

Métrologie des émissions gazeuses diffuses

Mise en oeuvre sur site et analyse critique



**METROLOGIE DES EMISSIONS GAZEUSES DIFFUSES
MISE EN ŒUVRE SUR SITE ET ANALYSE CRITIQUE**

**DIFFUSE GASEOUS EMISSIONS MONITORING
FIELD EXPERIMENT AND INTERPRETATION**

RAPPORT FINAL

décembre 2014

F. GAUTIER, F. TOGNET - INERIS

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, Métrologie des émissions gazeuses diffuses - Mise en œuvre sur site et analyse critique, 2014, 71 p, n°13-0146/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

RESUME

Les émissions gazeuses diffuses - en particulier de COV - font partie des préoccupations de nombreux professionnels du secteur du traitement des déchets. Cette étude visait à mettre en œuvre certaines des techniques de mesurage d'émissions gazeuses diffuses et à comparer les potentiels et limites des différentes approches métrologiques.

Si les flux détectés sont très faibles (de l'ordre du kg/h), les résultats de cette étude montrent qu'il est bien possible techniquement de déterminer des flux de COV émis par un site de regroupement / tri de déchets dangereux par chacune des méthodes testées. D'après les résultats obtenus, les différentes activités du site occasionnent une élévation des flux en COV émis, tandis que la météo semble moins influencer sur les émissions.

Si l'environnement du site étudié peut être délicat (bruit de fond élevé, encombrement important, inaccessibilité aux zones de dispersion des émissions), la mise en œuvre de chacune des méthodes s'est révélée simple. La détermination des flux émis par un site doit être conduite a minima sur une échelle d'une semaine calendaire incluant les périodes d'activité et de non activité.

MOTS CLES

Emissions diffuses, COV, déchets dangereux,

SUMMARY

VOC atmospheric emissions from dangerous waste storage sites are of great concern. This study aimed at testing different methods for assessing diffuse VOC emissions and comparing their results.

Though detected fluxes range is low, the different methods have shown that it is metrologically possible to assess VOC flux emitted from such industrial sites with a precision of about 1 kg/h. If temperature and wind speed seem to have no influence on emission level, activity on storage tanks has a great impact on emissions. Therefore, it is important to assess fluxes using data acquired on a full week, i.e. including week days and week-end.

If site's surroundings may interfere with the methods (high background VOC concentrations, presence of trees, buildings, etc.), setting up of the different methods has been simple.

KEY WORDS

Diffuse emissions, VOC, dangerous waste

RAPPORT D'ÉTUDE
N° DRC-14-135509-10768A

30/09/2014

**METROLOGIE DES EMISSIONS DIFFUSES –
MISE EN ŒUVRE SUR SITE ET ANALYSE
CRITIQUE**

METROLOGIE DES EMISSIONS DIFFUSES
MISE EN ŒUVRE SUR SITE ET ANALYSE CRITIQUE

RECORD
Campus LyonTech La Doua
CS52132
69603 VILLEURBANNE cedex

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

François GAUTIER, Frederic TOGNET, Laurent LETINOIS, Bruno BROUARD-FOSTER, Faustina FUVEL

SOMMAIRE

1	Contexte de l'étude	13
2	Description du site d'étude	15
3	Phase 1 : précampagne, juillet 2013.	17
3.1	Mesures au niveau de la source	17
3.1.1	Mesures PID.....	17
3.1.2	Analyses quantitatives des sacs Tedlar:	20
3.2	Mesures sous les vents du site.....	22
4	Phase 2 : campagne réalisée du 30 août 2013 au 5 septembre 2013.....	23
4.1	Suivi des niveaux de concentrations en COV en sortie du bâtiment des fosses	23
4.2	Méthode « repère »: méthode Solar Occultation Flux (SOF)	29
4.2.1	Principe	29
4.2.2	Mise en œuvre.....	30
4.2.3	Résultats	31
4.3	Méthode 1: méthode dite « de base » avec mesures de concentration en point fixe (COVt) et modélisation de la dispersion	35
4.3.1	Principe	35
4.3.2	Mise en œuvre.....	35
4.3.3	Description des modèles de dispersion disponibles.....	37
4.3.4	Choix du modèle de dispersion.....	39
4.3.5	Résultats	39
4.4	Méthode 2: méthode "de base" améliorée par l'utilisation d'un gaz traceur à débit connu pour évaluer les conditions de dispersion	47
4.4.1	Principe	47
4.4.2	Mise en œuvre.....	47
4.4.3	Résultats	47
4.5	Méthode 3: MeFTIR, mesure mobile concomitante de concentration (COVt ou COV spécifique) et d'un gaz traceur à débit connu.....	50
4.5.1	Principe	50
4.5.2	Mise en œuvre.....	51
4.5.3	Résultats	52
5	Comparaison des méthodes.....	55
5.1	Méthode 1.....	55
5.2	Méthode 2.....	55
5.3	Méthode 3.....	57
5.4	Ensemble des méthodes	57
6	Conclusion	60
7	Annexes.....	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : localisation des sources majeures de COV sur le site d'étude	15
Figure 2 : localisation des fosses de réception et de mélange – Zone de dépotage des boues	16
Figure 3: suivi dynamique des mesures indicatives de COV totaux autour des fosses de réception et de mélange	19
Figure 4 : parcours suivi (pointillés jaunes) – mesures PID extérieures.....	22
Figure 5 : suivi dynamique des mesures indicatives de COV totaux sous les vents des fosses (11/07/2013).....	22
Figure 6: suivi continu par analyseur PID des concentrations indicatives à l'émission des bâtiments – exemple de mise en œuvre	23
Figure 7 : suivi des températures de l'air extérieur.....	24
Figure 8 : suivi des vitesses du vent.....	24
Figure 9 : roses des vents des périodes étudiées	25
Figure 10: suivi des concentrations indicatives en COV – 2 septembre 2013.....	26
Figure 11: suivi des concentrations indicatives en COV – 3 septembre 2013.....	26
Figure 12: suivi des concentrations indicatives en COV – 4 septembre 2013.....	26
Figure 13: suivi des concentrations indicatives en COV – 5 septembre 2013.....	26
Figure 14 : distribution statistique des concentrations indicatives en COV – mesures PID	27
Figure 15: représentation schématique du mode de fonctionnement de la méthode SOF (illustration au cas d'un site industriel)	29
Figure 16: Illustration du principe de calcul des flux	30
Figure 17: exemple de transect SOF (champ large).....	31
Figure 18: exemple de transect SOF (champ proche).....	32
Figure 19: flux de COV émis (kg/h) en fonction de l'heure de la journée – méthode SOF	32
Figure 20: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 2 septembre 2013	33
Figure 21: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 3 septembre 2013	33
Figure 22: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 4 septembre 2013	33
Figure 23: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 5 septembre 2013	33
Figure 24 : représentation statistique des résultats SOF	34
Figure 25 : Schéma illustratif du principe de la méthode 1	35
Figure 26: montage mesures FTIR statiques	36
Figure 27: localisation des emplacements de mesure utilisés.....	36
Figure 28: vue sur le bâtiment des fosses depuis l'emplacement 1	37
Figure 29: vue en direction du bâtiment des fosses depuis l'emplacement 2	37
Figure 30: modélisations dynamiques des concentrations aux emplacements de mesure – modèle lagrangien MSS	40
Figure 31 : résultat de modélisation de la dispersion atmosphérique des émissions (instantané).....	41
Figure 32 : test de différents paramètres sur les résultats de la modélisation – essai n°442	
Figure 33 : cartographie modélisation ADMS – essai 1	44
Figure 34 : cartographie modélisation ADMS – essai 4	44
Figure 35: Montage du MeFTIR – unité mobile de mesure	50

Figure 36: illustration du mode de fonctionnement du meFTIR (illustration au cas des COV diffus au stockage d'une unité chimique)	51
Figure 37: flux de COV émis (kg/h) en fonction de l'heure de la mesure – méthode MeFTIR.....	52
Figure 38: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode 3 – 3 septembre 2013	53
Figure 39: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode 3 – 4 septembre 2013	53
Figure 40: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode 3 – 5 septembre 2013	53
Figure 41 : comparaison des résultats de la méthode 1 avec ceux de la méthode repère	55
Figure 42 : comparaison des résultats de la méthode 2 avec ceux de la méthode repère	56
Figure 43 : comparaison des méthodes SOF et MeFTIR (hors WE et Vendredi)	57
Figure 44 : comparaison de l'ensemble des résultats.....	57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques du bâtiment des boues	15
Tableau 2: résultats des mesures indicatives de COV totaux autour des fosses	18
Tableau 3: analyse de la composition chimique des gaz	20
Tableau 4 : comparaison résultats PID et GC-MS	21
Tableau 5 : statistiques des concentrations indicatives en COV – mesures PID	27
Tableau 6 : plan d'échantillonnage – méthode SOF	30
Tableau 7 : flux journalier moyens de COV déterminé par la méthode SOF	31
Tableau 8 : statistiques sur les flux de COV déterminés par la méthode SOF	34
Tableau 9 : résultats de mesure – méthode 1 (modèle lagrangien)	40
Tableau 10 : flux de COV émis lors de l'essai 4 suivant différentes configurations.....	42
Tableau 11 : résultats de mesure – méthode 1 (modèle gaussien)	45
Tableau 12 : résultats – méthode 2	47
Tableau 13 : calculs des flux de COV moyens émis à partir des débits de gaz traceur...	56
Tableau 14 : synthèse.....	59

1 Contexte de l'étude

Les émissions gazeuses diffuses - en particulier de COV - font partie des préoccupations de nombreux professionnels du secteur du traitement des déchets. Elles font partie des rejets des installations et leur surveillance est un enjeu environnemental et réglementaire. Contrairement aux émissions canalisées, le mesurage de ces émissions diffuses reste difficile. Les retours d'expérience mettant en œuvre plusieurs techniques sur un même site industriel sont quasiment inexistantes. Dans ce contexte, cette étude comprend :

- la mise en œuvre concrète de certaines des techniques de mesurage d'émissions gazeuses diffuses, présentées ou non, dans l'état de l'art RECORD N° 08-0137/1A (avril 2011)¹
- la comparaison des potentiels et limites des différentes approches métrologiques permettant de quantifier les émissions diffuses, en prenant en compte différents objectifs liés à cette quantification.

