méthodologie

Utilisation de l'hélium :

Pour l'hélium, compte tenu de la grande sensibilité du nouveau spectromètre de masse, nous avons utilisé les 2 principes suivants pour obtenir une DTS.

Procédure purge échelon : nous recherchons tout d'abord une concentration constante en fonction du temps (ce qui permet d'ajuster le débit d'hélium en entrée pour obtenir un signal stable peu bruité en sortie, en fonction de la sensibilité de détection du spectromètre de masse). Une fois le signal stable, on arrête l'injection d'hélium et on suit la décroissance de la courbe de concentration de l'hélium en sortie. Pour la mesure de DTS, on ne s'intéresse qu'aux variations relatives de la concentration. La valeur absolue n'est utile que pour une vérification des bilans matières.

Procédure injection Dirac : nous injectons pendant un temps le plus court possible un volume d'hélium dans le four, et on suit la variation de concentration en fonction du temps.

Notons dès maintenant que la première méthode permet un réglage des seuils de détection avant la mesure, tandis que la seconde méthode permet de réduire les quantités de gaz injectés, avec cependant la contrainte d'une injection très rapide.

Utilisation de SF₆ et CH₃Cl

Pour le SF₆, comme pour le CH₃Cl, la procédure est plus simple, on ne s'intéresse qu'à la concentration finale de SF₆ ou de CH₃Cl dans les fumées, et par conséquent on ne recherche que la stabilité du signal en sortie de four. Cependant, ici, la valeur absolue est importante car couplé au débit réel de fumées, elle permet la détermination du taux de conversion du SF₆ ou CH₃Cl.

3.2 UNITE PILOTE D'INCINERATION PAR FOYER CYCLONE

Pour la mise au point de la méthode proposée, nous disposons d'une unité pilote d'incinération à l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), d'un dispositif d'injection et de détection du gaz traceur.

Cette unité a déjà été présentée dans le précédent rapport, nous ne rapportons ci-après que les caractéristiques du four que nous avons utilisé pour les différents essais présentés par la suite.

Cette unité d'incinération a été conçue initialement pour fonctionner à l'oxygène pur afin de traiter des effluents ou déchets de bas PCI et de minimiser le volume spécifique des fumées (Nm³/tonne de déchet) entraînant à la fois une réduction du coût des installations mais également de la taille des unités.

3.2.1 Le four d'incinération et ses utilitaires

Le module d'incinération est constitué :

- du foyer cyclone vertical avec des ouvertures pour les différentes cannes d'introduction,
- d'une section droite en sortie,
- du brûleur de préchauffage à l'air,
- d'une alimentation en oxygène,
- d'une instrumentation.

3.2.1.1 Le foyer cyclone d'incinération

Le foyer cyclone vertical de volume total intérieur 0,31 m³ est composé de deux chambres (figure 1), une partie haute pour la combustion suivi d'un restreint et d'une chambre de détente en partie basse destinée à séparer les particules solides, avec départ latéral des fumées vers les dispositifs de traitement aval.

Caractéristiques géométriques :

Les caractéristiques géométriques de ce four sont :

Dimensions externes :

- hauteur totale : 3,15 m
- hauteur four : 2,15 m
- diamètre four : 1,15 m
- volume four : 2,23 m³

Dimensions internes

Le foyer cyclone est divisé en 2 chambres, d'un volume total de 310 litres.

Par ailleurs, le four dispose des piquages suivants:

- 1 entrée dans l'axe vertical muni d'un ouvré pour le brûleur de préchauffage (D=200 mm) ;
- 2 entrées orthoradiales (piquage D=100 mm) dans la partie haute pour le brûleur oxy-mousse et un hublot de visualisation ;
- 1 sortie (D=125 mm) dans la chambre inférieure pour l'évacuation des fumées ;
- 1 sortie (D=370 mm) pour l'évacuation des cendres récupérées dans un cendrier muni de 2 regards de visualisation ;
- 6 piquages (D=10 mm) le long du foyer pour des mesures de température et de pression.

Caractéristiques thermiques :

Les réfractaires du foyer cyclone permettent d'atteindre les températures suivantes

- température partie supérieure : 1850°C
- température ouvrés : > 1850°C
- température partie inférieure : 1600°C.

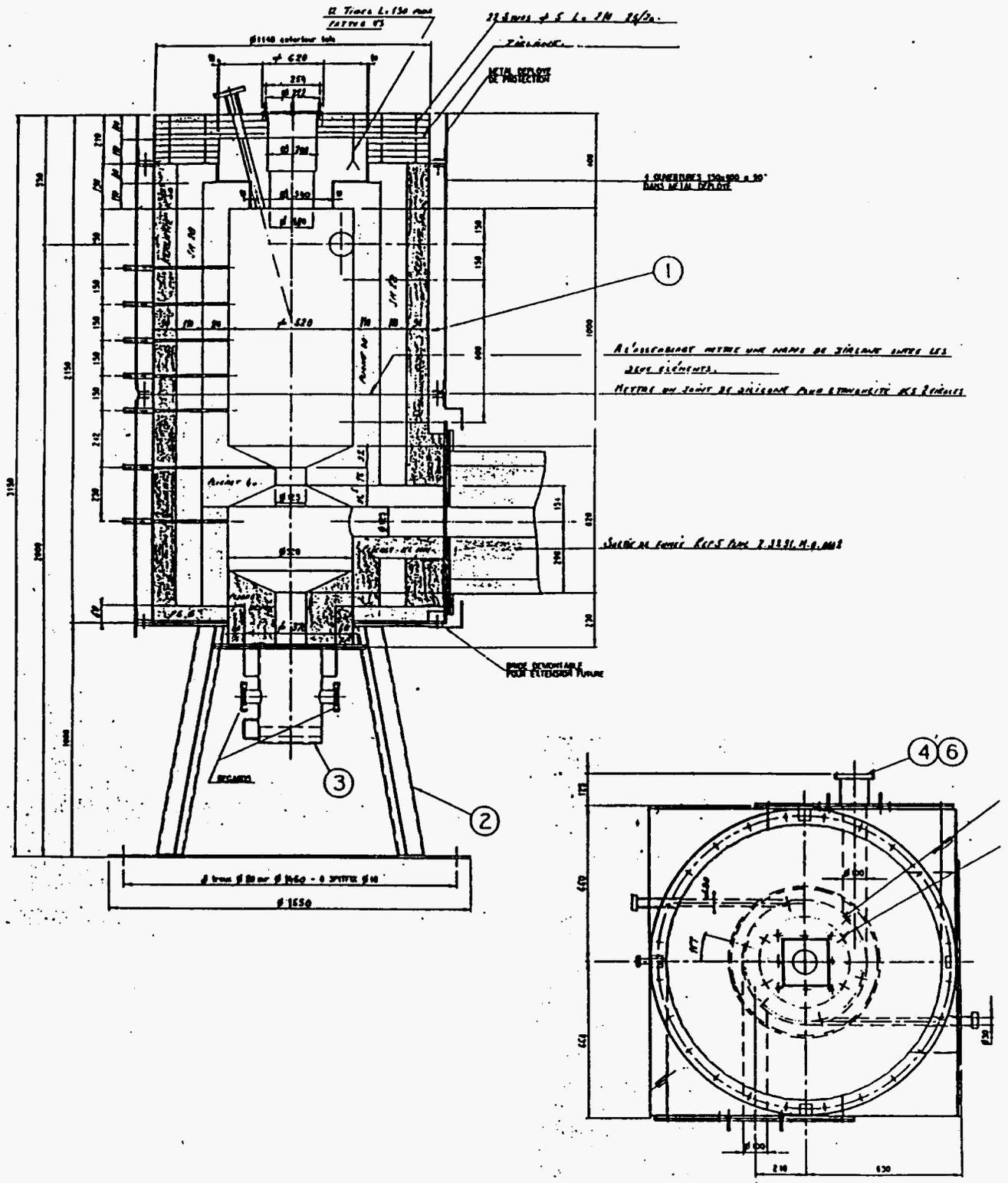


FIGURE 1 : Schéma du four d'incinération

Remarque :

La section droite en sortie de four permet de respecter les longueurs d'entrée et de sortie pour la mesure de vitesse par sonde de pitot, ainsi que pour les prélèvements de gaz que nous ferons pour l'analyse au spectromètre de masse.

Les caractéristiques générales de cette section droite sont

- longueur : 800 mm
- diamètre externe : 600 mm
- épaisseur des réfractaires : 237,5 mm

3.2.1.2 Le brûleur de préchauffage et ses accessoires

Le brûleur de préchauffage situé dans l'axe vertical du foyer cyclone sur le dessus doit assurer une mise en température progressive des différents réfractaires du four avant le démarrage de l'incinération.

Les caractéristiques principales du brûleur sont les suivantes :

- brûleur à mélange au nez permettant d'assurer une flamme courte
- réfractaire : 1750°C
- gaz naturel (PCI = 10 kWh/Nm³) pression : 300 mb
- puissance: 120 kW
- débit gaz : 12 Nm³/h
- débit air: 120 NM³/h

Le brûleur est muni d'une électrode d'allumage DSE1 relié à un transformateur 220V.

3.2.2 - L'instrumentation de l'unité d'incinération

On détaille l'instrumentation couplée à l'unité d'incinération que nous avons utilisée pour l'ensemble des essais et les traitements liés.

- mesures de températures (voir figure 2) :
 - sur les fumées en sortie de four
 - dans le réfractaire sur la hauteur du four
- mesure de pression
 - asservie à la vitesse de rotation du ventilateur/extracteur pour maintenir une dépression constante

- mesure de vitesse par tube de pitot couplé à tube incliné avec eau en sortie de four
- mesure de la composition des fumées en sortie de four
- mesure de la concentration en hélium, SF₆ et CH₃Cl par spectromètre de masse en sortie de four
- mesure de débit de gaz naturel par compteur volumétrique

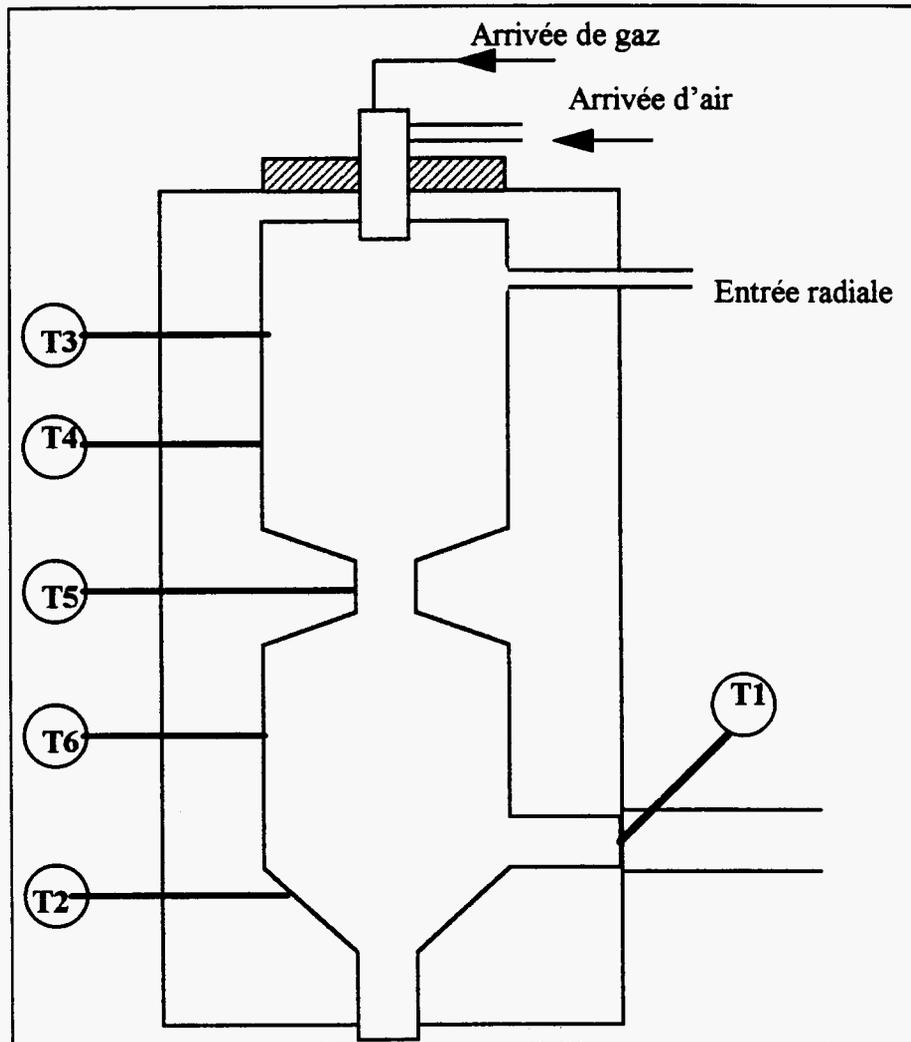


FIGURE 2 : Positionnement des thermocouples dans le four cyclone

3.3 L'UNITE D'INCINERATION DE PROCEDIS

Les essais de validation de la méthodologie développée ont été validés sur l'unité d'incinération de PROCEDIS à Verneuil en Halatte.

Cette unité fait partie de la plate-forme d'expérimentation de traitement de déchets PROCEDIS (Groupement d'Intérêt Economique crée entre l'INERIS et l'UTC). Cette plate-forme, à la disposition des industriels, centres techniques, équipementiers, communautés urbaines, ... dispose d'un ensemble de pilotes à échelle pré-industrielle et a pour objectif de définir et valider le traitement approprié pour un déchet donné.

Cette unité d'incinération dont les caractéristiques sont rappelées ci-après comporte les différents éléments constitutifs d'une chaîne d'incinération classique, soit un module de préparation du déchet, un module de combustion/post-combustion, un module de refroidissement de fumées par utilisation d'une chaudière et finalement un module de traitement de fumées comportant une filtration, quench, tour de lavage et réchauffeur de fumées avant rejet en cheminée.

3.3.1 - Composition des équipements de l'unité

L'ensemble des équipements est dimensionné pour traiter un débit nominal de déchets de 100 kg/h ayant un PCI de 4 000 kcal/kg. Il peut accepter des déchets se présentant sous forme solide (après concassage et broyage), liquide ou pâteuse.

L'équipement se décompose en 6 parties présentées sur les figure 3 et 4.