Cette étude s'est déroulée suivant quatre phases :

- un pré-diagnostic préparatoire à la campagne de mesure,
- la réalisation des mesures de terrains,
- une étude critique des résultats obtenus,
- une analyse des coûts/difficultés des méthodes dans l'optique d'un déploiement sur plusieurs sites.

On peut distinguer deux grands types de méthodes de quantification des émissions diffuses : les méthodes à la source et les méthodes périmétriques. Cette étude propose de comparer différentes approches périmétriques pour le cas d'un site de collecte. Les méthodes périmétriques sont basées sur des mesures autour de la source. On y distingue les méthodes directes basées sur une mesure de vitesse et sur une concentration dans une section définie du panache de dispersion afin de calculer un flux, et les méthodes indirectes basées sur la mesure de concentrations dans l'environnement et la détermination des paramètres de dispersion pour remonter au flux :

$$C = \alpha E$$

Dans le cadre de ce projet une méthode périmétrique directe servira ici de référence (méthode SOF) dont les résultats seront comparés à différentes méthodes indirectes :

- Méthode 1 : Détermination du facteur de dispersion α par modélisation et mesures des paramètres météorologiques et des concentrations de COVT dans l'air ambiant. Pour cette méthode deux types de modèles seront utilisés Lagrangien et Gaussien et les calculs seront conduits à partir de période d'échantillonnage de courtes durées et sur les moyennes des concentrations mesurées et modélisées sur ces périodes.
- Méthode 2 : identique à la méthode 1 mais complétée par l'utilisation d'un gaz traceur pour évaluer la représentativité des hypothèses de modélisation. Mesures en point fixe des concentrations de COVT et du gaz traceur dans l'air ambiant.
- Méthode 3 : Détermination du facteur de dispersion α par utilisation d'un gaz traceur (N_2O) dans la source et mesures mobiles des concentrations de COVT et N_2O dans l'air ambiant.

¹ Etude RECORD 08-0137/A « Métrologie des émissions diffuses de poussières et de gaz – flux et composition- des centres de traitement ou stockage de déchets et des sites pollués. Etat des connaissances ». Synthèse disponible en ligne : http://www.record-net.org/record/synthPDF/Synth_record08-0137_1A.pdf

2 Description du site d'étude

La sélection du site d'étude a été réalisée sur la base des critères suivants :

- volontariat de l'industriel pour la réalisation des mesures,
- représentativité du site vis-à-vis du parc français d'installations de même rubrique et activités,
- environnement du site peu complexe (topographie, autres activités industrielles, etc.).

Le site d'étude retenu est autorisé à réaliser le mélange de produits dangereux de catégories différentes et le mélange de déchets dangereux avec des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets. Il comporte différentes sources d'émission potentielle de COV, décrites dans la figure ci-dessous :



Figure 1 : localisation des sources majeures de COV sur le site d'étude

D'après le retour d'expérience de l'industriel, basé sur des campagnes de mesure précédentes, la zone de dépotage des boues représente la source continue et majeure de COV. Ses caractéristiques sont présentées ci-dessous :

Tableau 1 : caractéristiques du bâtiment des boues

	Zone de dépotage
Type d'activité	Dépotage et stockage de liquides, de boues et de broyats
Situation de la zone	Bâtiment ouvert sur une façade à l'ouest, présence de deux portes d'accès camion au Sud et au Nord
Volume du bâtiment	8 900 m ³
Superficie des ouvrants	240 m ² (facade ouverte ouest) + 2*16m ² (portes Sud et Nord)
Ventilation du bâtiment	Naturelle
Exposition au vent	Oui

La zone de dépotage est localisée dans un bâtiment d'un volume d'environ 8 900 m³ ouvert sur une façade. Les émissions de COV proviennent de sept fosses contenant des déchets liquides ou solides, par évaporation de surface des fosses au repos, par émissions lors des opérations de dépotage et de mélange à la pelle mécanique. Chacune de ces fosses est équipée d'un capotage permettant de limiter les échanges avec l'air extérieur. Ces capots rétractables sont ouverts ou fermés en fonction des opérations conduites sur les fosses.

Une description plus précise des fosses ainsi que leurs localisations dans le bâtiment sont présentées ci-après :

Zone de dépotage	Caractéristiques	Type d'émissions de COV
Fosses	4 fosses réception déchets liquides exposées à l'air libre (4 * 21 m ²)	- évaporation de surface - émissions par mouvement lors d'un dépotage
	3 fosses mélange boues et broyats exposées à l'air libre (2 * 21 m ² + 1 * 30 m ²)	- évaporation de surface - émissions par mouvement lors d'un dépotage - émissions par mouvement lors d'une opération à la pelle mécanique

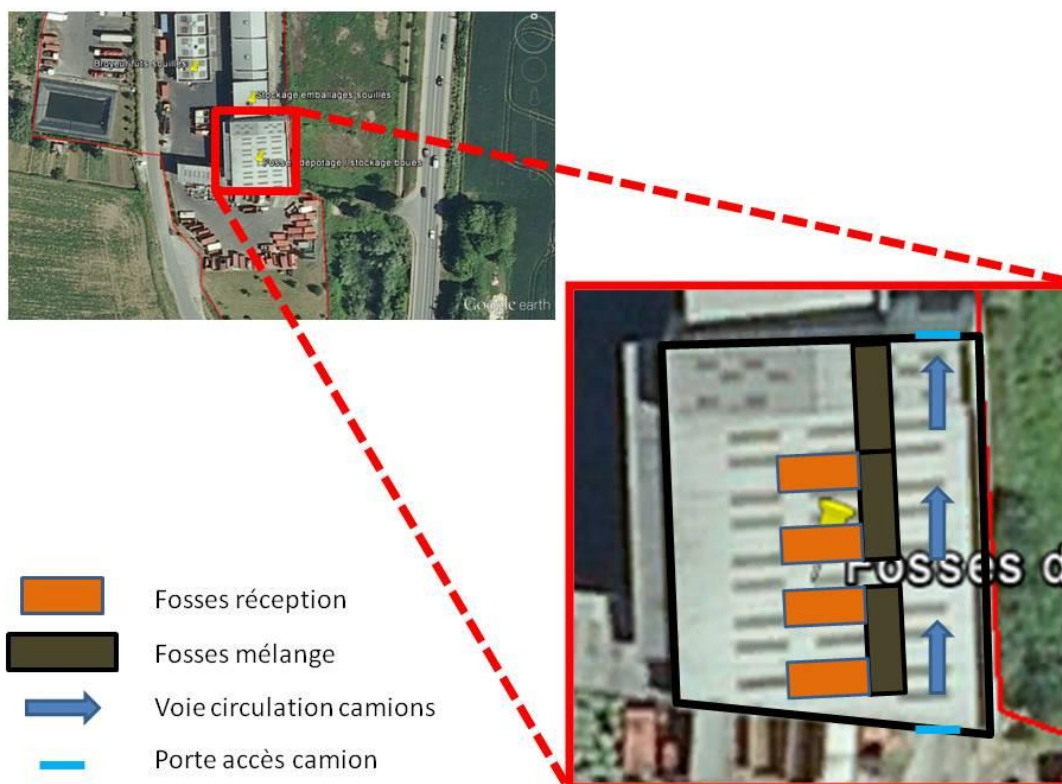


Figure 2 : localisation des fosses de réception et de mélange – Zone de dépotage des boues

3 Phase 1 : précampagne, juillet 2013.

Cette étape visait à exploiter toutes les informations déjà existantes sur la caractérisation chimique des émissions du site retenu et identifier ainsi les domaines pour lesquels des travaux complémentaires étaient nécessaires.

Les documents suivants ont été collectés auprès de l'industriel le 16/04/2013 :

- Evaluation des émissions de COV issues des zones de dépotage et de déconditionnement. Propositions de solutions de réduction ou de captation des émissions sur les sources ciblées, septembre 2009,
- Résultats de screening des COV en zone dépotage, rapport APAVE, juillet 2013.

A la lecture des documents transmis, il s'avère que de nombreuses informations sont disponibles, vis-à-vis de la composition chimique des émissions ou de l'estimation des flux émis par les fosses :

- composition chimique des émissions: la plupart des données concernent des mesures qualitatives, c'est-à-dire qui listent les différents composés détectés dans les émissions sans en connaître les concentrations massiques correspondantes. Ces données permettent cependant d'avoir une idée des molécules potentiellement émises par les sources. Ce sont principalement des molécules typiques des solvants de peinture ou de produits industriels: toluène, xylène, décane, etc. Il manque cependant une information importante sur la part relative de chacun de ces composés, ceci afin de déterminer le composé majeur contenu dans ces émissions pour éventuellement identifier un traceur typique de l'activité,
- estimation des flux émis par les fosses: la méthodologie développée et mise en œuvre par l'industriel est une première approche qui permet de pouvoir se positionner quant aux niveaux de flux de COV émis (de l'ordre de quelques kg/h). Elle consiste à coupler mesure au PID à hauteur d'homme autour des fosses, composition chimique des déchets et calculs de perte de masse (COV). Ces mesures ont cependant été réalisées avant capotage des fosses. Les flux émis actuellement peuvent donc être très en deçà de ce qui a pu être déterminé à cette période.

Compte tenu de ces éléments, une précampagne a été réalisée sur le site retenu le 11/07/2013 afin d'apporter un complément d'information à ces données.

3.1 Mesures au niveau de la source

3.1.1 Mesures PID

Cette étude a consisté à mettre en œuvre la même méthodologie de détermination des flux émis par les fosses développée par l'industriel. Elle a consisté à réaliser à hauteur d'homme autour des fosses (réception / mélange) des mesures indicatives au PID (Photo Ionization Detector) étalonné à l'isobutylène. Le parcours au PID autour des fosses avait une durée de l'ordre de vingt minutes. Il est à noter que le jour de ces mesures, la plupart des fosses étaient pleines, c'est-à-dire représentatives de conditions normales d'exploitation.

Autour des fosses de réception, les niveaux de concentration à une hauteur de 1,5 m sont globalement faibles, inférieurs à 10 ppm, ce qui est légèrement inférieur aux concentrations mesurées en 2008 (entre 7 et 15 ppm). Quelques activités particulières peuvent occasionner une élévation des concentrations, telles les apports de broyats de pots, etc.

Autour des fosses de mélange, les niveaux de concentration à une hauteur de 1,5 m sont plus élevés, mais restent inférieurs à 30 / 40 ppm.

Les résultats des trois parcours réalisés sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau 2: résultats des mesures indicatives de COV totaux autour des fosses

		Parcours n°1	Parcours n°2	Parcours n°3
Date / heure		11/07/2013 10h02 à 10h26	11/07/2013 10h35 à 10h56	11/07/2013 13h59 à 14h19
Mesures autour des fosses de réception				
Concentration en COV (ppm)	Moyenne	6,1	3,9	4,8
	5 ^{ème} centile	3,7	0,9	1,2
	25 ^{ème} centile	4,7	1,7	3,2
	Médiane	5,9	3,5	4,6
	75 ^{ème} centile	8,0	5,5	6,3
	95 ^{ème} centile	10,7	8,6	8,7
Mesures autour des fosses de mélange				
Concentration en COV (ppm)	Moyenne	10,4	12,4	9,8
	5 ^{ème} centile	2,2	2,5	2,7
	25 ^{ème} centile	3,2	4,3	5,0
	Médiane	5,5	9,2	9,2
	75 ^{ème} centile	9,7	16,3	14,6
	95 ^{ème} centile	26,8	39,5	17,4

Les suivis dynamiques de ces trois parcours sont présentés en figure suivante:

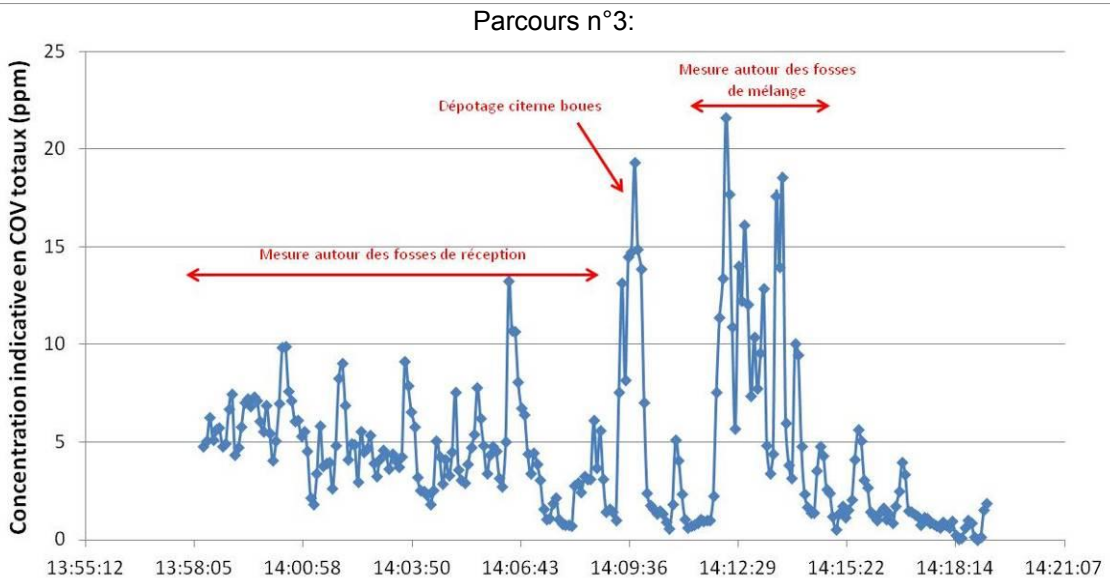
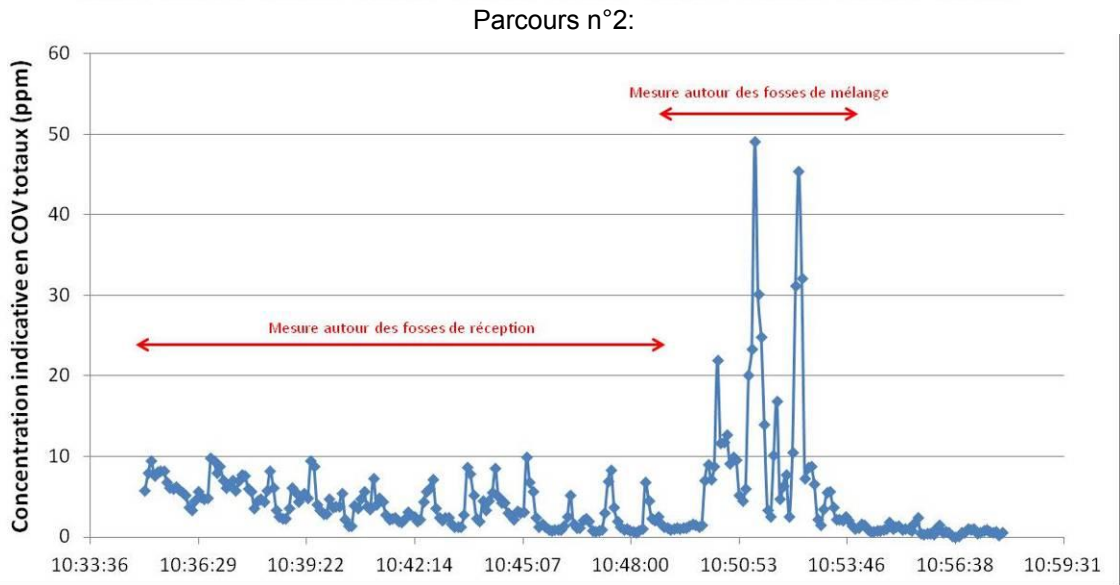
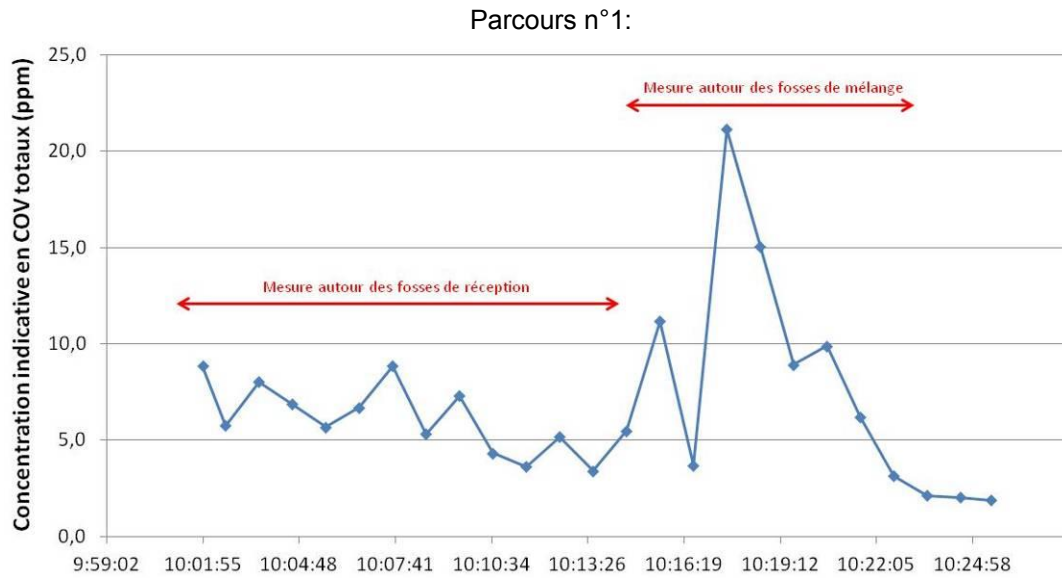