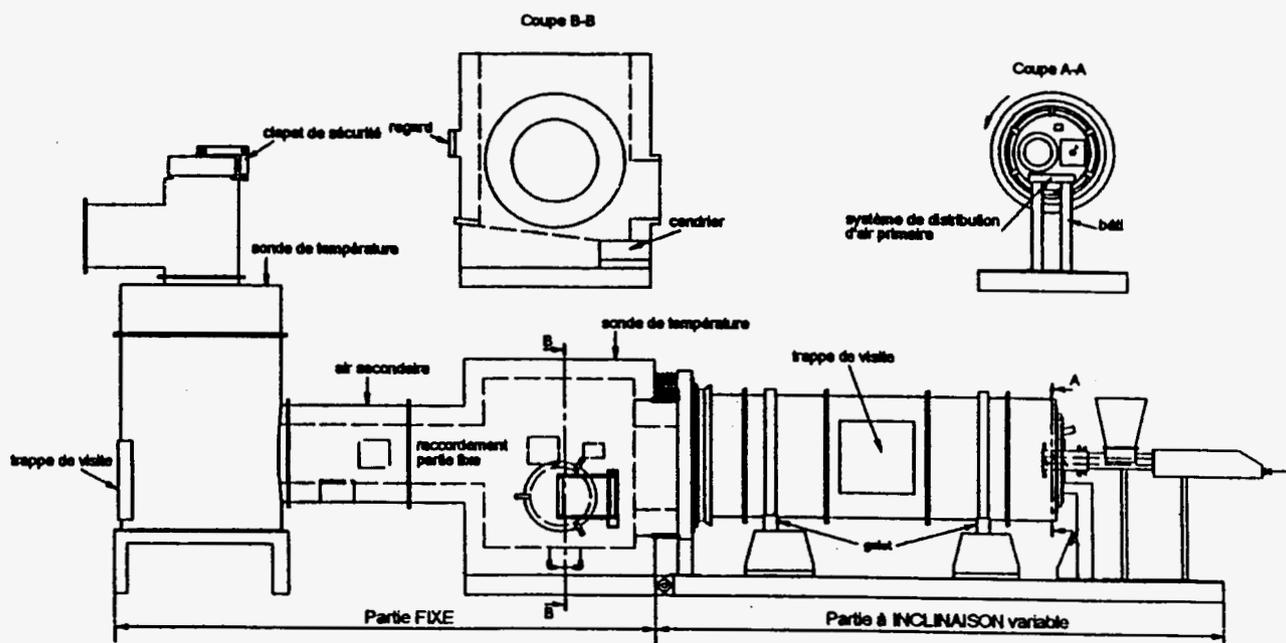


FIGURE 3 : Schéma de l'unité de traitement de déchet de l'injection des déchets à la post-combustion

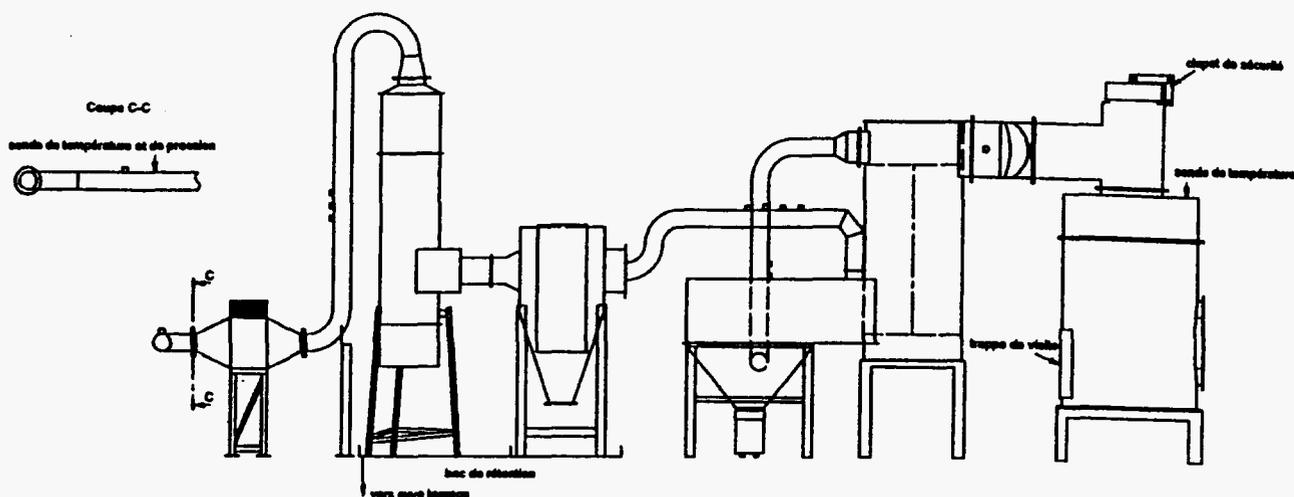


FIGURE 4 : Schéma de l'unité de traitement de fumées de la post-combustion au réchauffeur de fumées

3.3.2 Mode de fonctionnement général de l'installation

3.3.2.1 Dispositif d'alimentation

Le four rotatif repose sur un châssis inclinable de 0 à 3°, permet de fonctionner en continu avec une alimentation des déchets par la façade avant.

Les déchets solides, après conditionnement, sont introduits en tête de four par l'intermédiaire d'une vis sans fin refroidie par eau perdue et à vitesse variable.

Les déchets liquides, stockés dans des cuves agitées, sont pulvérisés dans le four par une canne d'injection.

L'alimentation en air de combustion est assurée par un ventilateur.

3.3.2.2 Combustion et post-combustion

La combustion s'effectue en deux étapes. Les déchets sont incinérés dans un foyer rotatif et les gaz de combustion sont ensuite traités dans une chambre de post-combustion selon la réglementation en vigueur.

Le four rotatif a un diamètre intérieur de 880 mm et une longueur intérieure de 4015 mm. La combustion dans le foyer rotatif s'effectue à co-courant. En sortie du four rotatif, un dispositif étanche de décendrage permet le prélèvement de mâchefers et

cendres sans perturber le régime du four. Le volume du four et de sa partie cendrier est de 5,6 m³.

Le préchauffage de la cellule rotative est assuré par un brûleur fonctionnant au gaz naturel. Celui-ci permet également, lors de l'incinération de déchets à faible PCI, de fournir la puissance d'appoint nécessaire pour garantir une température suffisante dans le four. La chambre de post-combustion dispose également d'un brûleur de préchauffage et d'appoint. Le volume de la post-combustion est de 3 m³.

Compte tenu de l'aspect expérimental de l'installation, le four a été conçu de façon à permettre:

- la combustion en excès d'air : combustion directe,
- la combustion en défaut d'air : combustion pyrolytique,
- le fonctionnement en continu ou en batch,
- la variation du niveau de température de 600 à 800°C dans le four,
- la variation du niveau de température de 700 à 1200°C dans la post-combustion,
- la variation du temps de séjour des solides de 30 à 90 minutes.

Le contrôle de la combustion est assuré par le réglage des débits d'air et de déchet.

La post-combustion est dimensionnée pour respecter les conditions d'incinération des gaz de combustion imposées par la législation. Le volume de la chambre de 3 m³ permet de respecter les 2 secondes réglementaires pour le temps de séjour des fumées.

Le niveau de température est assuré par le brûleur de soutien. Il est de 850°C pour les déchets banals et de 1100°C pour les déchets industriels spéciaux.

Le taux d'oxygène (minimum 6% d'O₂), contrôlé en continu, régule le débit d'air secondaire injecté dans la chambre de post-combustion.

La chambre de post-combustion est équipée, dans sa partie haute, d'un clapet de sécurité auto-équilibré et d'une cheminée d'évacuation permettant le by-pass direct à l'atmosphère des gaz de combustion.

3.3.2.3 Refroidissement des fumées et récupération de chaleur

En sortie de la chambre de post-combustion, les fumées sont refroidies dans une chaudière de récupération de chaleur. La technologie retenue est une chaudière verticale à tubes de fumées et à double parcours.

Les fumées entrent et sortent en partie haute des faces latérales de la chaudière. Les tubes de fumées sont facilement accessibles par le cendrier situé en partie basse. Les cendres sous chaudière peuvent être ainsi collectées par simple ringardage.

La chaudière a été dimensionnée pour traiter un débit de fumées de 1500 Nm³/h de 1000°C à 200°C (pointes tolérées à 1100°C). Une pulvérisation d'eau a été installée, en réserve, à l'entrée de la chaudière.

La chaleur récupérée par l'eau est ensuite dissipée à l'atmosphère à l'aide d'un aérocondenseur. Le circuit eau fonctionne ainsi en boucle fermée.

3.3.2.4 Traitement des fumées et extraction

Le but du traitement des fumées est de rejeter des effluents gazeux répondant aux normes actuellement en vigueur. Il a également été conçu pour tester les différents équipements existants pour le traitement des fumées.

Celui-ci se décompose en 3 parties :

- un filtre à manches,
- un quench,
- une tour à garnissage.

Le filtre à manches capte les poussières présentes dans les fumées. Les manches du filtre sont en RYTON et acceptent une température de service de 200°C (pointes autorisées à 250°C).

Le filtre est séquentiellement décolmaté par une insufflation d'air comprimé sous pression et les poussières sous filtre sont facilement récupérables en partie basse du caisson.

Après filtration, les fumées sont ensuite neutralisées et lavées. La première étape de ce traitement consiste à pulvériser de l'eau afin de saturer les gaz. Le quench, dans lequel est effectué cette étape, sert également d'étage acide dans le processus de lavage des fumées. Le lavage acide résulte en effet des phénomènes d'absorption physique utilisant les propriétés de solubilité des gaz dans les liquides. Ainsi, la majeure partie du HCl, du HF et des métaux lourds sont absorbés au niveau du quench.

Les fumées en sortie quench, saturées en eau et ayant une température inférieure à 60°C, subissent alors un lavage basique dans une tour à garnissage.

Ce deuxième étage du processus de lavage résulte des phénomènes d'absorption chimique utilisant les réactions acido-basiques. L'objet de ce lavage est d'éliminer le SO₂ en le faisant réagir avec une base forte (NaOH) pour former du Na₂SO₄.

Afin de limiter la production de rejets liquides, les deux étages du système de lavage fonctionnent au maximum en boucle fermée. A la fin de l'essai, les effluents, générés par le traitement, sont stockés avant d'être pré-traités sur le site.

D'autre part, pour limiter les phénomènes de condensation dans la cheminée et réduire le panache, un réchauffeur d'air a été installé en sortie de la tour à garnissage.

L'extraction des fumées et le maintien de l'installation en dépression sont assurés par un ventilateur. Son débit est piloté à partir de la mesure de la dépression au niveau du four rotatif.

3.3.2.5 Analyse des gaz de combustion

Contenu de son caractère expérimental, l'installation est équipée d'un système d'analyse des gaz (O₂, CO, CO₂, SO₂, NO_x, HCl et poussières). L'analyse des gaz de combustion est effectuée en sortie de chaudière après refroidissement des gaz.

3.3.2.6 Instrumentation - Contrôle commande

Le descriptif de l'instrumentation et du contrôle - commande est présenté en annexe 1.

3.4 IMPLANTATION DES EQUIPEMENTS POUR LA CARACTERISATION DE L'ENCEINTE THERMIQUE

3.4.1 Schéma d'implantation général

Nous présentons sur la figure 5, un schéma de principe de l'implantation des différents équipements nécessaire pour la caractérisation de l'enceinte thermique.

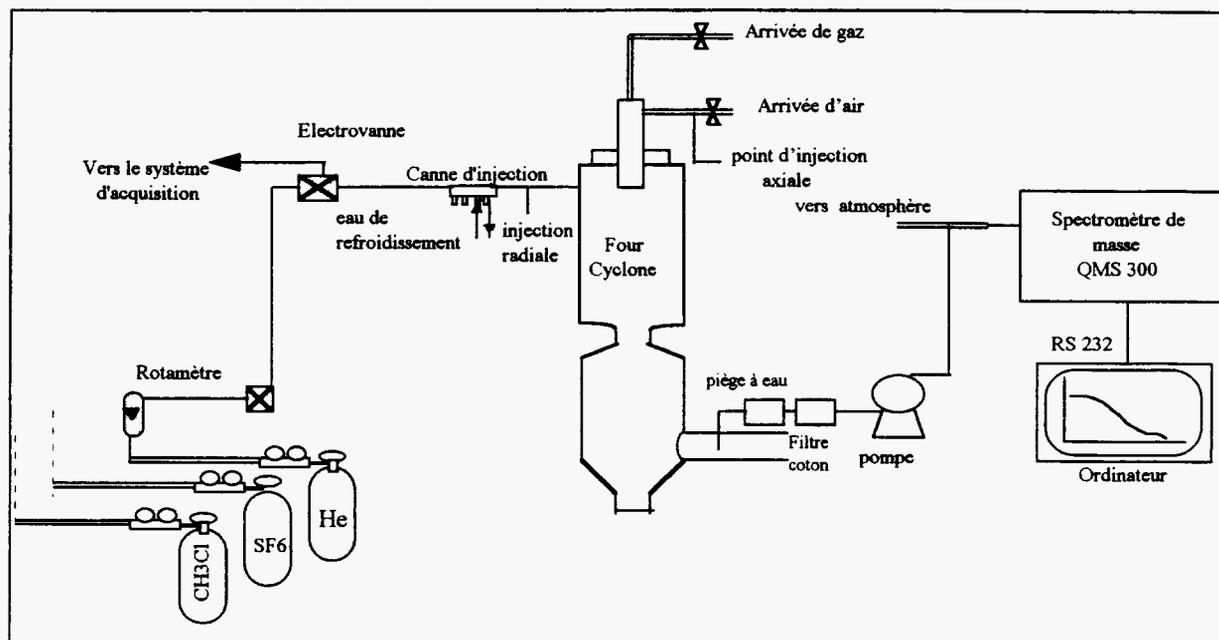


Figure 5 : Dispositif expérimental de l'unité pilote d'incinération

Nous avons positionné sur la figure les 2 endroits où les injections des gaz ont été réalisées (injection radiale et axiale).

3.4.2 Systèmes d'injection

Le principe du système d'injection des gaz traceurs présenté en figure 6 comprend :

Injection Hélium : Le système d'injection est constitué d'une bouteille d'hélium d'une capacité de 9 m³, d'un double détendeur, d'une électrovanne pour l'injection de l'hélium et d'un débitmètre brooks afin de connaître le débit de gaz injecté.

Injection SF₆ : Le système d'injection est constitué d'une bouteille de SF₆ d'une capacité de 3 m³, d'un double détendeur, d'une électrovanne pour l'injection du gaz traceur et d'un débitmètre brooks afin de connaître le débit de gaz injecté.

Injection CH₃Cl : Le système d'injection est constitué d'une bouteille de chlorure de méthyle d'une capacité de 3 m³, d'un détendeur, d'une électrovanne pour l'injection du gaz traceur et d'un débitmètre brooks afin de connaître le débit de gaz injecté.

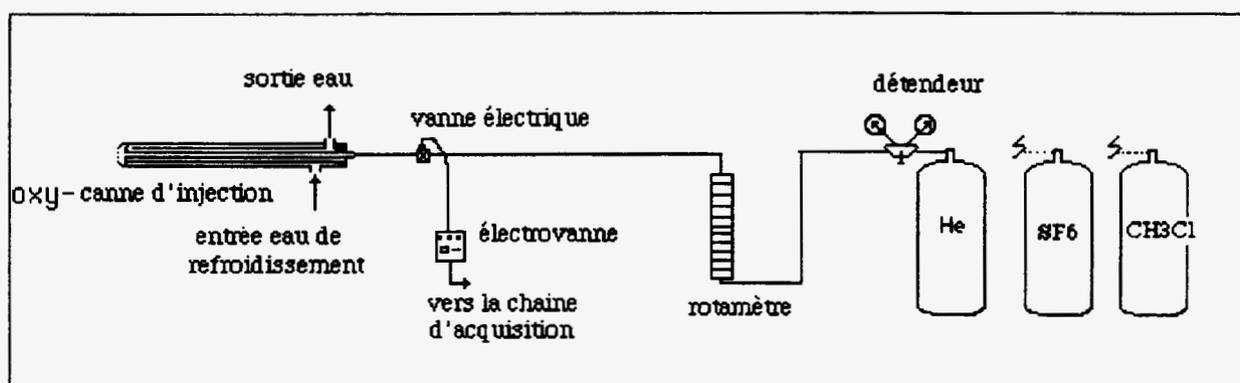


Figure 6 : le dispositif d'injection des gaz traceurs

Le dispositif présenté en figure 6 est utilisé pour l'hélium dans le cas d'une mesure de DTS selon une injection purge échelon, et pour l'injection des 2 autres gaz. Dans le cas d'une mesure de DTS par l'hélium, selon une injection de type Dirac, où il est nécessaire d'injecter le volume de gaz traceur en un temps très court, on doit utiliser un réacteur tampon comme le montre le schéma de la figure 7.

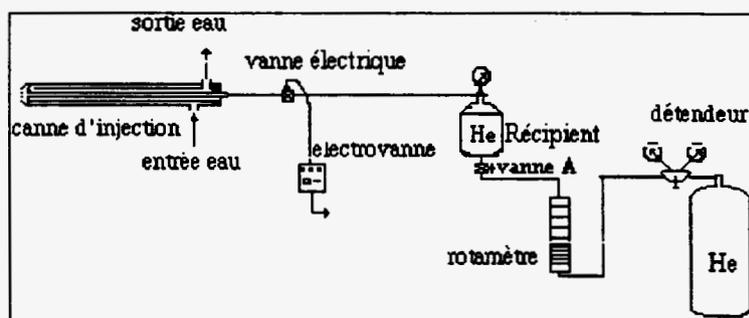


FIGURE 7 : Schéma de principe d'une injection de l'hélium de type Dirac

Suivant les essais réalisés, on injectera les gaz traceurs :

- dans la veine d'air en amont du brûleur de préchauffage mélangé à l'air de combustion pour caractériser le four lors d'un balayage axial des fumées ;
- par les cannes d'injection des déchets refroidie.

Le gaz traceur doit être parfaitement mélangé avant l'entrée dans l'enceinte thermique pour être sûr de tracer la totalité du mélange.

On dispose d'une électrovanne sur le circuit de gaz afin de synchroniser parfaitement le début de l'acquisition avec le début ou l'arrêt de l'injection de gaz traceur.