Figure 3: suivi dynamique des mesures indicatives de COV totaux autour des fosses de réception et de mélange

3.1.2 Analyses quantitatives des sacs Tedlar:

Au cours de deux parcours précédents, l'air prélevé et échantillonné par le détecteur PID a été collecté dans un sac Tedlar directement en sortie de pompe interne de l'instrument pour analyse quantitative par GC-MS. Un troisième sac a été prélevé au niveau de la porte arrière, là où sortaient les émissions le jour des mesures. Ces trois sacs Tedlar ont été analysés par GC-MS.

Tableau 3: analyse de la composition chimique des gaz

Composé identifié	Parcours n°2		Parcours n°3		Porte Nord	
	Conc en ppb	Conc en µg/m ³	Conc en ppb	Conc en µg/m ³	Conc en ppb	Conc en µg/m ³
<i>m/p-xylene</i>	91,1	402,5	98,0	433,0	211,7	934,8
<i>n-octane</i>	78,9	375,0	26,4	125,3	27,7	131,5
<i>n-decane</i>	62,0	367,1	68,3	404,1	145,2	859,4
<i>n-nonane</i>	56,7	302,5	47,4	252,8	88,8	473,3
<i>styrene</i>	69,7	302,0	53,4	231,5	91,9	398,0
<i>toluene</i>	73,8	283,5	79,8	306,5	136,2	522,8
1-ethyl,3-methylbenzene	34,0	169,8	30,2	150,9	49,9	249,4
<i>o-xylene</i>	38,3	169,2	35,4	156,3	39,6	175,1
1-ethyl,2-methylbenzene	31,8	158,8	32,8	164,2	58,5	292,7
<i>ethylbenzene</i>	34,9	154,0	36,3	160,2	92,4	407,9
1,2,4-trimethylbenzene	29,2	145,8	31,7	158,5	56,3	281,6
1,3,5-trimethylbenzene	24,9	124,4	22,7	113,6	38,4	192,1
<i>n-propylbenzene</i>	20,9	104,5	20,1	100,3	10,1	50,7
<i>cyclohexane</i>	19,9	83,0	7,6	31,6	12,1	50,6
<i>undecane</i>	10,7	69,3	10,5	68,1	21,0	136,7
<i>methylethylbenzene</i>	13,8	69,0	12,5	62,4	20,1	100,5
1-ethyl,4-methylbenzene	12,0	59,9	10,6	53,1	20,0	100,1
<i>dodecane</i>	8,3	58,7	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>methylcyclohexane</i>	14,0	57,0	10,4	42,5	14,3	58,4
1,4-diethylbenzene	10,0	56,0	6,0	33,6	13,3	74,5
<i>cis 2-pentene</i>	18,4	53,7	6,7	19,4	4,8	13,9
<i>n-heptane</i>	7,6	31,7	6,5	27,0	7,4	30,8
2-methylheptane	5,5	26,1	4,9	23,4	4,1	19,4
1,3-diethylbenzene	4,1	22,6	4,9	27,2	9,2	51,6
1,2,3-trimethylbenzene	4,5	22,6	3,9	19,5	7,6	38,1
2-méthylpentane+2,3-dimethylbutane	6,0	21,7	3,8	13,7	7,1	25,5
isooctane(2,2,4-trimethylpentane)	4,2	20,0	4,6	21,7	2,1	10,2
<i>n-hexane</i>	5,5	19,6	5,2	18,7	3,8	13,8
3-methylheptane	4,0	19,0	2,8	13,5	2,7	12,8
isopentane(2-methylbutane)	6,1	18,2	2,2	6,7	3,8	11,5
3-methylhexane	4,2	17,6	2,9	12,1	4,3	17,9
<i>n-pentane</i>	5,8	17,3	3,0	9,0	4,5	13,5
2-methylhexane	3,3	13,9	2,1	8,7	3,4	14,3
3-methylpentane	3,6	12,8	1,5	5,3	2,6	9,4
<i>n-butane</i>	5,0	12,1	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>benzene</i>	3,1	10,1	2,0	6,5	2,2	7,2
1-pentène	3,4	9,9	7,3	21,3	7,0	20,5
2,3,4-trimethylpentane	1,9	8,8	1,7	8,2	1,0	4,7
methylcyclopentane	2,5	8,7	1,8	6,2	2,5	8,9
trans2-butene	2,8	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0

Nota : les composés *en vert* sont ceux dont les facteurs de réponse PID sont connus

Les deux sacs prélevés lors de la circulation autour des différentes fosses conduisent à une composition chimique relativement comparable. Le sac prélevé au niveau de la porte conduit à des concentrations sensiblement supérieures, ce qui est cohérent avec les résultats du suivi PID autour des fosses, puisqu'on se situe ici sous les vents des fosses de mélange.

A partir des données d'analyse de la composition chimique des gaz échantillonnés et des facteurs de réponse (CF_i) au PID spécifique à chaque composé, il est possible d'estimer le facteur de correction du mélange ($FC_{mél}$) et une concentration totale corrigée ($[COV_{PID}]_{lue\ eq. \text{ Isobutylène}}$) qui aurait du être obtenue à partir des formules suivantes :

$$FC_{mél} = 1 / (\sum(X_i/CF_i))$$

$$[COV_{PID}]_{lue\ eq. \text{ Isobutylène}} = [COV] \text{ réelle} / FC_{mél}$$

Avec X_i la fraction molaire du produit i dans le mélange. Il est à noter que seuls les composés dont le facteur de réponse est connu (cf. Tableau 3) ont été retenus. Pour tous les autres, un facteur de correction de 0 a été arbitrairement affecté, ce qui ne permet pas d'en tenir compte dans ces calculs. On obtient ainsi les résultats suivants :

Tableau 4 : comparaison résultats PID et GC-MS

	Parcours n°2	Parcours n°3	Porte Nord
Données analyseur PID			
Concentration moyenne en COV mesurée (ppm)	4,6	4,7	7,3
Données analyses par chromatographie (GC-MS)			
Concentration moyenne en COV (ppm) – GC/MS	1,8	1,2	2,2
Composés détectés par GC-MS et avec facteur de réponse PID			
% molaire des COV totaux représentés par des composés chimiques avec FC PID connus	35 %	47 %	46 %
Calculs			
Facteur de correction PID du mélange (estimation)	1,8	1,2	1,2
Concentration PID moyenne théorique (ppm)	1,0	1,0	1,8

On remarque sur le tableau précédent que d'après les analyses réalisées sur les sacs, les concentrations PID théoriques qui auraient du être détectées sont plus faibles que celles réellement mesurées par le PID. Ceci peut s'expliquer par :

- le faible nombre de composés détectés en GC-MS et pour lesquels le facteur de correction PID est connu. Ainsi, pour les trois prélèvements, moins de 50 % des composés disposent d'un facteur de réponse ; les concentrations composées peuvent de fait être mal estimées,
- la non-détection en GC-MS de composés occasionnant un signal sur le PID.

En concentration massique (déterminée par GC-MS), les principaux composés détectés dans les émissions sont les suivants:

- m/p xylènes,
- n-decane,
- toluène.