3.4.3 Systèmes de prélèvement/détection

Le système de prélèvement présenté en figure 8, doit assurer le prélèvement des fumées en sortie du four, le refroidissement éventuel, la filtration des poussières et l'élimination d'eau des fumées avant analyse par le spectromètre de masse. Le système de détection se décompose en :

- une canne de prélèvement en inox
- un réfrigérant pour le refroidissement des fumées si nécessaire
- un thermocouple de contrôle de température en sortie du refroidisseur
- un piège à eau (silica gel)
- un filtre (coton)
- une pompe à membrane étanche en amont du spectromètre de masse pour l'aspiration du gaz, compte tenu de la perte de charge dans le circuit
- d'un spectromètre de masse piloté par un micro-ordinateur

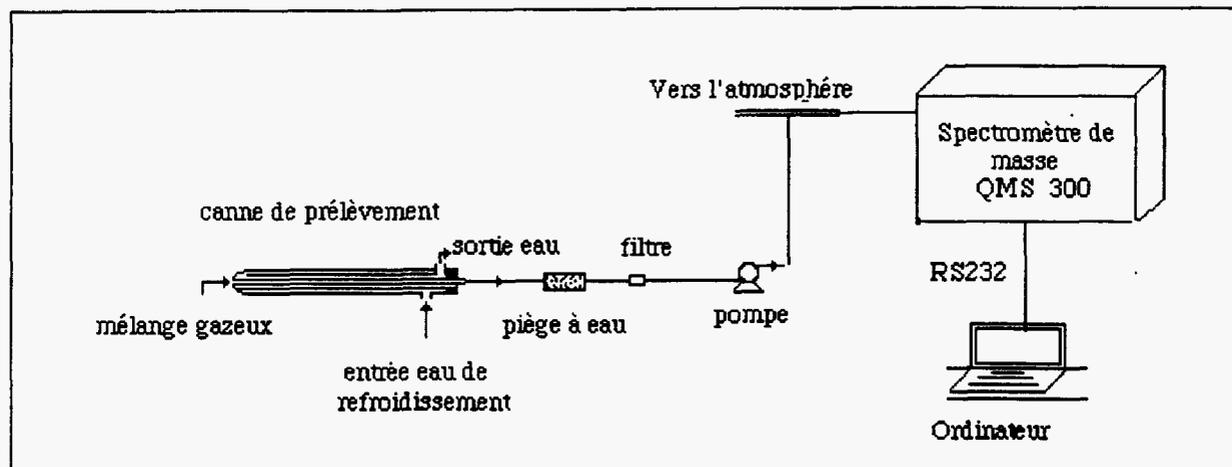


Figure 8 : le dispositif de prélèvement des gaz traceurs

3.5 CARACTERISTIQUES DES GAZ TRACEURS

Nous rappelons ci-après, les principales caractéristiques des 3 gaz utilisés pour la méthodologie de qualification d'enceintes thermiques.

3.5.1 L'Hexafluorure de soufre : SF₆

- Propriétés physiques :
 - incolore, inodore
 - ininflammable
 - non corrosif
 - masse moléculaire : 146 g
 - solubilité dans l'eau : 41 mg/l
 - masse volumique : 6,52 kg/m³
- Conditionnement :
 - gaz liquéfié
 - 3 m³, 17 bars
- Produits de décomposition : HF, SO₂, ...
- Dangers :
 - risque d'asphyxie à haute concentration

3.5.2 L'Hélium

- Propriétés physiques :
 - incolore, inodore
 - ininflammable
 - non corrosif
 - masse moléculaire : 4 g
 - solubilité dans l'eau : 1,5 mg/l
 - masse volumique : 0,1786 kg/m³
- Conditionnement :
 - gaz liquéfié
 - 9 m³, 200 bars
- Dangers :
 - risque d'asphyxie à haute concentration

3.5.3 Le chlorure de méthyle ou chlorométhane

- Propriétés physiques :
 - incolore
 - odeur : étherée
 - T_{auto-inflammation} : 625°C
 - Limites d'inflammabilité : 7,6 - 19
 - masse moléculaire : 50,5 g
 - solubilité dans l'eau : 6310 mg/l
 - masse volumique : 2,255 kg/m³
- Conditionnement :
 - gaz liquéfié
 - 3 m³, 3,2 bars
- Dangers :
 - inflammable
 - nocif par inhalation

4. PROCEDURE OPERATOIRE

Nous détaillons ci-après la procédure opératoire que nous devons suivre pour l'application de la méthodologie globale de qualification d'une enceinte thermique.

La méthode utilise donc les 3 gaz suivants : Hélium (He), Hexafluorure de soufre (SF₆) et chlorure de méthyle (CH₃Cl) pour déterminer successivement le temps de séjour moyen, la température effective et le taux d'oxygène à l'intérieur du four cyclone.

4.1 PREPARATION DES APPAREILLAGES

On détaille ci-après le protocole opératoire suivi pour réaliser les mesures sur une unité pilote d'incinération.

1. préchauffage du four jusqu'à l'obtention d'un régime permanent. Le préchauffage se fait automatiquement à partir d'une consigne de température imposée au régulateur asservie à la puissance de chauffage (débit de gaz);
2. mise en marche du spectromètre de masse pour établissement du vide;
3. préparation des lignes d'injection et de détection (refroidissement, séchage, dépoussiérage) du gaz traceur.
4. Pour le foyer cyclone, la ligne d'injection pourra être positionnée soit dans l'axe du four directement dans la flamme, soit tangentiellement à l'endroit d'injection du déchet. Pour le four rotatif, la ligne d'injection pourra être positionnée soit en tête du four à côté du brûleur de préchauffage, soit au niveau de la post-combustion.

4.2 ETUDE AVEC LE GAZ TRACEUR HELIUM

Le gaz traceur hélium nous permet d'obtenir la Distribution des temps de Séjour E(t) des molécules gazeuses à l'intérieur du four à partir de laquelle nous évaluons le temps de séjour moyen des particules gazeuses.

Dans cette partie d'étude deux types d'injection sont testés : injection du type Dirac et injection de type purge-échelon.

Dans le cas d'une injection purge échelon (Figure 6)

Dans le cas d'une injection purge-échelon, on procède de la façon suivante :

- ouverture de bouteille de gaz traceur hélium;
- ouverture de l'électrovanne de l'hélium;
- définir le débit d'hélium injecté;
- attendre que la concentration d'hélium se stabilise à l'intérieur du four (régime stationnaire);

- on vérifie alors que l'on retrouve la concentration théorique. Lorsque le régime permanent est atteint, en simultané, on coupe l'arrivée du traceur (électrovanne) et on déclenche le début des acquisitions sur l'ordinateur;
- enregistrement du fichier de l'essai;
- relevé des différentes instrumentations (débit, température, vitesse, teneur oxygène,...);
- reproduire l'essai plusieurs fois (10 maximum) afin de définir une valeur moyenne qui satisfaisait le critère de reproductibilité.

Dans le cas d'une injection Dirac (figure 7)

Dans le cas d'une injection Dirac, on procède de la manière suivante :

- ouverture de la bouteille de gaz traceur hélium;
- mise sous pression du récipient He d'une capacité de 1,5 l;
- fermeture de la vanne A;
- ouverture et fermeture instantanée de l'électrovanne;
- déclenchement simultané des acquisitions sur l'ordinateur;
- enregistrement du fichier de l'essai;
- relevé des différentes instrumentations (débit, température, vitesse, teneur oxygène,...);
- reproduire l'essai plusieurs fois (10 maximum) afin de définir une valeur moyenne qui satisfaisait le critère de reproductibilité.

4.3 ETUDE AVEC LES GAZ SF₆ ET CH₃CL

Pour le SF₆ ou le CH₃CL, la procédure est identique (figure 6).

- ouverture de l'électrovanne du gaz concerné du SF₆
- définir le débit de gaz injecté;
- attente de la stabilisation du signal
- enregistrement du fichier de l'essai
- relevé des différentes instrumentations (débit, température, vitesse, teneur oxygène,...);
- reproduire l'essai plusieurs fois (10 maximum) afin de définir une valeur moyenne qui satisfaisait le critère de reproductibilité.

5.3 ETABLISSEMENT D'UN BILAN MATIERE/ENERGIE DU FOUR

- détermination des débits de fumées en sortie de four :

$$Q_{fh}^r = v_{fh} \frac{\pi D^2}{4}$$

$$Q_{fh}^N = Q_{fh}^r \left(\frac{273}{273 + t_{fh}} \right)$$

Avec :

t_{fh} : température des fumées en sortie de four (°C)

v_{fh} : vitesse des fumées en sortie de four (m/s)

Q_{fh}^r : débit volumique réel (m³/h) des fumées humides en sortie four à la température de sortie four

Q_{fh}^N : débit volumique dans les conditions normales (Nm³/h) des fumées humides en sortie four

- détermination de l'excès d'air de combustion :

$$e = 100 \frac{V_F}{V_A} \left(\frac{(O_2)_{fs}}{21 - (O_2)_{fs}} \right)$$

et

$$V_A = V_A^\circ (1 + e/100)$$

$$V_F = V_F^\circ + (e/100) V_A$$

avec : $(O_2)_{fs}$: teneur en oxygène sur fumées sèches (%)

Notons ici que l'excès d'air calculé, ne correspondant pas à l'excès d'air au niveau du brûleur. En effet, la mesure d'oxygène dans les fumées en sortie du four intègre à la fois l'air incorporé au niveau du brûleur, et l'air parasite aspiré par les différents raccords du four.

Nous présentons dans le tableau suivant, un exemple de bilan matière/énergie.

ENTREE		SORTIE	
Gaz naturel (Nm3/h)	4,66	Fumées humides (Nm3/h)	58,25
Gaz naturel (kg/h)	3,87	Fumées humides (kg/h)	73,37
Air (Nm3/h)	53,88	Composition fumées sèches	
Air (kg/h)	69,5	CO2 (%)	9,9
excès d'air (%)	36,4	O2 (%)	6,0
		N2 (%)	84,1
		Température fumées (°C)	502
Puissance cal. entrante (kW)	40,9	Puissance cal. Fumées (kW)	10,9
		Pertes thermiques (kW)	30
		Pertes thermiques (%)	73,4

TABLEAU 1 : Exemple de bilan matière/énergie

5.4 DETERMINATION DU TEMPS DE PASSAGE

Considérons un réacteur quelconque en régime permanent de volume V. Soit Q le débit volumique total du mélange qui traverse le réacteur. Nous définissons le temps de passage τ , comme le rapport du volume du four sur le débit réel de fumées à la température des fumées en sortie de four :

$$\tau = \frac{V_{four}}{Q'_{fh}}$$

Lorsque l'écoulement à l'entrée et à la sortie est purement convectif, et que le mélange réactionnel est indilatable, τ s'identifie au temps de séjour moyen du fluide dans le réacteur (cas des mélanges liquides). Dans le cas contraire, il faut soigneusement distinguer le temps de passage du temps de séjour réel du fluide dans le réacteur.

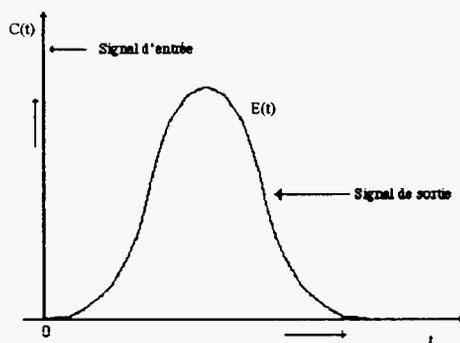
5.5 TRAITEMENT DES DONNEES AVEC L'HELIUM

- calcul d'une valeur moyenne sur 10 fichiers issus du spectromètre de masse (sous forme ASCII) obtenus dans les mêmes conditions opératoires. Nous ne retenons que les courbes dont la variation relative par rapport à la courbe moyenne est inférieure à 10 %, ainsi, la reproductibilité de nos résultats est assurée.
- récupération de 2 fichiers d'acquisition bruts moyens
 - DTS globale : four + ligne de prélèvement
 - DTS ligne de prélèvement seule
- traitement des 2 fichiers bruts pour obtention de la courbe DTS, $E(t) = f(t)$ pour le four avec ligne de prélèvement et pour la ligne de prélèvement seule;
- lissage/filtration des 2 fichiers bruts
- traitement de déconvolution pour obtention de la courbe de l'enceinte thermique

Notons ici que la procédure de traitement pour la détermination de la courbe DTS $E(t)$ est différente selon le mode d'injection du gaz traceur choisi : injection Dirac ou purge échelon.

a)- Injection Dirac

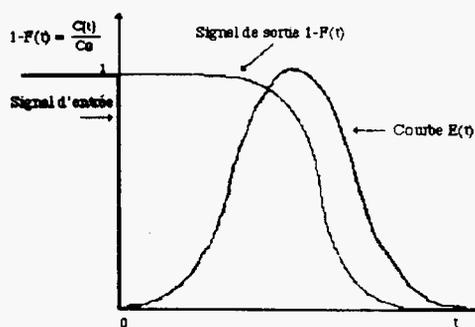
La distribution des temps de séjour $E(t)$ se déduit très simplement par une normation de la courbe $C(t)$, soit :



$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{+\infty} C(t) dt}$$

b)- Injection purge échelon

La distribution des temps de séjour $E(t)$ se déduit très simplement par une dérivation de la courbe $C(t)$, soit :



$$1 - F(t) = 1 - \frac{C(t)}{C_0} \text{ et } \frac{d(1 - F(t))}{dt} = -E(t)$$

Nous pouvons remarquer ici que pour l'injection Dirac, on obtient directement la courbe DTS tandis que pour la purge échelon, nous devons dériver le signal, entraînant par voie de conséquence une amplification du bruit de fond.

Dans les deux cas, le temps de séjour moyen du gaz dans le four est déterminé en appliquant le moment d'ordre 1 de $E(t)$, soit :

$$t_s = \int_0^{\infty} tE(t)dt$$

Pour comparer les courbes de DTS relatives aux conditions opératoires (débits, températures...), on introduit généralement la distribution de temps de séjour en temps réduit, $E(\theta)$, tel que

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad \text{et} \quad E(\theta) = \tau E(t)$$

Pour vérifier qu'aucune anomalie n'est intervenue au cours de l'essai, on vérifie le bilan de matière du traceur entre l'entrée et la sortie de la maquette.

$$m_s = \int_0^{+\infty} QC(t)dt = Q \int_0^{+\infty} C(t)dt$$

Cette masse doit être égale à la masse initiale d'hélium introduite dans la maquette. Un écart de $\pm 10\%$ sur le bilan de traceur est considéré comme satisfaisant dans notre cas, sinon l'essai est rejeté.

Pour chaque courbe DTS obtenue, nous pouvons déterminer les caractéristiques suivantes associées à cette courbe, t_a (temps auquel $E(t) \neq 0$), t_m (s) (temps pour lequel $E(t)$ est maximal), t_f (temps pour lequel $E(t)$ revient à 0)

La dernière étape de l'analyse des données récupérée avec l'hélium concerne la détermination des pathologies de l'enceinte thermique.

On compare $t_s(s)$ et $\tau \Rightarrow$ détermination zones stagnantes et court-circuit

5.6 TRAITEMENT DES DONNEES AVEC LE SF₆

- caractéristiques en entrée :

- débit volumique de SF₆ injecté : $Q_{eSF_6} = 0,83 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- débit massique de SF₆ injecté : $m_{eSF_6} = 5,42 \text{ kg/h}$

- caractéristiques en sortie :

- récupération du fichier brut du spectromètre de masse
- fraction volumique de SF₆ dans les gaz secs : $\Phi_{SF_6} = 0,084 \%$
- débit volumique de SF₆ en sortie : $Q_{sSF_6} = \Phi_{SF_6} * Q_{fs} / 100 = 0,045 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- débit massique de SF₆ en sortie : $m_{sSF_6} = 0,29 \text{ kg/h}$

- détermination du taux de conversion DRE :

- DRE (%) = $100 * (m_{eSF_6} - m_{sSF_6}) / m_{eSF_6}$
soit DRE = 94,65 %

- détermination de la température moyenne Lagrangienne :

pour $700 < t \text{ (}^\circ\text{C)} < 1200^\circ\text{C}$, on détermine le taux de conversion théorique du SF₆ couplé à la courbe de DTS du four

$$\chi_{1\text{exp}} = 1 - \int_0^\infty E_{\text{exp}}(t) e^{-k_1 t} dt$$

$$\text{et } k_1 = k'_1 e^{-\frac{E_1}{RT_m}}$$

- Détermination de la température moyenne Lagrangienne

On cherche T_m tel que :

$$\chi_{1\text{exp}} = \chi_{1\text{th}}$$

Pour notre exemple, on trouve $T_m = 863^\circ\text{C}$

Bien entendu cette procédure de détermination de la température moyenne est réalisée par le logiciel de traitement de données de façon itérative par dichotomie.

5.7 TRAITEMENT DES DONNEES AVEC LE CH₃CL

- caractéristiques en entrée :

- débit volumique de CH₃Cl injecté : $Q_{eCH_3Cl} = 1,93 \text{ Nm}^3/\text{h}$

- débit massique de CH₃Cl injecté : $m_{eCH_3Cl} = 4,46 \text{ kg/h}$

- caractéristiques en sortie :

- récupération du fichier brut du spectromètre de masse

- fraction volumique de CH₃Cl dans les gaz secs : $\Phi_{CH_3Cl} = 0,0013 \%$

- débit volumique de CH₃Cl en sortie : $Q_{sCH_3Cl} = \Phi_{CH_3Cl} * Q_{fs} / 100 = 0,0007 \text{ Nm}^3/\text{h}$

- débit massique de CH₃Cl en sortie : $m_{sCH_3Cl} = 0,0016 \text{ kg/h}$

- détermination du taux de conversion DRE :

- DRE (%) = $100 * (m_{eCH_3Cl} - m_{sCH_3Cl}) / m_{eCH_3Cl}$

soit DRE = 99,96 %

- détermination de la teneur moyenne en oxygène Lagrangienne :

on détermine le taux de conversion théorique du CH₃Cl couplé à la courbe de DTS du four

$$\chi_{2exp} = \chi_{2th} = 1 - \int_0^{\infty} E_{exp}(t) e^{-k_2 t} dt$$

$$k_2 = k'_2 [O_{2m}]^a e^{-\frac{E_2}{RT_m}}$$

- Détermination de la teneur moyenne en oxygène Lagrangienne

On cherche O_{2m} tel que :

$$\chi_{2exp} = \chi_{2th}$$

6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.1 ETUDE SUR L'UNITE PILOTE D'INCINERATION PAR FOYER CYCLONE

Nous détaillons ci-dessous l'étude de réalisée sur l'unité pilote. Compte tenu du changement du spectromètre de masse, un certain nombre d'essais ont été reconduits.

De nouveaux essais sont réalisés pour tester la procédure avec les 3 gaz.

6.1.1 Etude avec l'hélium

Dans cette première partie, nous présentons successivement :

- un exemple de traitement de fichier brut de DTS
- une comparaison des performances obtenues par chaque spectromètre
- l'influence du type d'injection sur l'hydrodynamique du four
- Influence du positionnement de l'injection de l'hélium
- Influence de la température
- Influence de l'excès d'air

6.1.1.1 Exemple de traitement de fichiers brut

Nous présentons sur les figures suivantes quelques exemples de courbes DTS et du traitement associé, soit :

- une courbe de DTS de la ligne de prélèvement brute et filtrée (figure 9)
- une courbe DTS globale brute et filtrée (figure 10)
- une courbe DTS de l'enceinte obtenue par déconvolution (figure 11)

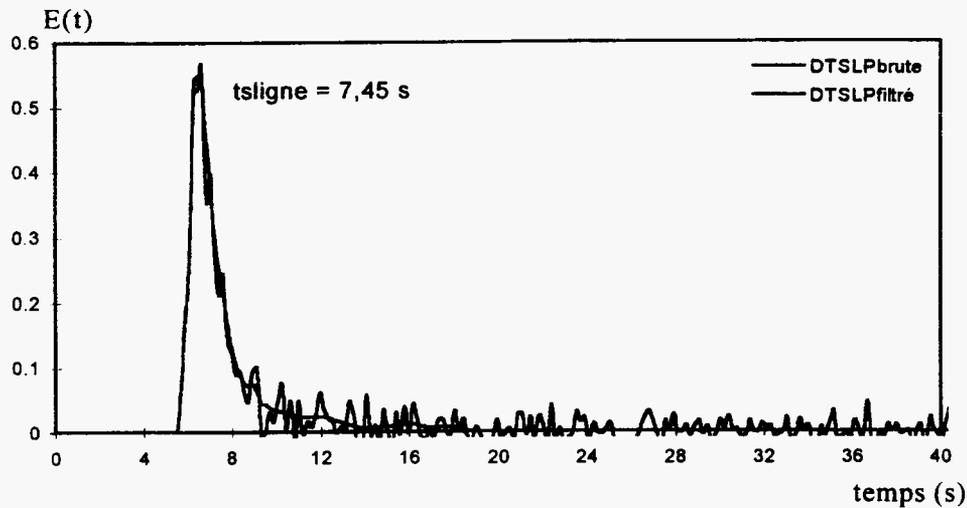


FIGURE 9: Exemple de courbe de DTS de la ligne de prélèvement brute et filtrée

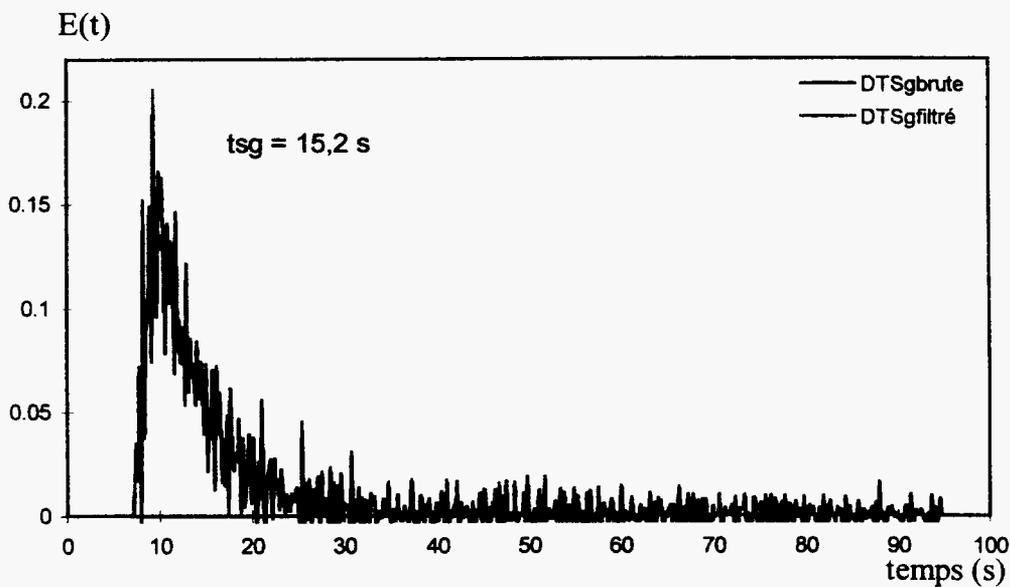


FIGURE 10 : Exemple de courbe de DTS globale brute et filtrée

Les différentes courbes obtenues sont parfois bruitées. Le bruit est beaucoup plus amplifié dans le cas d'une injection purge échelon que dans le cas d'un Dirac. Pour obtenir une courbe de DTS dans le cas d'une purge échelon, on dérive le signal $1-C(t)/C_0$ et on sait que la dérivé amplifie le bruit d'où la nécessité de filtrer le signal

brut. Pour cela nous avons intégré dans le logiciel DTS une filtration à moyenne mobile et une filtration de type Schanon.

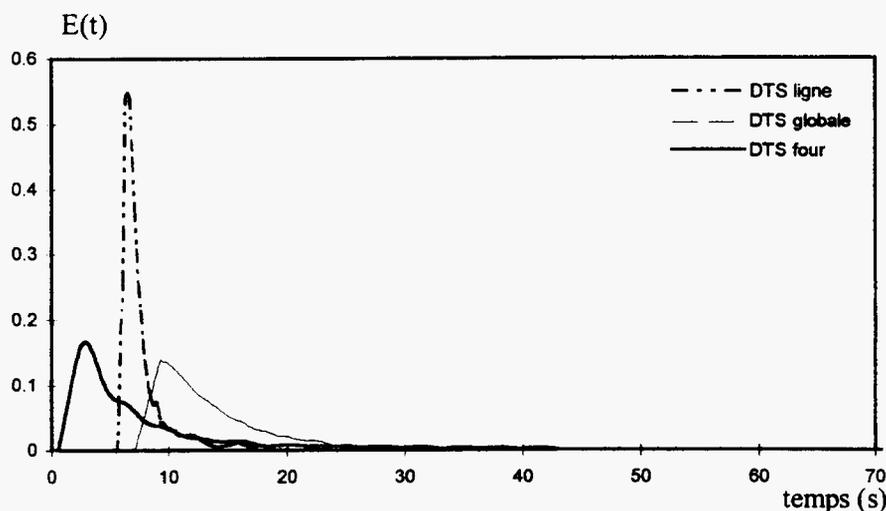


FIGURE 11 : Présentation de la déconvolution des deux signaux

Pour obtenir la courbe de DTS four, on est amené à découpler la DTS de la ligne de prélèvement de la DTS globale (DTS four + ligne de prélèvement. Ainsi, une déconvolution des deux signaux (DTS) s'impose (figure 12). Pour vérifier si la méthode de déconvolution des deux signaux est bonne, on doit vérifier la relation suivante : $t_{sf} = t_{sg} - t_{s\text{ligne}}$

Un écart de 5 % est généralement admis entre t_{sf} déduit de la courbe déconvoluée et la différence des temps de séjour ($t_{sf} = t_{sg} - t_{s\text{ligne}}$).

Où :

$t_{sf} = t_s$: temps de séjour moyen de la DTS four, s

t_{sg} : temps de séjour moyen global, s

$t_{s\text{ligne}}$: temps de séjour moyen de la ligne de prélèvement, s

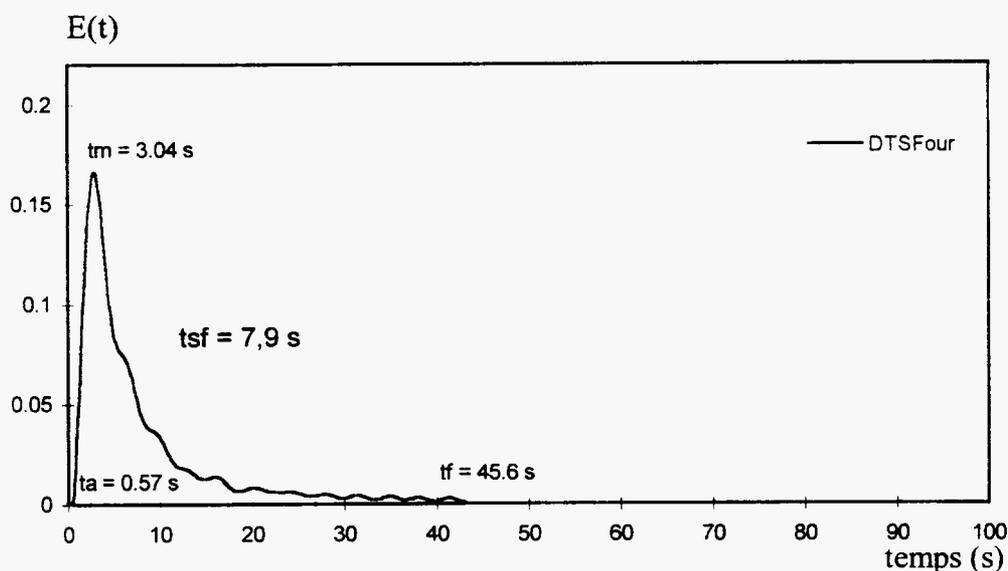


Figure 12 : Présentation de la courbe de DTS four

Détermination des caractéristiques générales associées à la courbe DTS

A partir de la courbe de DTS expérimentale on détermine le temps de séjour moyen (t_s) des particules gazeuses qui ont séjourné à l'intérieur du four. A cette courbe (figure 12), on associe :

- le temps t_a correspond au temps de séjour des premières particules gazeuses les plus rapides à avoir quitté le four;
- le temps t_m abscisse du maximum de la courbe qui correspond au temps de séjour de la concentration maximale de traceur;
- le temps t_f correspond au temps de fin de passage des dernières particules à avoir quitté le four;
- le temps t_s correspond au temps de séjour moyen de l'ensemble des particules séjournant à l'intérieur du four entre $t = 0$ et $t = t_f$.

Nous regroupons dans le tableau 2 l'ensemble des caractéristiques de la DTS de la figure 12 :

	temps (s)
t_a (s)	0,57
t_m (s)	3,04
t_f (s)	45,6
t_s (s)	7,90

Tableau 2 : Caractéristiques de la DTS

6.1.1.2 Etude comparative des performances des 2 spectromètres de masse

Avant de présenter les différents résultats expérimentaux obtenus, nous détaillons ci-après une étude comparative sur les 2 spectromètres de masse.

Par rapport aux différentes expérimentations, le temps de réponse du système est particulièrement important. Les valeurs reportées dans le tableau 3, montrent de meilleures performances pour le nouveau spectromètre de masse.

	PFEIFFER	VG
Etalonnage	quantitatif	Semi-quantitatif
temps d'échantillonnage en dynamique	0,03 s	0,08 s
temps de réponse	0,3 s	1,4 s

TABLEAU 3: Comparaison des performances des spectromètres de masse

Nous avons réalisé 2 essais de mesure du temps de réponse global du système comprenant à la fois le temps de passage dans le capillaire et le temps de réponse intrinsèque de l'appareil.

Comparaison de la DTS (Capillaire) obtenue par deux spectromètres différents

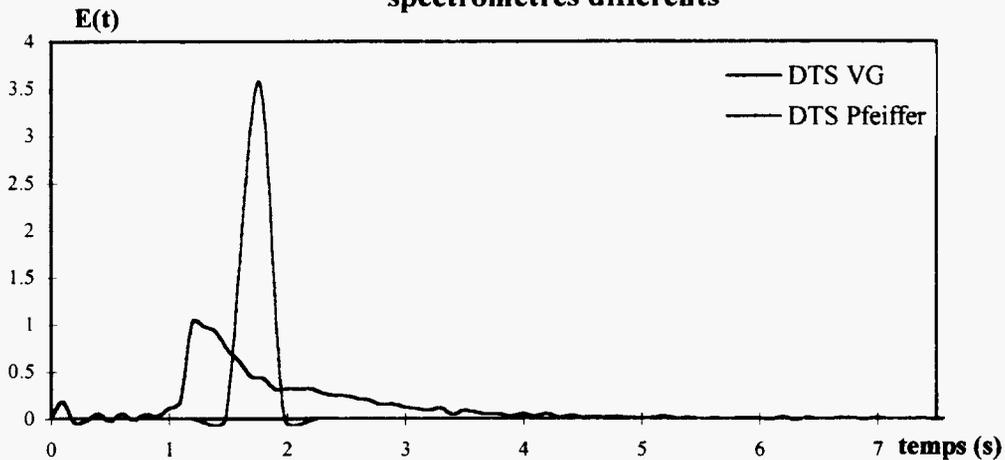


FIGURE 13 : Comparaison des DTS des 2 spectromètres

Ces deux signaux montrent clairement que la DTS obtenue par le spectromètre PFEIFFER est du type piston, ce qui indique que le signal n'est pas déformé. On constate l'effet inverse pour le spectromètre VG. Notons ici, que la déformation du signal du spectromètre VG est en grande partie dû à une dégradation de l'appareil (vide, ...).

Comparaison de la DTS globale four + ligne de prélèvement

Conditions opératoires de l'essai

$Q_{\text{fumée}}$: 240 m³/h

$T_{\text{fumée}}$: 474 °C

$Q_{\text{hélium}}$: 2,4 m³/h

C_{He} : 0,9 %

Paramètres de fonctionnement du spectromètre

	PFEIFFER	VG	Rapport
gain	E-9	E-10	10
intensité max obtenue	2,8 E-9	4,8 E-10	6
Bruit de fond	E-11	E-11	1

TABLEAU 4 : Comparaison des paramètres de fonctionnement du spectromètre

Pour un même bruit de fond, le gain et donc la résolution du signal est 10 fois supérieure pour le nouveau spectromètre de masse.

Les courbes comparées de DTS globale du four + ligne de prélèvement sont présentées sur la figure 14.

Comparaison de la DTS (Four + Ligne) obtenue par deux spectromètres différents

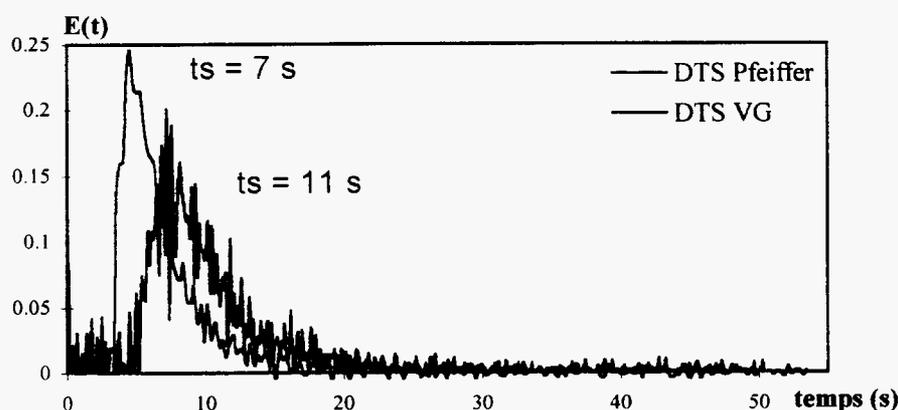


FIGURE 14 : Comparaison des DTS globales

On constate que la DTS obtenue par le spectromètre VG est plus dilatée et bruitée que celle obtenue par le spectromètre Pfeiffer. En effet, avec le spectromètre VG, à concentration fixe, on travaille avec des gains plus importants (proche du gain de bruit de fond), ce qui montre qu'il est moins sensible que le spectromètre Pfeiffer.