3.2 Mesures sous les vents du site

Des mesures au PID ont également été réalisées sous les vents du site, à hauteur d'homme et à des distances variables, suivant le parcours présenté en figure suivante :



Figure 4 : parcours suivi (pointillés jaunes) – mesures PID extérieures

Ces mesures ont permis de détecter la contribution du site au niveau des limites de propriété. Le suivi des concentrations le long de ce parcours est présenté en figure suivante:

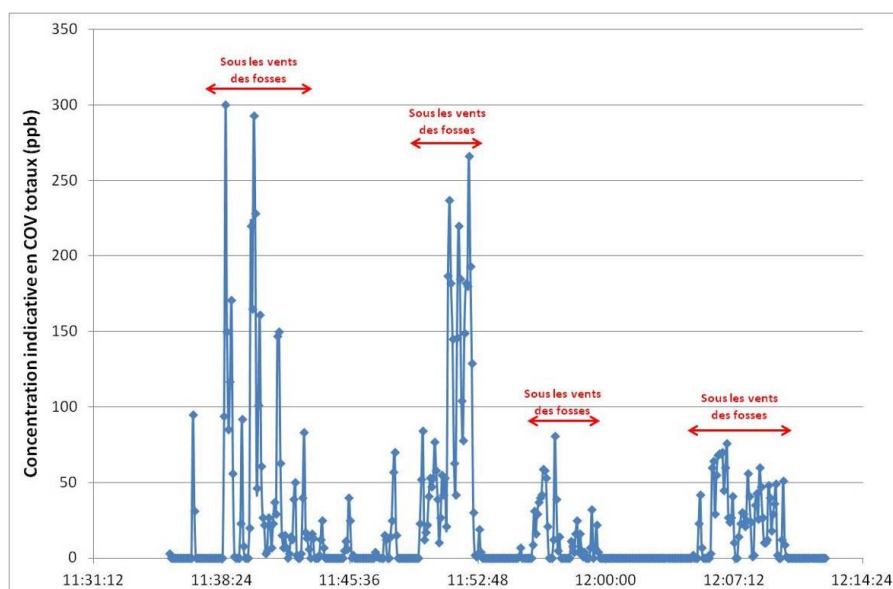


Figure 5 : suivi dynamique des mesures indicatives de COV totaux sous les vents des fosses (11/07/2013)

Les concentrations détectées en limite de propriété (50 mètres des fosses) sont très faibles, de l'ordre de 30 ppb en moyenne, avec des pics à 150-200 ppb lorsque la direction de dispersion est stable (par vents faibles). Il est à noter que le panache peut être déjà dispersé en hauteur à cette distance.

4 Phase 2 : campagne réalisée du 30 août 2013 au 5 septembre 2013.

Afin de suivre en continu la dynamique des flux de COV émis par le bâtiment des fosses (liée majoritairement aux activités qui y sont menées), il a été retenu comme hypothèse que les niveaux de concentration en COV au sein du bâtiment des fosses devaient être corrélés aux niveaux d'émissions de COV correspondants. Par conséquent, le suivi de la dynamique des concentrations en COV au niveau des ouvertures par lesquelles l'air du bâtiment est évacué peut renseigner sur les niveaux d'émission de COV correspondantes.

4.1 Suivi des niveaux de concentrations en COV en sortie du bâtiment des fosses

Afin de suivre en continu et de manière qualitative les niveaux de concentrations en COV de l'air sortant du bâtiment des fosses, un analyseur PID a été mis en œuvre en continu au niveau de l'ouverture par laquelle l'air du bâtiment était évacué vers l'extérieur, comme présenté en figure suivante :



Figure 6: suivi continu par analyseur PID des concentrations indicatives à l'émission des bâtiments – exemple de mise en œuvre

Les conditions extérieures de vent n'ayant pas été les mêmes durant toute la période suivie, il est à noter que l'emplacement de ces mesures a été constamment modifié au gré des variations de l'écoulement de l'air au sein du bâtiment, mais en cherchant à maintenir au maximum ces mesures au niveau de la zone de sortie de l'air chargé en COV et issu du bâtiment.

En faisant l'hypothèse que le taux de renouvellement de l'air au sein du bâtiment des fosses reste globalement constant, on peut considérer que le flux de COV émis par le bâtiment est proportionnel au niveau de concentration en COV dans le bâtiment.

La température ambiante et la vitesse du vent font partie des principaux paramètres pouvant influencer sur l'émissivité des fosses. Le suivi de ces deux paramètres au cours des différentes journées de mesure a été permis par la mise en œuvre sur le site d'étude durant toute la campagne d'une station météorologique complète répondant aux standards Météo France. Le suivi de ces deux paramètres est présenté ci-après.

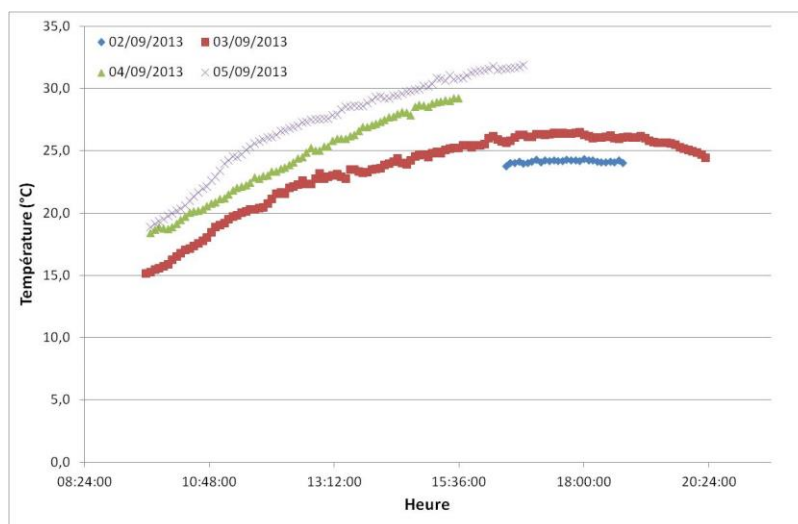


Figure 7 : suivi des températures de l'air extérieur

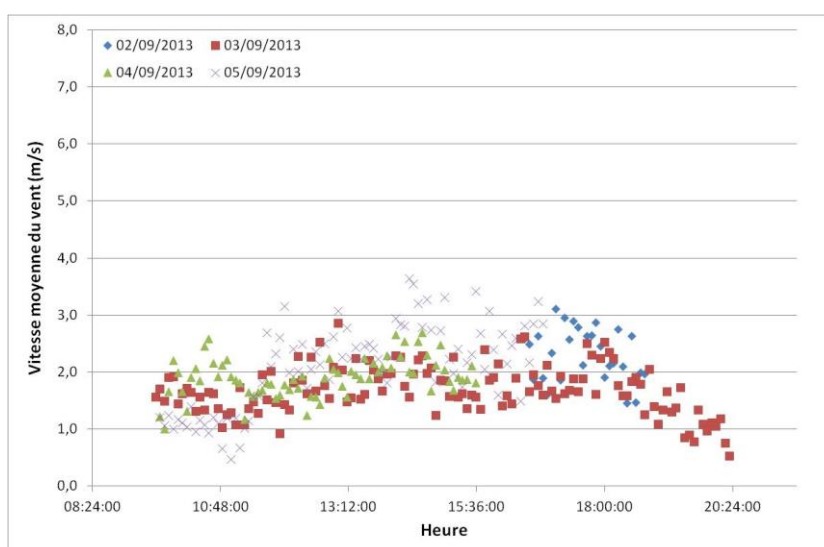
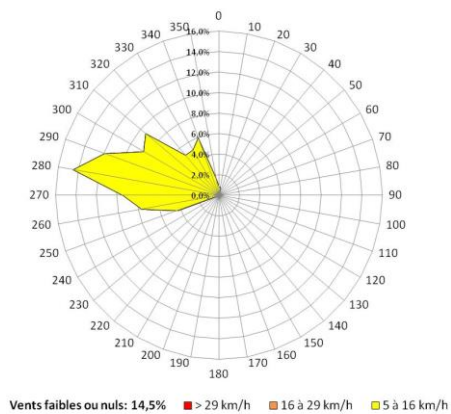


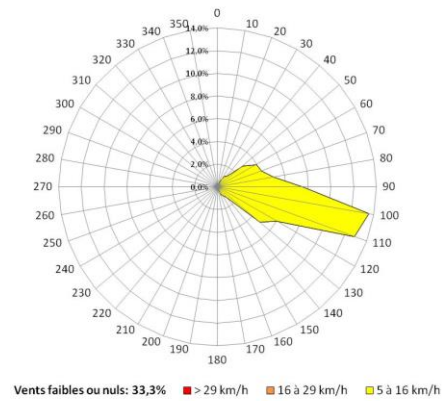
Figure 8 : suivi des vitesses du vent

Sur les deux figures précédentes, il ne semble pas y avoir de différence très marquée entre les différentes journées de mesure. Si les vitesses du vent sont globalement comparables, les températures de l'air augmentent jour après jour, en suivant un profil tout à fait similaire.

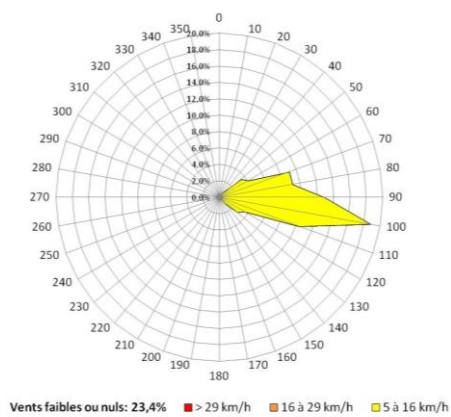
A partir des données de vent issues de la station météorologique, les roses des vents spécifiques aux différentes périodes peuvent être établies. Les modèles de dispersion atmosphériques utilisés dans cette étude étant majoritairement définis pour des gammes de vitesses de vents supérieures à 1 m/s (modèle gaussien principalement), ce critère a été retenu pour définir la classe de vent faibles ou nuls, c'est-à-dire de vitesse comprise entre 0 et 1 m/s. La représentation graphique de chacune des roses des vents est présentée en figure suivante :



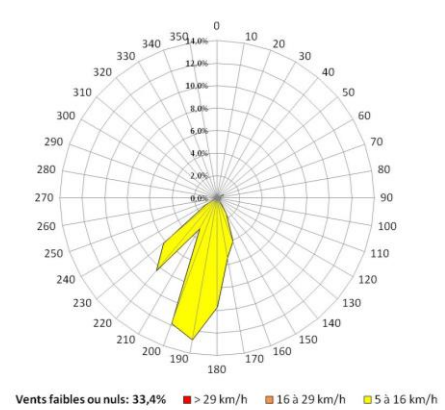
02/09/2013



03/09/2013



04/09/2013



05/09/2013

Figure 9 : roses des vents des périodes étudiées

Les conditions de vent rencontrées durant la campagne sont relativement comparables pour ce qui est de la gamme de vitesse du vent, avec majoritairement des vents entre 5 et 16 km/h et pour près de 70 % des périodes étudiées.