6.1.1.3 Influence du type d'injection sur l'hydrodynamique du four

Nous avons testé deux modes d'injection du gaz traceur pour déterminer l'hydrodynamique du four ; injection Dirac et injection purge échelon. Cette partie d'étude nous permet de valider le mode de traitement utilisé pour déterminer la DTS du four à partir d'une injection échelon d'une part, et de tester la sensibilité du nouveau spectromètre de masse d'autre part.

Une courbe de DTS obtenue par une injection purge-échelon nécessite une normation du signal $C(t) = f(t)$ par C_0 , puis une dérivation de ce dernier. Nous obtenons ainsi, et souvent, une courbe DTS bruitée qui demande une filtration importante afin de ne pas perdre des informations. Par contre, une DTS obtenue par une injection Dirac ne demande aucun traitement particulier sauf une normation du

signal obtenu par le spectromètre de masse. Pour appliquer une telle injection (Dirac) il faut disposer d'un analyseur très sensible compte tenu de la quantité du gaz traceur à injecter en un temps très court ($< 0,01$ t)

Nous présentons sur les figures 15 et 16, deux exemples de courbes de DTS du four cyclone obtenues dans les mêmes conditions opératoires par injections Dirac et purge-échelon du gaz traceur au niveau de la veine d'air du brûleur à gaz (injection axial). Par ailleurs, nous avons regroupé les conditions opératoires pour chaque essai ainsi que les caractéristiques des courbes obtenues (temps de séjour moyens) pour chaque méthode dans le tableau 5.

	Q_{FH} (Nm ³ /h)	$Q_{fumée}$ (m ³ /h)	T_f (°C)	τ (s)	t_{sp} (s)	t_{sd} (s)
Essai 1	66	188,0	502	6,10	6,00	6,04
Essai 2	104	381,6	725	3,00	3,18	3,27

Tableau 5 : Comparaison des temps de séjour suivant le type d'injection

Avec :

Q_{FH} : débit des fumées humides calculé dans les conditions normales (Nm³/h) au point de mesure

$Q_{fumée}$: débit volumique réel des fumées (m³/h) calculé à la température de sortie du four T_f

T_f : température des fumées mesurée au point de prélèvement en sortie du four (°C)

t_{sp} : temps de séjour moyen (s) déterminé à partir de la courbe DTS obtenue par injection purge-échelon

t_{sd} : temps de séjour moyen (s) déterminé à partir de la courbe DTS obtenue par injection Dirac

τ : temps de passage (s) des fumées dans le four

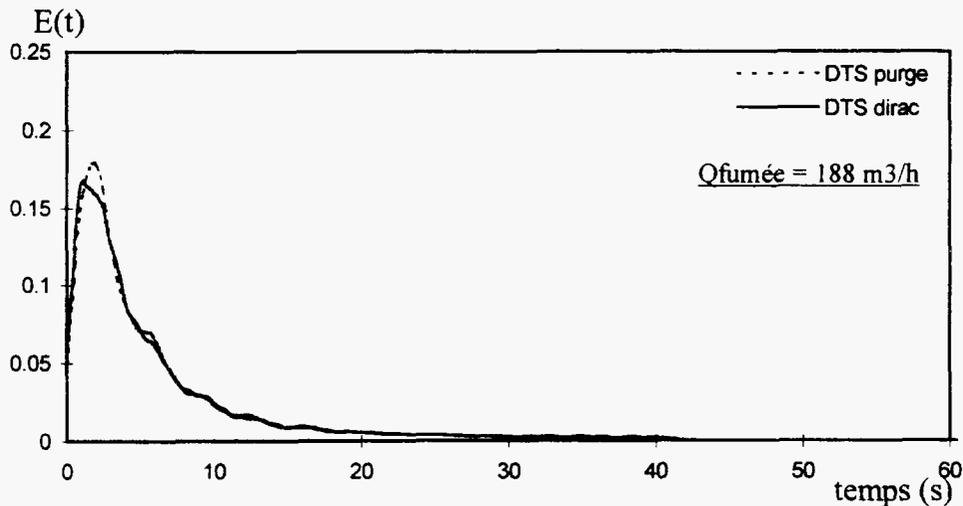


FIGURE 15 : Comparaison des signaux par méthode purge échelon et Dirac, essai1

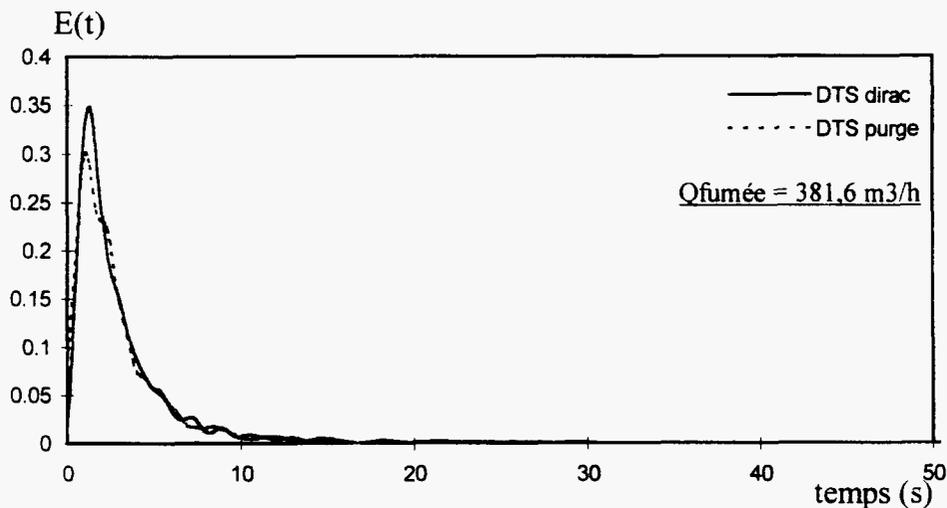


FIGURE 16 : Comparaison des signaux par méthode purge échelon et Dirac, essai2

Pour l'ensemble des essais réalisés sur le four cyclone, la concentration volumique de l'hélium est inférieure à 0,3 %. Nous observons sur la figure 16 une très bonne superposition des courbes de DTS obtenues par injection Dirac avec celles obtenues par purge-échelon. Cela valide d'une part, le mode de détermination de courbes DTS obtenues par purge et d'autre part, la sensibilité du spectromètre de masse.

De plus, nous constatons sur le tableau 5 que les temps de séjour moyen obtenus par les deux modes d'injections sont sensiblement égaux avec un écart faible (< 3 %). Concernant la comparaison entre le temps de séjour moyen et le temps de

passage, nous observons que les valeurs obtenus sont proches avec un écart maximal inférieur à 9 % et ceci pour l'ensemble des essais réalisés sur le four avec une injection axiale du gaz traceur. La légère différence s'explique du fait de la dilatation du gaz, du gradient de température et de quelques faibles erreurs de traitement dues à la filtration du signal.

6.1.1.4 Influence du positionnement de l'injection de l'hélium

L'unité d'incinération (figure 1) peut fonctionner soit en four vertical en utilisant le brûleur de préchauffage (gaz naturel) situé dans l'axe vertical du four, soit en four cyclone en utilisant les orifices d'injection ortho-radiale situés tangentiellement au four.

L'étude présentée ci-après doit permettre de mettre en évidence le rôle du positionnement de l'injection des gaz traceur, pour la caractérisation d'une enceinte thermique. Par la suite, elle nous permettra de valider la dépendance de la destruction de SF₆ avec la température.

Nous avons donc testé les 2 positionnements suivants :

- axial : dans l'axe vertical du four au niveau du brûleur de préchauffage
- tangential : au niveau de la canne de pulvérisation du déchet

Notons ici que la détection des gaz se fait toujours au même endroit, en sortie du four. Dans ce contexte, nous réalisons plusieurs essais de DTS à différents débits de gaz, en injectant le gaz traceur axialement suivant l'écoulement des fumées puis tangentiellement (radialement).

Remarque :

Dans le cas où le traceur est injecté tangentiellement alors que l'écoulement est axial, nous ne pouvons parler d'une Distribution des Temps de Séjour mais d'une distribution des âges internes des molécules au point d'injection. Néanmoins, pour plus de conformité nous noterons la distribution des âges internes par E(t).

Nous reportons sur les figures 17 à 19, les courbes obtenues par injections axiale et radiale du gaz traceur, et dans le tableau 6, les conditions opératoires pour les 3 essais réalisés ainsi que les valeurs du temps de passage et temps de séjour moyen déduites des différentes courbes obtenues.

Q _{FH} (Nm ³ /h)	Q _{fumée} (m ³ /h)	T _f (°C)	τ (s)	t _{sa} (s)	t _{sr} (s)
53	98,0	231	11,7	11,5	17,0
66	188,0	502	6,10	6,00	7,84
104	381,6	725	3,00	3,18	5,03

Tableau 6 : Comparaison des temps de séjour suivant le point d'injection

Avec :

t_{sa} : temps de séjour moyen (s) déterminé à partir de la courbe DTS obtenue par injection axiale d'hélium

t_{sr} : temps de séjour moyen (s) déterminé à partir de la courbe DTS obtenue par injection radiale d'hélium

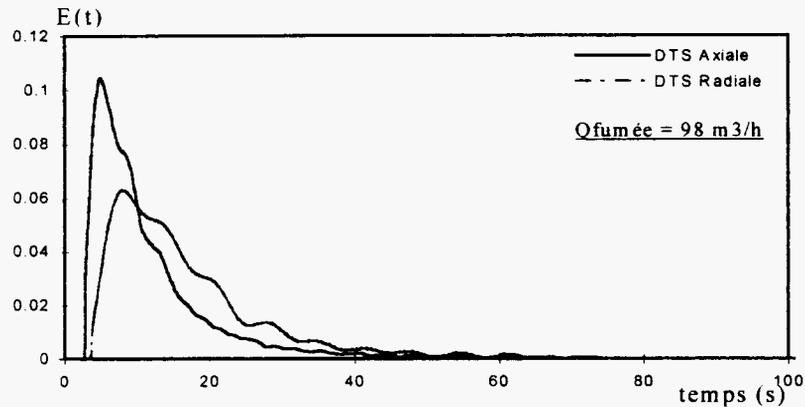


Figure 17 : Comparaison du positionnement de l'injection de l'hélium - Essai 1

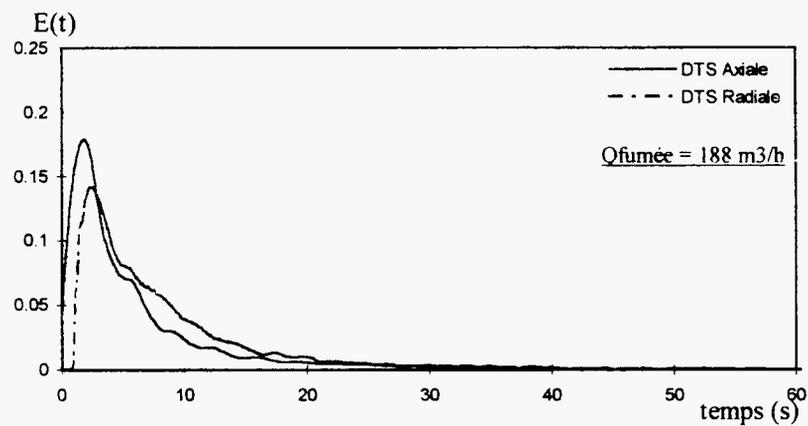


Figure 18 : Comparaison du positionnement de l'injection de l'hélium - Essai 2

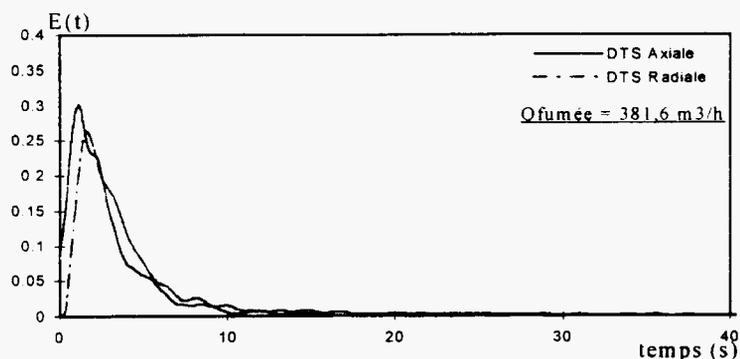


Figure 19 : Comparaison du positionnement de l'injection de l'hélium - Essai 3

Nous observons sur les figures 17 à 19 que les courbes obtenues axialement et tangentielllement présentent une différence significative, avec un léger décalage vers la gauche des courbes injection axiale par rapport à injection radiale.

Effectivement, dans le cas d'une injection axiale le gaz traceur est injecté au niveau du brûleur, cela permet d'une part, de tracer l'ensemble des particules depuis l'entrée jusqu'à la sortie du four et d'autre part, de bien mélanger le gaz traceur au gaz vecteur (fumées).

Par contre, lors d'une injection tangentielle, le gaz traceur est mélangé lentement (selon la turbulence du gaz vecteur) avec le gaz vecteur et trace uniquement une partie du four. Cela se traduit sur les figure 17 à 19 par un décalage des courbes dû à la rapidité du mélange entre le gaz traceur et le gaz vecteur et également par une longue traînée de la courbe radiale due principalement à une importante zone stagnante (partie haute du four) qui échappe au gaz traceur au point d'injection. Les écarts entre les 2 courbes sont réduits pour des forts débits de fumées qui créent une plus grande turbulence et qui favorisent un mélange plus rapide entre le gaz traceur et le gaz vecteur.

Par ailleurs, nous notons sur le tableau 6 que les différences constatées visuellement se retrouvent au niveau des temps de séjour entre les deux courbes déterminés dans les mêmes conditions opératoires mais avec un point d'injection différent.

Les temps de passage et temps de séjour moyen, obtenus pour une injection axiale sont proches, ce qui, compte tenu du respect des conditions de traçage caractérise une vraie DTS. Pour l'injection tangentielle, la différence est très importante, dû au fait que la méthodologie de base de mesure de DTS n'est pas respectée, soit d'une part un non traçage de l'ensemble de la veine de gaz et d'autre part un mauvais mélange.

Nous montrons ainsi, dans cette partie d'étude que le traçage doit être effectué à l'endroit ou l'on injecte les déchets pour pouvoir suivre réellement le parcours des molécules gazeuses de dégradation des déchets.

6.1.2 Influence de la température sur l'hydrodynamique

Au fonctionnement normal, le brûleur du four est réglé avec un excès d'air compris entre 30 % et 40%. Nous étudions dans ce chapitre l'influence de la variation de la température (débit de gaz naturel) sur l'hydrodynamique du four.

Ainsi, le débit de gaz naturel est varié entre 4 Nm³/h et 7 Nm³/h et nous effectuons des injections axiales et radiales de l'hélium par la méthode Dirac afin de mesurer la DTS en sortie du four.

Les courbes de DTS correspondant à ces essais sont reportées sur les figures 20 et 21 en temps réduit afin de pouvoir comparer des éventuelles différences. Aussi, nous regroupons l'ensemble des conditions opératoires et les temps de séjour moyens relatifs aux différentes courbes expérimentales dans le tableau 7.

	Q _{gaz} (Nm ³ /h)	T _f (°C)	v (m/s)	O ₂ (%)	Q _{FH} (Nm ³ /h)	Q _{fumée} (m ³ /h)	e (%)	τ (s)	t _{sa} (s)	t _{sr} (s)
Essai 1	4,7	502	4,3	6,0	66	188	36,5	6,10	6,00	7,84
Essai 2	6,4	680	6,7	5,4	85	295	31,4	3,89	3,90	5,93
Essai 3	6,9	725	8,6	6,5	104	381,6	40,6	3,00	3,18	5,03

Tableau 7: Conditions opératoires et comparaison des temps de séjour suivant le point d'injection pour différentes températures

Avec :

Q_{gaz} : débit de gaz naturel (Nm³/h) mesuré à l'aide d'un compteur à gaz

v : vitesse des fumées (m/s) calculé par le tube de pitot au point de prélèvement

O₂ : taux d'oxygène (%) mesuré par un analyseur de fumée au point de prélèvement

e : excès d'air (%) utilisé lors de la combustion dans le four

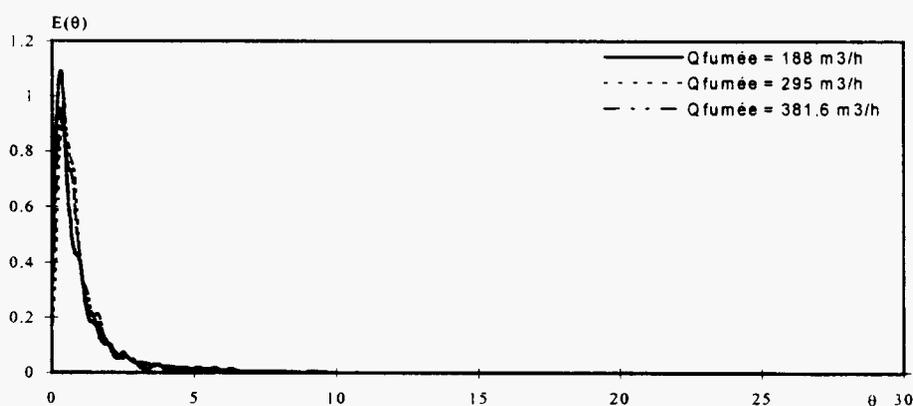


Figure 20 : Influence de la température sur la courbe DTS normalisée dans le cas d'une injection axiale

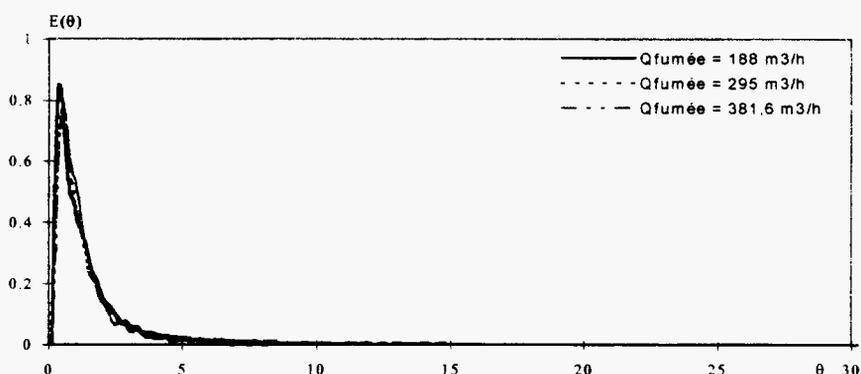


Figure 21 : Influence de la température sur la courbe DTS normalisée dans le cas d'une injection radiale

Nous constatons sur les figures 20 et 21 que la structure globale de l'écoulement interne du four dans la gamme de température étudiée est conservée, quel que soit le positionnement de l'injection du gaz traceur.

Cela montre l'indépendance de la DTS à l'effet de température. Par ailleurs, dans le tableau 7, nous observons comme dans le chapitre précédent les mêmes constatations concernant les temps de séjour moyen et les temps de passage.

Cette partie d'étude (influence de la température) doit nous permettre de confirmer le choix du traceur SF_6 pour la détermination de la température moyenne Lagrangienne du four.

6.1.2.1 Influence de l'excès d'air sur l'hydrodynamique

Sachant que la dégradation thermique du traceur chlorure de méthyle (CH_3Cl) dépend principalement de la température et du taux d'oxygène, l'étude de l'influence de l'excès d'air (taux d'oxygène) sur l'hydrodynamique s'impose.

Ainsi, dans ce chapitre, nous avons varié principalement le débit d'air de combustion et nous réalisons des essais de mesures de DTS pour les deux positionnements d'injections.

Les conditions opératoires relatives à ces essais sont reportées dans le tableau 8 et les courbes de DTS expérimentales en temps réduit correspondantes sont représentées en figures 22 et 23.

	Qgaz (Nm ³ /h)	Tf (°C)	v (m/s)	O2 (%)	Q _{FH} (Nm ³ /h)	Qfumée (m ³ /h)	e (%)	τ (s)	t _{sa} (s)	t _{sr} (s)
Essai 4	2,5	231	2,2	8,2	53	98,0	58,0	11,7	11,5	17,0
Essai 5	6,5	439	3,2	- 3,6	55	143,0	- 13,4	8,03	7,90	12,4
Essai 6	5,8	570	3,9	0,6	56	172,0	2,8	6,68	6,72	7,59
Essai 7	3,8	396	4,0	7,8	73	177,8	53,7	6,46	6,46	7,90
Essai 8	6,5	646	5,1	2,0	67	225,6	9,4	5,10	4,50	6,00
Essai 9	5,6	630	5,8	5,8	78	257,7	35,1	4,46	4,10	5,80

Tableau 8 : Conditions opératoires et comparaison des temps de séjour suivant le point d'injection pour différents excès d'air

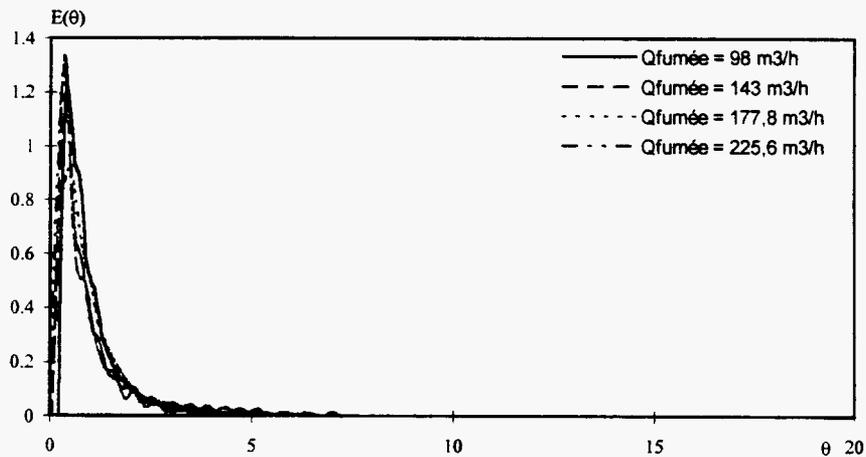


Figure 22 : Influence de l'excès d'air sur la courbe DTS normalisée dans le cas d'une injection axiale

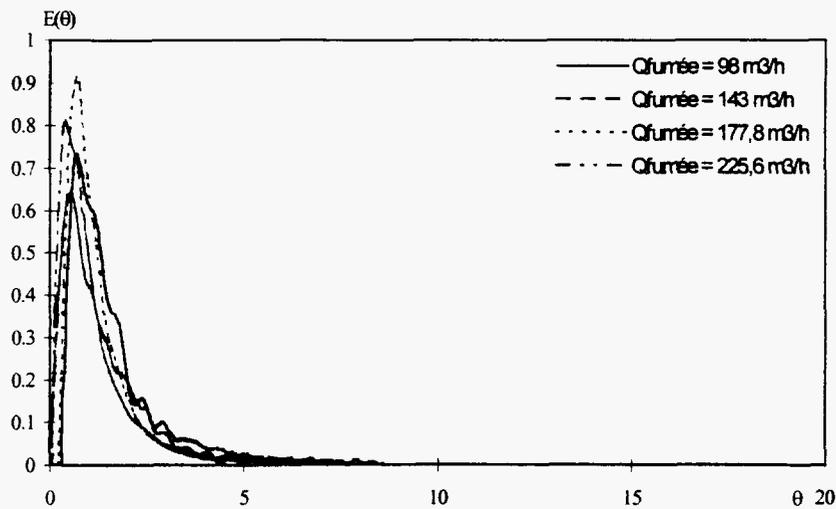


Figure 23 : Influence de la température sur la courbe DTS normalisée dans le cas d'une injection radiale

L'excès d'air varie entre -13 % et 60 % avec une variation de débit de gaz naturel (et donc de la température) entre 2 Nm³/h et 7 Nm³/h, ce qui correspond à une variation de température de fumées au point de prélèvement entre 230 °C et 650 °C.

Nous remarquons sur les figures 22 et 23 que quelle que soit l'injection, l'allure globale des courbes expérimentales obtenues est conservée avec un écart relativement faible entre les différentes courbes. Les écarts constatés peuvent s'expliquer principalement par la façon dont s'effectue le mélange du combustible (gaz naturel) et du comburant (air) suivant la variation de l'excès d'air.

Des écarts plus au moins importants sont observés sur le tableau 8 entre les temps de séjour moyen et le temps de passage suivant le positionnement de l'injection du gaz traceur.

6.1.3 Etude avec le SF₆

Pour l'ensemble des 9 essais de DTS réalisés, nous injectons en même temps que l'hélium, le gaz SF₆ et nous le détectons par spectrométrie de masse en sortie du four. L'ensemble des données concernant le SF₆ mesurées ou calculées sont regroupées dans le tableau 9.

	Q _{FH} Nm ³ /h	Q _{eSF6a} Nm ³ /h	C _{eSF6a} (%)	m _{eSF6a} kg/h	m _{sSF6a} kg/h	Q _{eSF6r} Nm ³ /h	C _{eSF6r} %	m _{eSF6r} kg/h	m _{sSF6r} kg/h
Essai 1	66	1,43	2,12	9,330	0,0030	1,04	1,54	6,750	1,2770
Essai 2	85	0,39	0,46	2,521	0,0006	0,25	0,30	1,656	0,0074
Essai 3	104	0,29	0,28	1,880	0,0030	0,29	0,28	1,880	0,0647
Essai 4	53	0,83	1,54	5,420	0,2896	0,93	1,72	6,070	5,9139
Essai 5	55	1,50	2,66	9,780	0,0030	1,38	2,46	9,004	0,1967
Essai 6	56	1,53	2,67	9,976	0,0072	1,53	2,67	9,976	0,1970
Essai 7	73	0,85	1,15	5,516	0,0210	0,77	1,05	5,043	3,7530
Essai 8	67	0,50	0,74	3,267	4,4E-5	0,38	0,57	2,500	0,0011
Essai 9	78	0,46	0,85	2,980	0,0081	0,38	0,49	2,500	0,0049

Tableau 9 : Résultats des essais SF6

Avec :

a : indice caractérisant une injection axiale du gaz traceur

r : indice caractérisant une injection radiale du gaz traceur

Q_{eSF6a} : débit volumique de SF6 injecté axialement dans le four, (Nm³/h)

C_{eSF6a} : fraction volumique de SF6 injectée axialement dans le four, (%)

m_{eSF6a} : débit massique de SF6 injecté axialement dans le four, (kg/h)

m_{sSF6a} : débit massique axial de SF6 détecté en sortie four, (kg/h)

Nous notons également pour chaque essai réalisé, le profil de température (figure 24) le long du four cyclone afin de mettre en évidence le gradient de température important existant dans une telle enceinte thermique. L'ensemble des relevées de température est reporté dans le tableau 10.

Notons ici que les températures relevées dans le four par les thermocouples sont celles du réfractaire du foyer de combustion et non pas celle du flux gazeux à l'exception du thermocouple T1= Tf qui nous donne la température des fumées au point de prélèvement, en sortie de four.

Nous remarquons sur le tableau 10 que la température la plus élevée est donnée par le thermocouple 5 qui se situe au niveau du restreint. A cet endroit, le flux de chaleur des fumées est concentré sur une petite section contrairement aux thermocouples 3 et 4 où le flux de chaleur est diffusé sur une grande surface.

Cette différence importante de température dans la partie haute du four s'explique par l'aspect de la flamme qui est longue, caractéristique du brûleur utilisé.

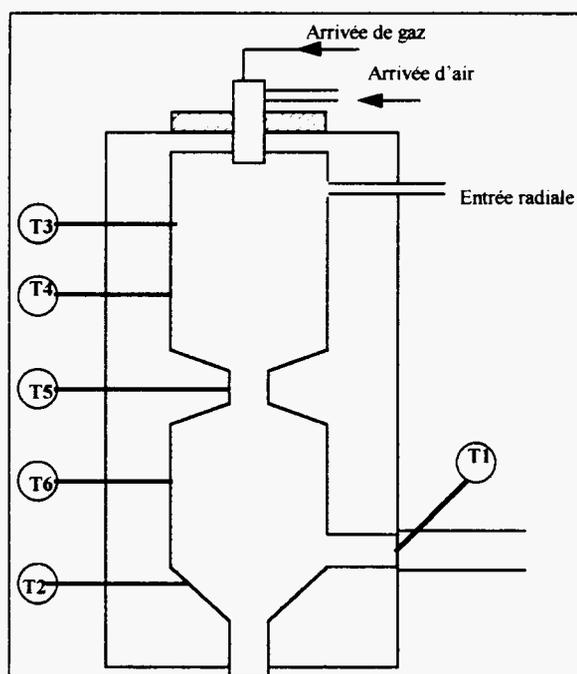


Figure 24 : Disposition des thermocouples le long du four

	Qgaz Nm ³ /h	e %	T1=Tf °C	T2 °C	T3 °C	T4 °C	T5 °C	T6 °C
Essai 1	4,7	36,5	502	376	662	631	960	604
Essai 2	6,4	31,4	680	575	1030	894	1317	880
Essai 3	6,9	40,6	725	631	1118	939	1360	920
Essai 4	2,5	58,0	231	128	562	520	746	452
Essai 5	6,5	-13,4	439	426	844	718	1031	701
Essai 6	5,8	02,8	570	557	1030	902	1297	858
Essai 7	3,8	53,7	396	149	654	625	917	544
Essai 8	6,5	09,4	646	624	1140	984	1428	952
Essai 9	5,6	35,1	630	552	990	888	1307	841

Tableau 10 : Profil de températures le long du four cyclone

Le taux de conversion de SF6 est calculé directement par les relations présentées dans le chapitre 5.6, alors que la température moyenne est évaluée de façon itérative par le logiciel de traitement. Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 11.

D'une manière générale, nous observons que le taux de conversion de SF₆ est d'autant plus important que la température du four est élevée, indépendamment du point d'injection. Nous retrouvons une bonne stabilité thermique du SF₆ pour températures élevées (> 600°C).

De plus, nous constatons que les DRE obtenues par injection radiale du traceur présentent une différence significative comparé à celles obtenues par injection axiale. En effet, le SF₆ contrairement à l'hélium se dégrade thermiquement avec une certaine cinétique.

Au niveau du four, dans le cas d'une combustion complète, ce qui est le cas avec le gaz naturel, la flamme est la zone où la température est la plus élevée. De ce fait le gaz SF₆ injecté dans l'axe vertical du four passe au travers de la flamme contrairement à l'injection tangentielle où le gaz est mélangé avec les fumées. Ces différents essais, montre bien l'intérêt d'utiliser le SF₆ pour déceler des zones à gradients de températures différents.

Par ailleurs, à la lecture des résultats du tableau 11 (comparaison DRE_a essais 5 à 7), nous pouvons constater que la DRE est indépendante de l'excès d'air dans les fumées.

	e %	T _f °C	DRE _a SF ₆ %	T _{lagr.a} °C	T _{flamme} °C	DRE _r SF ₆ %	T _{lagr.r} °C
Essai 1	36,5	502	99,97	> 1000	1740	81,08	855
Essai 2	31,4	680	99,98	> 1000	1780	99,55	966
Essai 3	40,6	725	99,85	> 1000	1700	96,56	931
Essai 4	58,0	231	94,66	863	1600	02,63	657
Essai 5	-13,4	439	99,97	985	< 1300	97,82	902
Essai 6	02,8	570	99,93	975	2000	98,03	924
Essai 7	53,7	396	99,62	967	1620	25,58	765
Essai 8	09,4	646	99,99	> 1000	1930	99,96	995
Essai 9	35,1	630	98,73	> 1000	1760	98,13	988

Tableau 11 : Récapitulatif des résultats DRE et température Lagrangienne

DRE : Destruction Removal Efficiency ou efficacité de destruction, %

T_{lagr.} : Température moyenne Lagrangienne de l'enceinte thermique, °C

T_{flamme} : Température de la flamme, °C

a, r : indices caractérisant respectivement une injection axiale et radiale du gaz traceur

Finalement pour chaque taux de conversion de SF₆ couplé à la DTS correspondante obtenue dans les mêmes conditions opératoires, nous déterminons

la température moyenne Lagrangienne. Nous calculons également la température de flamme en tenant compte de l'excès d'air utilisé lors de ces essais (tableau 11).

Selon le tableau 11, nous constatons que la température moyenne Lagrangienne est toujours comprise entre la température adiabatique de flamme et la température de sortie fumées, et ceci indépendamment du point d'injection. Aussi, la température Lagrangienne obtenue par injection axiale de SF₆ est toujours supérieure à celle obtenue radialement, cela corrobore les résultats discutés précédemment.

Dans certain cas, pour des DTS obtenues axialement, la recherche de la température effective moyenne n'est pas possible, cela est dû certainement au domaine limite de validation des constantes cinétiques déterminées dans la littérature pour des températures ≤ 1100 °C. Ainsi, dans ce cas de figure, nous fixons la température Lagrangienne au delà de 1000 °C.