Si les directions changeantes du vent peuvent avoir une influence sur les émissions, de par les effets aérauliques liés à la configuration du bâtiment, on peut considérer que les conditions météorologiques globales ont été relativement stables.

Le suivi qualitatif des niveaux de concentration en COV de l'air sortant du bâtiment des fosses est présenté en page suivante. Certains évènements liés aux activités du site sont également reportés.

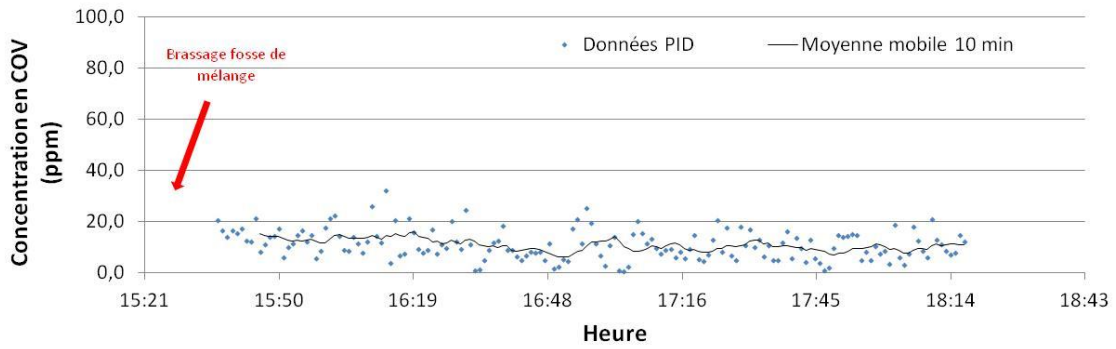


Figure 10: suivi des concentrations indicatives en COV – 2 septembre 2013

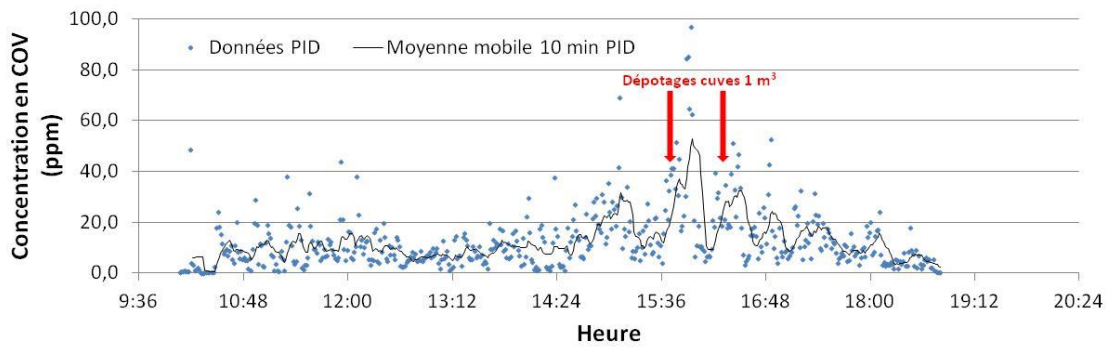


Figure 11: suivi des concentrations indicatives en COV – 3 septembre 2013

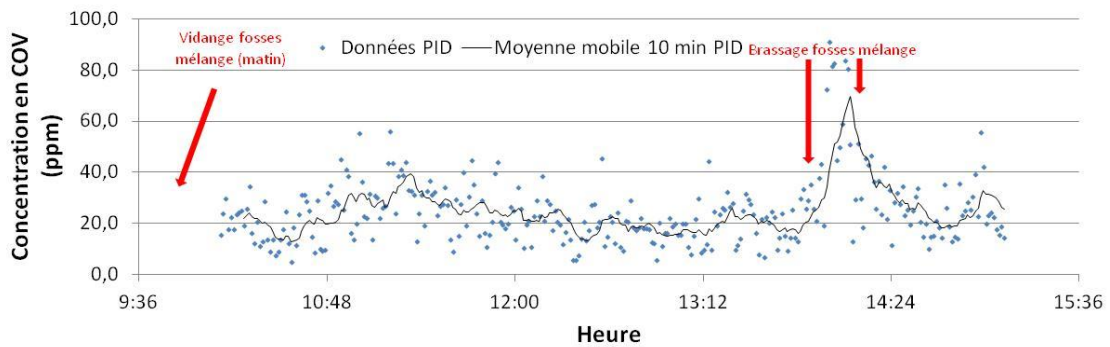


Figure 12: suivi des concentrations indicatives en COV – 4 septembre 2013

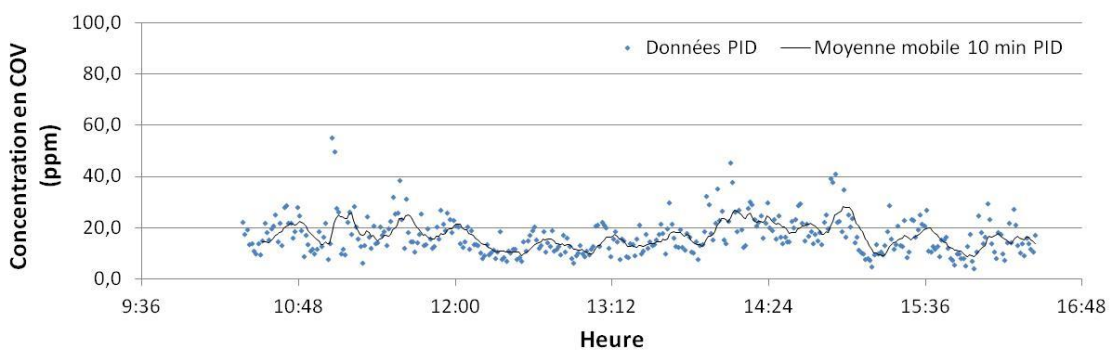


Figure 13: suivi des concentrations indicatives en COV – 5 septembre 2013

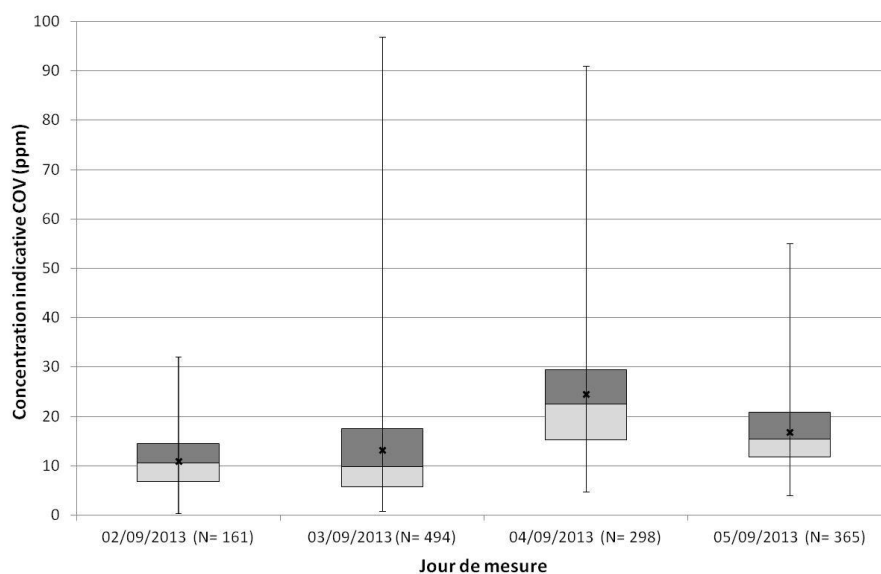


Figure 14 : distribution statistique des concentrations indicatives en COV – mesures PID

Tableau 5 : statistiques des concentrations indicatives en COV – mesures PID

	Date	02/09/2013	03/09/2013	04/09/2013	05/09/2013
Concentration en COV (ppm)	Moyenne	11,0	13,2	24,6	16,8
	5 ^{ème} centile	2,4	2,2	9,2	8,0
	25 ^{ème} centile	6,7	5,7	15,3	11,8
	Médiane	10,5	9,7	22,5	15,4
	75 ^{ème} centile	14,5	17,5	29,5	20,9
	95 ^{ème} centile	20,9	35,8	45,3	29,5

D'après ces résultats, il semble que les niveaux de fond présents aux ouvertures du bâtiment soient relativement constants, avec des niveaux de concentration de l'ordre de 10 ppm. A ces niveaux de fond s'ajoutent des pics de concentration occasionnés par des événements de durées plus courtes (dépotages, mélange, etc.), occasionnant des élévations des niveaux de concentration ponctuels (jusqu'à 80 ou 100 ppm).