En conclusion, ces essais montrent parfaitement, la dépendance de la destruction du SF₆ au gradient thermique qui peut exister dans une enceinte, dû soit à un régime thermique non encore établi, soit à des zones plus froides non balayées par les fumées (zones stagnantes). La stabilité de ce gaz à températures élevées permet son utilisation dans des enceintes thermiques avec des niveaux de températures élevées. De plus, la destruction du SF₆ est indépendante de la teneur en oxygène dans les fumées ce qui confirme les informations de la littérature, et valide donc le choix que nous avons fait.

6.1.4 Etude avec le CH₃Cl

La particularité de cette série d'essais, réside dans le fait que le gaz CH₃Cl est injecté dans les mêmes conditions opératoires que les essais précédents, mais séparément des deux autres gaz (He et SF₆). Effectivement, une analyse spectrale de SF₆ pur (figure 25) par le spectromètre de masse montre qu'il existe un pic secondaire de masse 50-51, dont l'intensité est plus importante que le pic principal de CH₃Cl après combustion, d'où l'impossibilité de l'injecter et surtout de le détecter avec le SF₆.

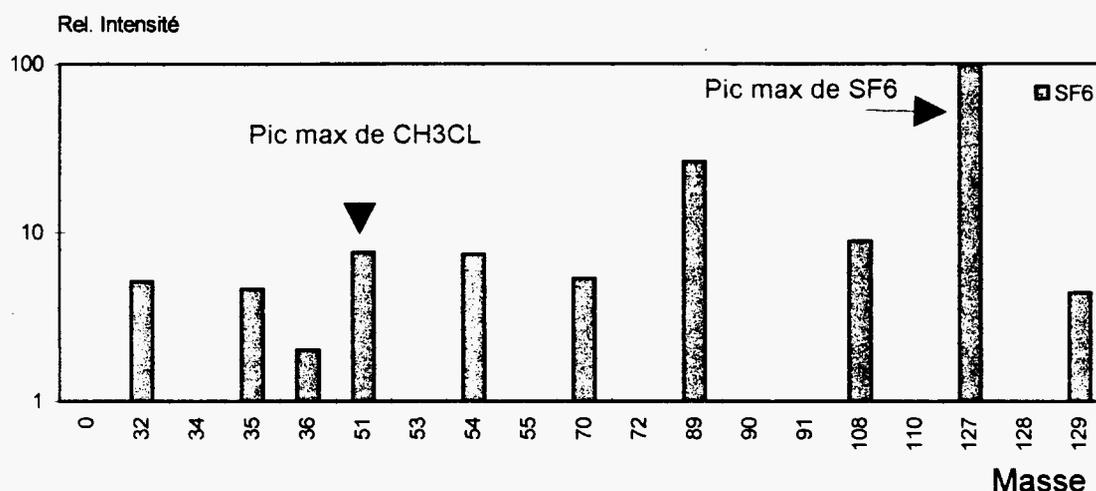


Figure 25 : Analyse spectrale du gaz traceur SF6

L'ensemble des données concernant le CH₃Cl mesurées ou calculées sont regroupées dans le tableau 12.

	Q _{FH} Nm ³ /h	Q _e _{CH₃a} Nm ³ /h	C _e _{SF₆a} %	m _e _{CH₃a} kg/h	m _s _{CH₃a} kg/h	Q _e _{CH₃r} Nm ³ /h	C _e _{CH₃r} %	m _e _{CH₃r} kg/h	m _s _{CH₃r} kg/h
Essai 1	66	1,82	2,67	9,197	0,0001	1,63	2,38	3,723	0,0113
Essai 2	85	0,54	0,63	1,240	0,0007	0,54	0,63	1,240	0,0009
Essai 3	104	0,47	0,45	1,09	0,0031	0,47	0,45	1,090	0,0033
Essai 4	53	1,93	3,52	4,46	0,0016	1,70	3,10	3,920	0,7520
Essai 5	55	0,53	0,95	1,22	0,0003	0,76	1,36	1,750	0,0408
Essai 6	56	1,61	2,81	3,72	0,0022	1,78	3,1	4,106	0,0509
Essai 7	73	1,61	2,17	3,72	0,0021	1,63	2,20	3,765	0,0006
Essai 8	67	0,47	0,70	1,09	0	0,50	0,74	1,156	0,0004
Essai 9	78	0,47	0,60	1,09	0,0004	0,472	0,60	1,09	0,0007

Tableau 12 : Récapitulatif des débits d'injection axiale et radiale de CH₃Cl

Q_{CH_3Cl} : débit volumique de CH_3Cl injecté dans le four, (Nm^3/h)
 C_{CH_3Cl} : fraction volumique de CH_3Cl injectée dans le four, (%)
 m_{CH_3Cl} : débit massique de CH_3Cl injecté dans le four, (kg/h)
 ms_{CH_3Cl} : débit massique axial de CH_3Cl détecté en sortie four, (kg/h)
 a, r : indices caractérisant respectivement une injection axiale et radiale du gaz traceur

Le taux de conversion du CH_3Cl est calculé directement par les relations présentées dans le chapitre 5.7, et les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 13.

Concernant le DRE de CH_3Cl , nous observons dans le tableau 13 les mêmes constatations faites pour le DRE de SF_6 , soit :

- un taux de conversion plus élevé pour des températures plus hautes indépendamment du point d'injection
- un taux de conversion plus élevé dans le cas d'une injection axiale que tangentielle;

Cependant, nous constatons que le taux de dégradation de CH_3Cl est plus important que celui de SF_6 et ceci indépendamment du point d'injection. En effet, le SF_6 est plus stable thermiquement que le CH_3Cl .

	T_f °C	e %	$T_{agr.a}$ °C	$DRE_a CH_3Cl$ %	$T_{agr.r}$ °C	$DRE_r CH_3Cl$ %
Essai 1	502	36,5	> 1000	99,99	855	99,69
Essai 2	680	31,4	> 1000	99,94	966	99,93
Essai 3	725	40,6	> 1000	99,72	931	99,70
Essai 4	231	58,0	863	99,96	657	80,80
Essai 5	439	-13,4	985	99,98	902	97,70
Essai 6	570	2,8	975	99,94	924	98,76
Essai 7	396	53,7	967	99,94	765	99,98
Essai 8	646	9,4	> 1000	100,00	995	99,97
Essai 9	630	35,1	> 1000	99,96	988	99,93

Tableau 13 : Résultats des DRE de CH_3Cl

Les essais d'injection axiale à température élevée ne peuvent mettre en évidence le rôle de la teneur en oxygène dans les fumées, compte tenu de la stabilité limitée du CH_3Cl au delà de 600°C.

Les essais d'injection radiale à température plus faibles mettent en évidence une dépendance avec l'excès d'air du milieu. La comparaison entre les essais 5, 6 et 3, pour des températures Lagrangienne proches et pour des excès d'air respectifs de -13,4; 2,8 et 40,6% montre une DRE qui augmente de 97,7 % à 99,7 %.

Quant à la détermination expérimentale du taux d'oxygène, nous avons couplé le taux de dégradation de CH_3Cl à la température effective (Lagrangienne) et à la courbe de DTS relatives aux essais réalisés, les résultats obtenus donnent des variations de la teneur en oxygène proportionnelle à l'excès d'air mesuré, mais des valeurs absolues trop élevées (valeurs en oxygène de 20 à 150 % calculées par itération).

Nous pensons que les valeurs erronées en oxygène sont dues principalement aux valeurs des constantes cinétiques trouvées dans la littérature. Il serait nécessaire de disposer d'un banc d'essai laboratoire instrumenté pour mesurer précisément la cinétique de dégradation de CH_3Cl pour différentes températures et différents teneurs en oxygène.

Cependant, la méthode actuelle peut fonctionner par détermination d'un seuil minimal au niveau de la DRE qui en cas de dépassement traduirait des conditions pyrolytiques dans l'enceinte thermique. On pourrait ainsi suivre la méthodologie suivante, pour la qualification d'une post-combustion ($T > 850^\circ\text{C}$, 2s et 6% d'oxygène).

a) Traçage à l'hélium pour détermination de l'hydrodynamique interne

b) Injection du SF_6 pour détermination de la température moyenne

c) Injection de CH_3Cl et mesure de la DRE

- si $T_{\text{lagrangienne}} \geq 850^\circ\text{C}$ et $\text{DRE} < \text{DRE}_{\text{SEUIL}}$: Non conformité de l'enceinte (présence poches pyrolytiques)
- si $T_{\text{lagrangienne}} \geq 850^\circ\text{C}$ et $\text{DRE} > \text{DRE}_{\text{SEUIL}}$: Conformité de l'enceinte
- si $T_{\text{lagrangienne}} < 850^\circ\text{C}$ et $\text{DRE} < \text{DRE}_{\text{SEUIL}}$: Non conformité de l'enceinte ($T < 850^\circ\text{C}$)
- si $T_{\text{lagrangienne}} < 850^\circ\text{C}$ et $\text{DRE} > \text{DRE}_{\text{SEUIL}}$: Non conformité de l'enceinte ($T < 850^\circ\text{C}$ mais teneur en oxygène $>$ à 6%)

Le seuil de la DRE pour CH_3Cl devrait être fixé à environ 98 %.

6.1.5 Essais d'incinération de mousse

Dans le but de préparer les essais sur site RHONE POULENC pour la validation de la méthodologie sur un incinérateur de déchets industriels à prédominance aqueuse, nous avons fait quelques essais d'incinération de mousse aqueuse dans l'unité pilote à foyer cyclone, afin d'identifier tout problème concernant la présence d'une forte concentration d'eau dans les fumées.

Nous avons réalisé un mélange diphasique (mousse) à base d'eau, fuel et agent tensio actif de PCI faible (< 2000 kcal/kg)

La mousse est injectée tangentiellement par la canne oxy-mousse et les conditions opératoires de cet essai sont résumées dans le tableau suivant :

Q_{FH} (Nm ³ /h)	$Q_{fumée}$ (m ³ /h)	T_f (°C)	τ (s)	t_s (s)
61	191	587	5,80	5,50

Tableau 14 : Conditions opératoires essai mousse

Trois campagnes d'essais ont été nécessaires afin de modifier la ligne de détection pour gérer le problème de la présence d'une forte teneur en eau dans les fumées. Le tube de silica gel seul ne suffisant pas pour piéger l'eau, nous avons dû rajouter un condenseur/refroidisseur. Nous présentons ci-dessous la courbe de DTS du four cyclone obtenue par une injection tangentielle du gaz vecteur.

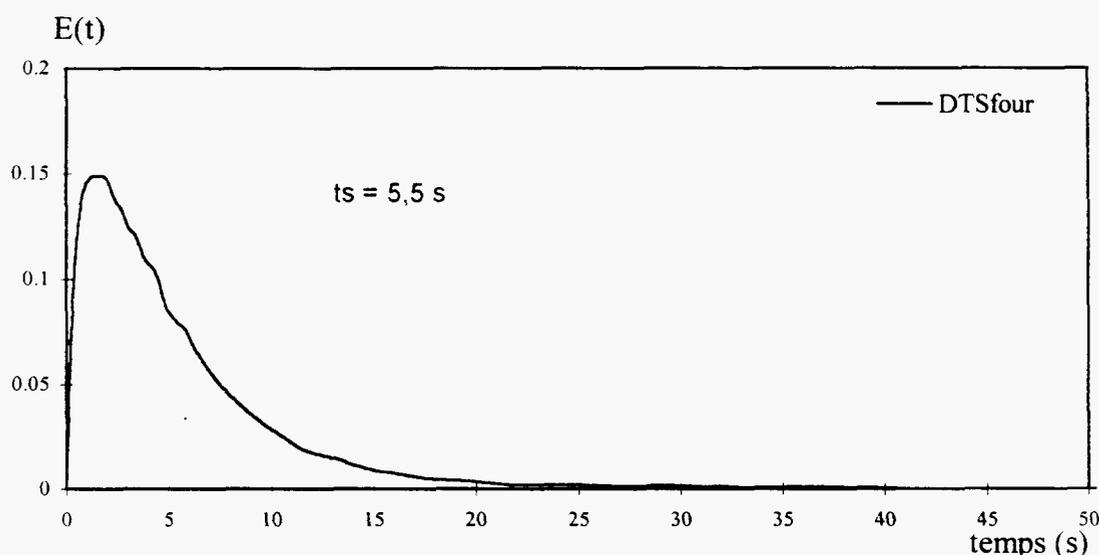


Figure 26 : Courbe de DTS expérimentale du four obtenue avec un écoulement tangentiel

Nous constatons que la courbe de DTS obtenue à partir d'un écoulement de mousse tangentiel présente une traînée à la fin de la courbe, ce qui correspond certainement à la partie haute du four par rapport au point d'injection. De plus ce volume mort associe également celui du cendrier. Afin de comparer l'écoulement axial et

l'écoulement radial, nous présentons ci-après en temps réduit la courbe de DTS mousse ainsi que celle obtenue à partir des essais précédents (essai 2, 188 m³/h, chapitre 6.1.1.4).

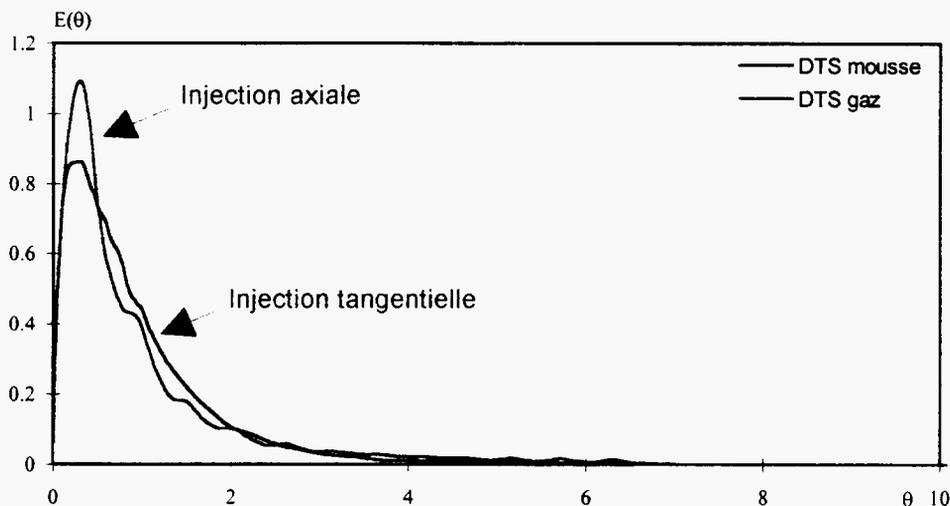


Figure 27 : Comparaison entre DTS axiale et DTS tangentielle

Globalement, nous constatons que les deux courbes présentent des similitudes, mis à part le fait que la DTS tangentielle présente une pente plus faible que celle de la DTS axiale. Cela est dû à l'effet cyclonique des gaz qui empêche une sortie rapide des molécules gazeuses. Nous observons par ailleurs, que les deux courbes présentent une traînée identique. Dans le cas d'un écoulement axial, la traînée s'explique par le volume du cendrier et surtout par l'allure axiale de la flamme qui entraîne un balayage partiel de la chambre de combustion (ceci est identifié par la mesure des températures le long du four).

6.2 ETUDE SUR L'UNITE D'INCINERATION PROCEDIS

Nous appliquons la méthodologie des gaz traceurs développées sur l'unité pilote d'incinération de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC) sur une unité d'incinération à échelle semi-industrielle de PROCEDIS composée d'un four tournant, d'une postcombustion et d'un traitement de fumées.

Cette étude de validation a été réalisée à la fois sur le four de combustion et sur la post-combustion.

6.2.1 Caractérisation de l'hydrodynamique du four tournant et postcombustion

Nous réalisons uniquement l'injection de type Dirac pour la caractérisation du four et de la postcombustion. Nous notons que l'injection de l'hélium s'effectue au niveau de la veine d'air du brûleur. Nous présentons dans cette partie d'étude simplement les résultats finaux des essais expérimentaux. La méthode de traitement des fichiers de données et le mode opératoire des différents essais sont identiques à ceux développés sur le four cyclone.

Nous réalisons trois séries de mesures, une série sur le four tournant à une température de 610 °C et deux séries de mesures sur la postcombustion pour des températures respectives de 660 °C et 840 °C. L'ensemble des paramètres opératoires sont réunis dans le tableau 15 et les courbes de DTS expérimentales correspondantes sont reportées sur les figures 28 à 30.