On retrouve au cours de cette campagne des niveaux de concentration relativement comparables à ce qui a été mesuré durant la phase I. Ces niveaux ne semblent pas varier au cours de la journée hormis lors d'opérations ponctuelles telles que les dépotages et mélanges en fosses.

En début d'après-midi du lundi 2 septembre 2013, un brassage des fosses de mélange a été réalisé. Celui-ci ne semble pas occasionner d'élévation des niveaux de concentration, puisque l'on enregistre par la suite les niveaux de concentration les plus faibles sur les quatre journées. On remarque que pour cette journée, les moyenne et médiane sont très proches.

Les différents dépotages de cuves 1 m³ réalisées à partir de 15h30 le mardi 3 septembre 2013 ne modifient que peu les moyennes et médianes enregistrées sur cette période. Elles occasionnent par contre ponctuellement des valeurs plus élevées, décrit ici par l'augmentation des 75^{ème} et 95^{ème} centiles.

La vidange d'une demi-fosse de mélange le mercredi 4 septembre 2013 au matin semble avoir occasionné une élévation très nette des niveaux de concentration dans le bâtiment, avec une

augmentation significative de tous les centiles, sur toute la journée. Le brassage de deux fosses à partir de 13h50 occasionne quant à lui une élévation ponctuelle des niveaux de concentration, le temps de l'opération.

La journée du jeudi 5 septembre 2013 a été marquée par aucune opération particulière. Les niveaux de concentration restent cependant hauts comparés à ceux enregistrés le lundi 2 septembre 2013.

Les différentes opérations ayant eu lieu au sein du bâtiment des fosses durant la période suivie ont eu une incidence variable sur les niveaux de concentrations indicatives en COV. Ainsi, on peut dire :

- broyats de pots : les très nombreux apports observés durant la période n'occasionnent pas de modification nette des niveaux de concentrations. Leurs influences semblent de très courte durée et portent certainement plus sur les niveaux de fond,
- dépotages cuves 1 m³ : ne modifient que très peu les niveaux de concentration au sein du bâtiment,
- vidange de fosses de mélange / chargement camion : cette opération occasionne une élévation très nette des niveaux de fond au sein du bâtiment. Ceci peut être interprété par la mise à nu de surfaces chargées en solvants (cœur des boues, parois des fosses), les nombreuses manipulations au godet, etc.
- Brassage des fosses de mélange : occasionne une augmentation très nette des niveaux de concentration au sein du bâtiment, mais le retour aux niveaux de fond précédents est assez rapide.

Il est important ici de rappeler que les concentrations obtenues à l'aide d'un détecteur PID sont indicatives et fortement dépendantes de la composition chimique des gaz prélevés. Il est possible que les opérations citées ci-dessus modifient cette composition chimique et influent également sur le facteur de correction associé.

4.2 Méthode « repère » : méthode Solar Occultation Flux (SOF)

Compte tenu du fait qu'il n'est pas possible de connaître avec certitudes le flux de COV émis par le site étudié, l'INERIS a souhaité mettre en œuvre une méthode optique intégrale, méthode aux incertitudes mieux maîtrisées, de manière à apporter une valeur repère de flux émis et pouvoir ainsi positionner chacune des autres méthodes par rapport à celle-ci. Différents tests ont montré que les flux déterminés par cette méthode avaient une incertitude de l'ordre de 30%, incertitude comprenant les incertitudes sur les directions et vitesse de vent, sur le signal FTIR, les interférents et sur le traitement et l'exploitation du signal FTIR).

Dimensionnée pour l'évaluation des flux émis par le raffinage ou la pétrochimie, cette méthode brevetée n'est pas à considérer comme référence vis-à-vis du domaine d'activité ici étudié de par la complexité de sa mise en œuvre et sa faible disponibilité internationale.

4.2.1 Principe

La méthode SOF est une technique optique basée sur la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), spectroscopie utilisée en mode passif puisque la source de lumière est le soleil. Les mesures réalisées permettent, via l'obtention de spectres d'absorption infrarouges correspondants, de qualifier et quantifier les concentrations des différents composés gazeux présents dans la colonne d'air située entre l'instrument et le soleil. Dans le cas des émissions diffuses pouvant être situées près du sol, cette méthode peut sous-estimer les flux en ne détectant pas les concentrations situées entre le sol et le toit du véhicule.

L'absorption des infrarouges par les liaisons chimiques carbone – hydrogène et carbone – carbone (simple ou double) étant très importante, cette méthode est très sensible pour la mesure des concentrations d'alcanes ou d'alcènes, qu'ils soient aliphatiques, cycliques, avec groupes fonctionnels ou non. La majorité des composés détectés dans les émissions des fosses comportant ce type de liaisons, la méthode SOF est adaptée à ce type d'émission. Il est à noter que d'autres gaz absorbant dans l'infrarouge peuvent être détectés, tels l'ammoniac ou le N_2O . La mesure étant intégrative sur la colonne d'air présente à la verticale du véhicule, des niveaux de concentration de l'ordre de quelques ppb sur une colonne d'air de quelques mètres permettent d'être supérieur aux limites de détection.

Le matériel de mesure étant embarqué dans un véhicule, il est possible de réaliser des mesures sous les vents de sources potentielles, comme présenté en figure suivante:

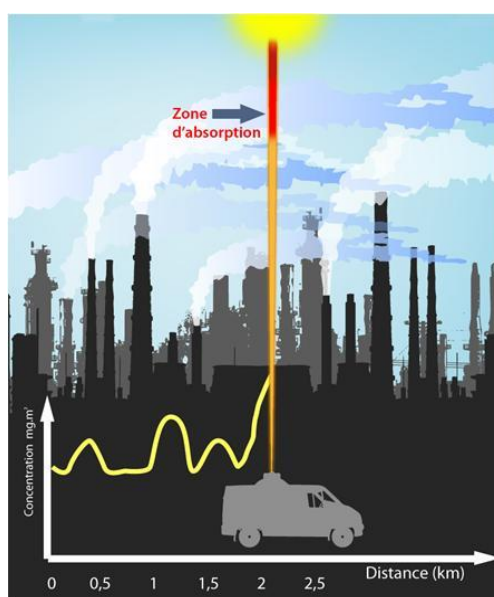


Figure 15: représentation schématique du mode de fonctionnement de la méthode SOF (illustration au cas d'un site industriel)

Lorsque ces mesures sont réalisées à une distance où la dispersion des polluants n'est plus turbulente, il est possible de calculer les flux correspondants. La différence de concentration moyenne mesurée dans la colonne d'air entre deux points de mesure est alors multipliée par la distance séparant ces deux emplacements. Le résultat du produit scalaire entre ce résultat et le vecteur vent correspondant conduit au flux massique émis au travers de cette portion d'espace.

Ces mesures permettent donc de "reconstruire" le profil du panache qui, couplé au vecteur vent, permet de quantifier le flux.

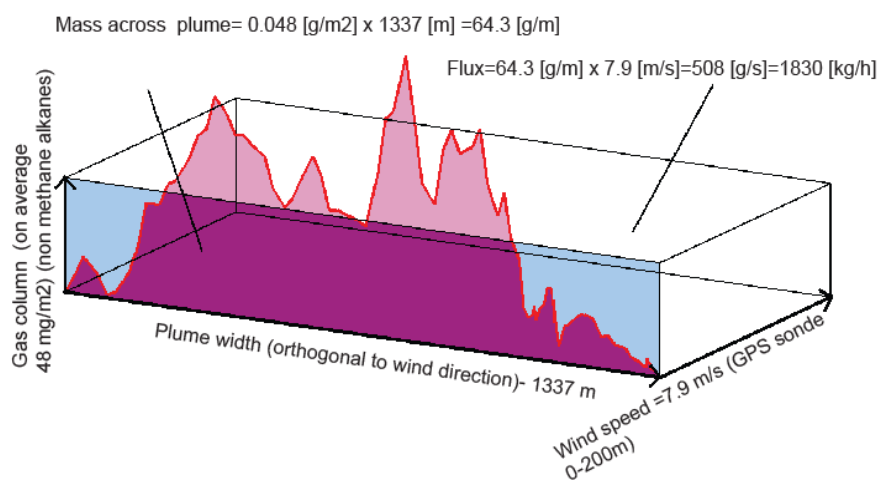


Figure 16: Illustration du principe de calcul des flux

Au cours des différents transects, le signal FTIR lié au bruit de fond atmosphérique (vapeur d'eau, traces de COV associé à d'autres sources présentes dans la zone) est à chaque fois mesuré en début et fin de chaque transect, lorsque l'on est plus sous les vents du site étudié. Afin de s'affranchir de toute variation du signal FTIR lié à une modification rapide du bruit de fond atmosphérique, chaque transect est validé si le signal FTIR enregistré en début et fin de transect est bien identique.