	Q _{gaz} Nm ³ /h	T _f °C	O ₂ %	Q _{FH} Nm ³ /h	Q _{fumée} m ³ /h	e %	τ s	t _s s
Essai 1	18,4	610	13,0	405	1310	149	15,40	14,66
Essai 2	38,4	660	10,0	632	2160	83	5,05	4,77
Essai 3	42,0	840	09,0	661	2694	69	4,01	3,72

Tableau 15 : Conditions opératoires des essais four PROCEDIS

Avec :

Essai 1 : essai réalisé sur le four rotatif plus le cendrier

Essai 2 : essai réalisé sur la postcombustion à une température de 660 °C

Essai 3 : essai réalisé sur la postcombustion à une température de 840 °C

Nous notons, que le débit de fumées est calculé à partir du taux d'oxygène mesuré en sortie postcombustion par une sonde zirconium.

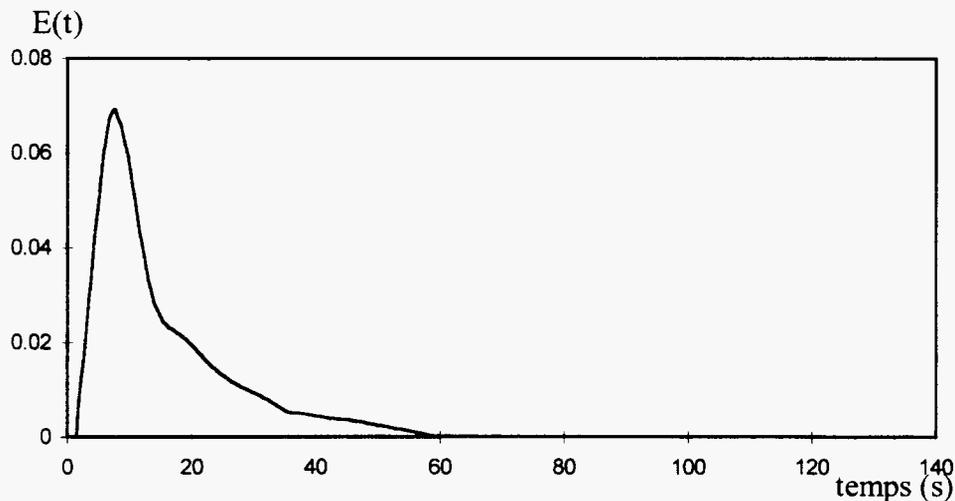


Figure 28 : Présentation de la courbe DTS propre au four Procedis

La courbe DTS expérimentale (figure 28) obtenue sur le four rotatif présente une longue traînée, ce qui correspond à une présence d'une zone stagnante importante. En effet, si on compare le volume du four tournant (2,33 m³) au volume du cendrier (3,27 m³), ce dernier est relativement élevé.

Les fumées traversent le four à une vitesse de 0,6 m/s avec un temps de passage de 6,4 s puis arrivent au cendrier, qui joue le rôle de volume mort et de détente pour les gaz. Ces derniers séjournent en moyenne 9 secondes avant de transfert vers la postcombustion.

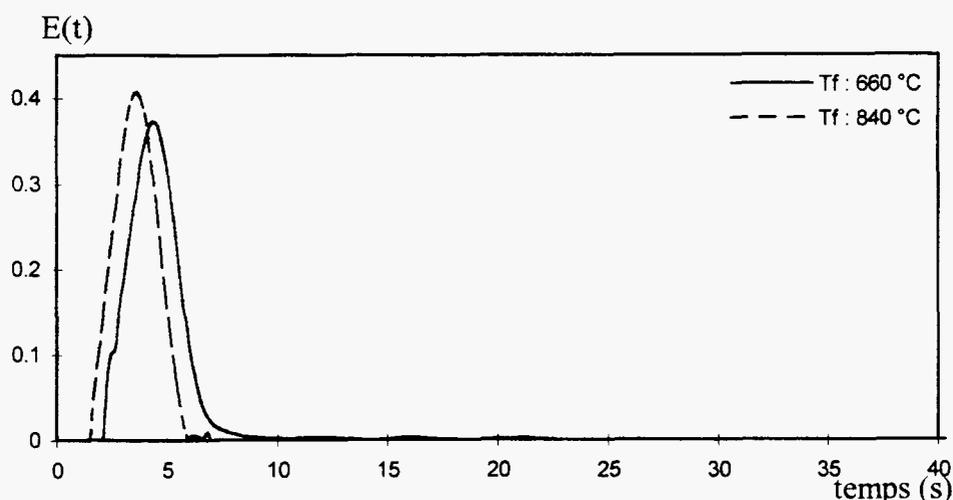


Figure 29 : Comparaison des courbes de DTS expérimentales de la postcombustion du four PROCEDIS à différentes températures

Concernant les essais de DTS sur la post combustion, nous constatons sur la figure 29, que les deux courbes présentent la même structure globale de l'écoulement dans la gamme de température étudiée. Le décalage entre les abscisses des deux courbes est dû à la dilatation thermique des gaz avec la température.

Pour mettre en évidence la non dépendance du débit et de la température sur l'hydrodynamique interne de l'enceinte thermique, nous présentons en figure 30, les deux courbes précédentes mais en temps réduit. Nous observons que les deux courbes sont similaires et ceci confirme les résultats obtenus sur l'unité pilote d'incinération de l'UTC.

Concernant l'allure générale de la courbe, nous trouvons un écoulement piston sans zone stagnante, ni court-circuit caractérisant ainsi un bon dimensionnement de la post-combustion. Les temps de passage et temps de séjours associés sont supérieurs à 2 s mais les conditions opératoires des essais ont été faites pour des puissances inférieures à la puissance nominale de l'unité.

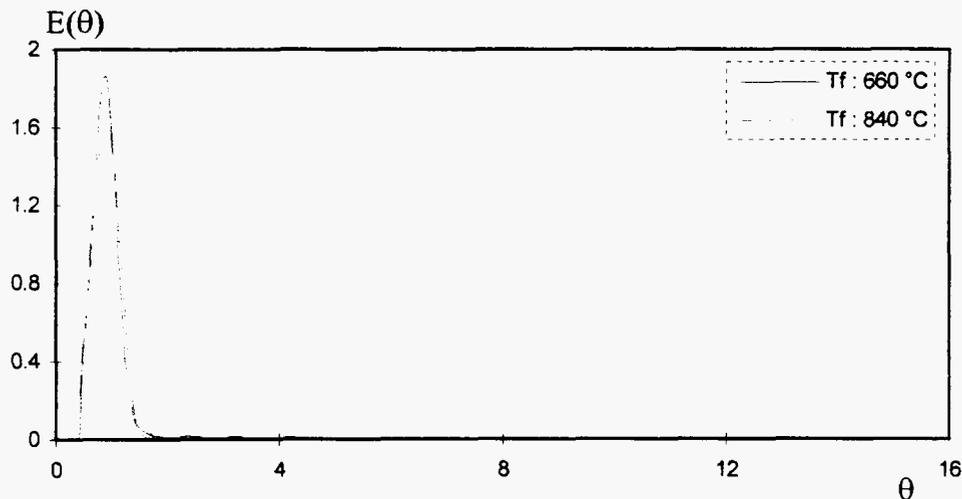


Figure 30 : Comparaison des courbes de DTS en temps réduit du postcombustion à différentes températures

6.2.2 Détermination de la température Lagrangienne du four et du postcombustion

Pour déterminer la température moyenne effective du four et de la postcombustion de PROCEDIS, nous injectons le SF6 en même temps que d'hélium.

Pour le gaz traceur SF6, nous avons testé deux positions différentes; une dans l'axe du brûleur où la température effective obtenue tient compte de la température réelle de la flamme et une autre injection, à côté du brûleur à l'endroit où sont injectés les déchets qui sont pulvérisés.

L'ensemble des données concernant le SF6 mesurées par spectrométrie de masse ou calculées sont regroupées dans le tableau 16.

	Injection axe du brûleur				Injection à côté du brûleur			
	Q_{eSF6a} Nm ³ /h	C_{eSF6a} %	m_{eSF6a} kg/h	m_{SF6a} kg/h	Q_{eSF6r} Nm ³ /h	C_{eSF6r} %	m_{eSF6r} kg/h	m_{SF6r} kg/h
Essai 1	2,57	0,63	16,76	0,037	1,21	0,30	7,89	05,27
Essai 2	2,32	0,37	15,13	0,034	2,32	0,37	15,13	10,14
Essai 3	2,70	0,41	17,60	0,002	2,32	0,35	15,13	00,21

Tableau 16 : Récapitulatif des débits relatifs au traceur SF6

Nous constatons sur le tableau 16 que l'ensemble des concentrations de SF6 utilisées en amont est inférieur à 0,6%, et que nous arrivons par le nouveau spectromètre de masse (ThermoStar) à mesurer des teneurs résiduels de SF6, très faibles.

Les résultats du calcul des taux de conversions de SF6, de la température de la flamme et de la détermination des températures effectives des différents essais sont reportés dans le tableau 17.

	Injection axe du brûleur				Injection à coté du brûleur		
	e (%)	T _f (°C)	DRE _a SF6 (%)	T _{lagr.a} (°C)	T _{flamme} (°C)	DRE SF6 (%)	T _{lagr.r} (°C)
Essai 1	149	610	99,78	910	1080	33,16	750
Essai 2	83	660	99,77	930	1340	32,95	800
Essai 3	69	840	99,99	970	1420	98,60	920

Tableau 17 : Récapitulatif des résultats DRE et température Lagrangienne

Globalement, nous observons que le taux de conversion de SF6 est sensible à la température indépendamment du point d'injection. Nous constatons également que les DRE obtenues par injection dans l'axe du brûleur du traceur SF6 sont plus élevées que celles obtenues par injection à coté du brûleur (en évitant ainsi la température de la flamme).

Nous remarquons que les valeurs des taux de conversions de SF6 obtenues dans le four (Essai 1) et celles obtenues au niveau de la postcombustion (Essai 2) sont sensiblement égaux, car la différence de température des fumées est relativement faible (50 °C).

Quant à la température Lagrangienne déduite pour chaque essai, nous observons qu'elle est toujours comprise entre la température adiabatique de flamme et la température de sortie fumées, indépendamment du point d'injection.

Finalement, nous constatons les mêmes effets que l'étude précédente (sur le four cyclone) concernant la température Lagrangienne obtenue par injection dans l'axe du brûleur ou à coté de ce dernier.

6.2.3 Détermination du taux de conversion de CH₃Cl et du taux d'oxygène

Pour les essais avec CH₃Cl, nous n'avons pu obtenir des débits de gaz importants à cause d'un problème au niveau des bouteilles de CH₃Cl livrées. Nous n'avons donc réalisé que des injections relatives aux essais 1 et 2 et ceci uniquement pour des injections à coté du brûleur. L'ensemble des conditions opératoires et les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 18.

	T _f °C	e (%)	T _{lagr.r} (°C)	Q _e _{CH₃} Nm ³ /h	C _e _{CH₃Cl} %	m _e _{CH₃} kg/h	m _S _{CH₃} kg/h	DRE CH ₃ Cl %
Essai 1	610	149	750	3,62	0,89	8,360	0,033	99,61
Essai 2	660	83	800	3,62	0,57	8,36	0,041	99,51

Tableau 18 : Récapitulatif des résultats DRE de CH₃Cl

Nous constatons sur le tableau 18 que les concentrations de CH₃Cl utilisées sont plus importantes que celles de SF₆, car ce dernier plus stable thermiquement se dégrade moins sous l'effet de température.

Nous constatons sur le tableau 18 que le taux de conversion de CH₃Cl obtenu dans le four rotatif à une température Lagrangienne moyenne (voir tableau 17) de 750 °C est sensiblement plus élevé que celui obtenu dans la post combustion à une température de 800 °C. Cela s'explique d'une part, par le taux d'oxygène plus élevées dans le four rotatif et d'autre part, par un temps de séjour plus long pour le four.

De plus, nous constatons que le taux de dégradation de CH₃Cl est plus important que celui de SF₆ et ceci indépendamment du point d'injection.

7. CONCLUSIONS

L'ensemble des différents résultats présentés dans ce rapport et réalisés sur 2 unités d'incinération ont permis :

- de valider la ligne globale de prélèvement/détection des gaz
- de valider le principe de détection par utilisation d'un spectromètre de masse
- de valider l'utilisation de l'hélium pour la caractérisation de l'hydrodynamique interne
- de valider le choix du SF₆ compte tenu de sa stabilité thermique et de sa non dépendance à la teneur en oxygène dans les gaz, pour la détermination d'une température moyenne lagrangienne.
- de valider le choix d'un gaz de type CH₃Cl, pour la détermination de poches pyrolytiques
- de valider le logiciel d'acquisition et de traitement de données

Concernant l'étude de l'hydrodynamique par traçage à l'hélium, nous disposons de 2 techniques (injection dirac et purge échelon) à utiliser selon le volume de l'enceinte thermique à analyser.

Les études paramétriques présentées ont montré le rôle prépondérant du positionnement de l'injection des déchets dans un four. Grâce à la méthode basée sur 3 gaz, on peut déterminer précisément le parcours des molécules gazeuses issus d'une injection quelconque associé à une température et teneur en oxygène moyenne.

Les résultats obtenus ont montré que l'injection des gaz traceurs devra toujours se faire au niveau de la canne d'injection des déchets, afin de suivre le parcours des produits gazeux de dégradation du déchet.

Par ailleurs, la variation de la température du four par modification de l'excès d'air du brûleur de préchauffage a permis de mettre en évidence des variations du taux de destruction de SF₆, liées à la fois au niveau de température mais également à des gradients de température dans le four entre la flamme et les parois internes du four.

De plus, les essais conduits à différents excès d'air, ont montré que le taux de dégradation du CH₃Cl dépendait à la fois de la température et de la teneur en oxygène dans les fumées.

Les améliorations qui pourraient être conduites sur la méthodologie concerneraient essentiellement la mesure précise des cinétiques de dégradation des espèces réactives retenues. Il faudrait pour cela disposer d'un banc d'essai à l'échelle laboratoire constitué d'un tube en quartz chauffé à haute température, dans lequel on injecterait des mélanges gaz traceur/comburant et pour lequel on mesurerait en

sortie les concentrations résiduelles de l'espèce réactive injectée. On pourrait ainsi déterminer des cinétiques de réaction en milieu pyrolytique et oxydant.

Finalement, à partir de l'ensemble des résultats obtenus, on dispose maintenant d'un outil performant permettant de qualifier des enceintes thermiques et d'optimiser leur conduite en destruction thermique. La méthodologie proposée s'appuie sur un dispositif portable, performant, et convivial permettant des interventions relativement faciles sur site industriel.

8. ANNEXES

ANNEXE 1 : Caractéristiques de l'instrumentation du four

ANNEXE 1 : Caractéristiques de l'instrumentation du four

L'unité d'incinération PROCEDIS dispose des différentes instrumentations suivantes.

FOUR

- instrumentation :
 1. température sortie four T1
 2. pression P

- contrôle/régulation
 1. consigne de température minimale (600 à 800°C) en sortie de four (T1)
régulation sur débit de gaz naturel
 2. consigne de pression (dépression 10 mmCE) en sortie de four (P)
régulation sur vitesse du ventilateur / extracteur
 3. alarme haute de pression
action clapet de sécurité dans partie haute de la post-combustion

POST - COMBUSTION

- instrumentation :
 1. température sortie post-combustion T2

- contrôle/régulation
 2. consigne de température minimale (700 ou 1200°C) en sortie de post-combustion (T2)
régulation sur débit de gaz naturel (QF02)

CHAUDIERE DE RECUPERATION / AEROCONDENSEURS

- instrumentation :
 1. température eau entrée chaudière T3
 2. température eau sortie chaudière T4
 3. température fumées sortie chaudière T5
 4. mesure O₂ sortie chaudière

- **contrôle/régulation**

- 5. consigne d'oxygène en sortie chaudière

- action sur débit d'air entrée post-combustion (QA2)

- 6. température fumées (< 200°C) sortie chaudière T5

- action sur aérocondenseurs (vitesse et nombre)

- 7. alarme haute de température

- action sur pulvérisation d'eau (QH2O)

FILTRE A MANCHES

- instrumentation :

- 1. température fumées sortie filtre à manches (T6)

QUENCH / LAVEUR

- instrumentation :

- 1. température fumées sortie quench (T7)

- 2. pH dans eau du quench

- 3. pH eau du laveur

- 4. niveau d'eau dans cuve quench

- 5. niveau d'eau dans cuve laveur

- **contrôle/régulation**

- 6. consigne de pH dans le quench

- action sur pompe doseuse

- 7. consigne de pH dans le laveur

- action sur pompe doseuse

- 8. niveau bas et haut

- action sur vanne

- 9. niveaux bas et haut

- action sur vanne

RECHAUFFEUR / EXTRACTEUR / CHEMINEE

- instrumentation :
 1. température fumées sortie réchauffeur (T8)
- contrôle/régulation
 2. consigne de température minimale en sortie de réchauffeur (T8)
action sur la puissance des résistances chauffantes