Cette méthode peut être rapidement mise en œuvre au niveau d'une source mais uniquement par temps ensoleillé et ciel dégagé. Elle est très sensible aux alcanes. La connaissance de la composition des émissions est ici un plus pour évaluer les composés potentiellement détectés et évaluer ainsi l'erreur associée à la non-détection de certaines molécules.

4.2.2 Mise en œuvre

La méthode SOF a été mise en œuvre sur sept jours consécutifs incluant jours de semaine et week-end, aux dates suivantes :

Tableau 6 : plan d'échantillonnage – méthode SOF

Date	Heure	Commentaires	Nombre de transects	Vitesse du vent (m/s)	Direction du vent (°)
30 août	11:36:51 - 16:42:13	Vendredi am	7	0,7-0,8	203-222
31 août	16:51:03 - 17:55:14	Samedi	5	1,2-2,5	1-340
01 septembre	10:57:31 - 13:14:05	Dimanche	9	1,4-3,4	5-359
02 septembre	10:53:00 - 16:33:04	Lundi	24	1,3-3,4	175-343
03 septembre	11:42:57 - 16:09:29	mardi	14	0,8-2,7	45-142
04 septembre	10:34:35 - 16:17:18	Mercredi	29	0,8-2,3	36-132
05 septembre	10:26:30 - 16:05:09	Jeudi	17	0,3-2,7	70-266

4.2.3 Résultats

Au cours de ces dates, 105 passages sous les vents des installations ont pu être réalisés et validés, sous des conditions de vents variables. Au cours de ces différents passages, aucun signal associé aux autres sources présentes potentiellement en amont aéraulique de la zone n'a été détecté, ce qui permet de bien pouvoir attribuer les flux déterminés au site étudié. Les résultats de quantification des flux par la méthode SOF sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7 : flux journalier moyens de COV déterminé par la méthode SOF

Date	Heure	Commentaires	Nombre de transects	Flux COV (kg/h)	Ecart-type (kg/h)
30 août	11:36:51 - 16:42:13	Vendredi am	7	1,1	0,3
31 août	16:51:03 - 17:55:14	Samedi	5	1,1	0,4
01 septembre	10:57:31 - 13:14:05	Dimanche	9	0,9	0,4
02 septembre	10:53:00 - 16:33:04	Lundi	24	3,9	1,7
03 septembre	11:42:57 - 16:09:29	mardi	14	4,8	2,3
04 septembre	10:34:35 - 16:17:18	Mercredi	29	7,8	4,3
05 septembre	10:26:30 - 16:05:09	Jeudi	17	3,2	1,4

Quelques exemples de représentations graphiques des transects SOF sont présentés ci-dessous :



Figure 17: exemple de transect SOF (champ large)

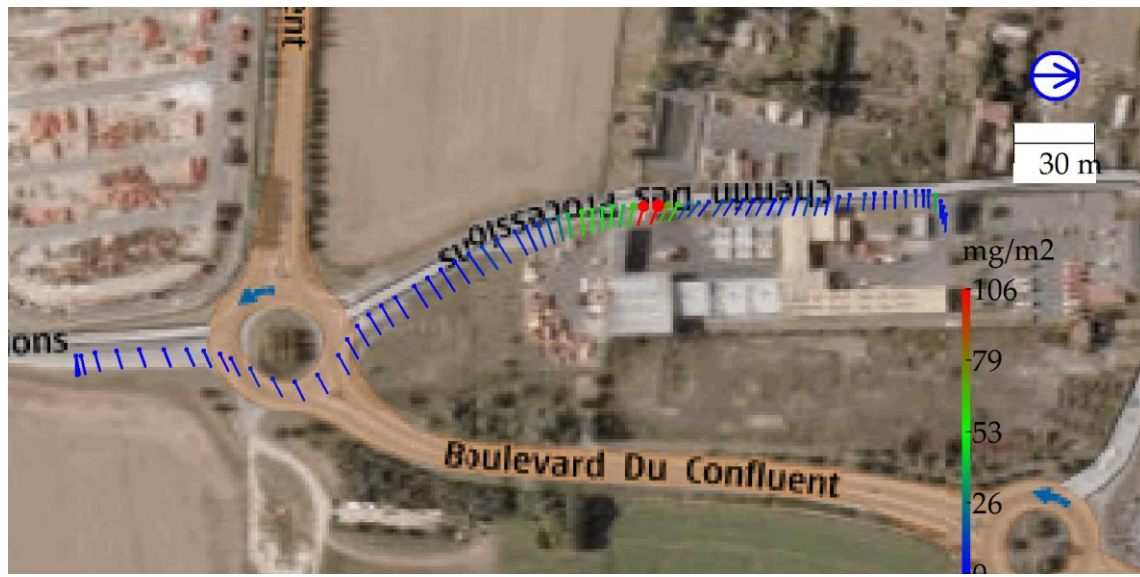


Figure 18: exemple de transect SOF (champ proche)

Il apparaît sur les résultats du Tableau 7 que les flux émis sont nettement différents entre les périodes d'activité (jours de semaine) et les périodes de non-activités (WE), comme présenté en figure suivante :

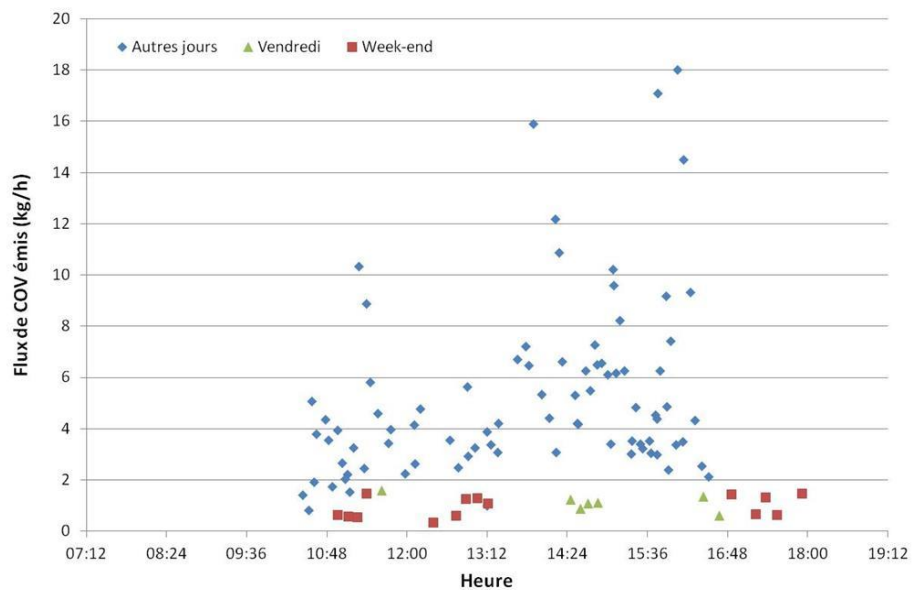


Figure 19: flux de COV émis (kg/h) en fonction de l'heure de la journée – méthode SOF

L'influence de l'activité du site est notable : la faible activité le vendredi après-midi ainsi que la fermeture du site le WE entraînent des flux relativement faibles, de l'ordre du kg/h. Dès la reprise d'activité, il apparaît clairement que les flux sont augmentés, d'un facteur 4 à 6 sur des activités « normales » de chargement/déchargement et jusqu'à 16 lors d'opérations particulières (mais sur de courtes périodes).

Si l'on représente les niveaux de concentration mesurés au sein du bâtiment des fosses et les flux déterminés en parallèle par la méthode SOF, on obtient les figures suivantes :

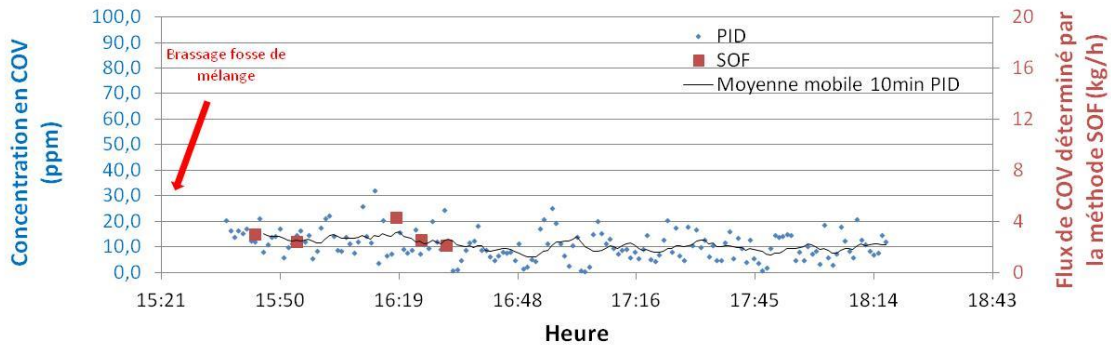


Figure 20: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 2 septembre 2013

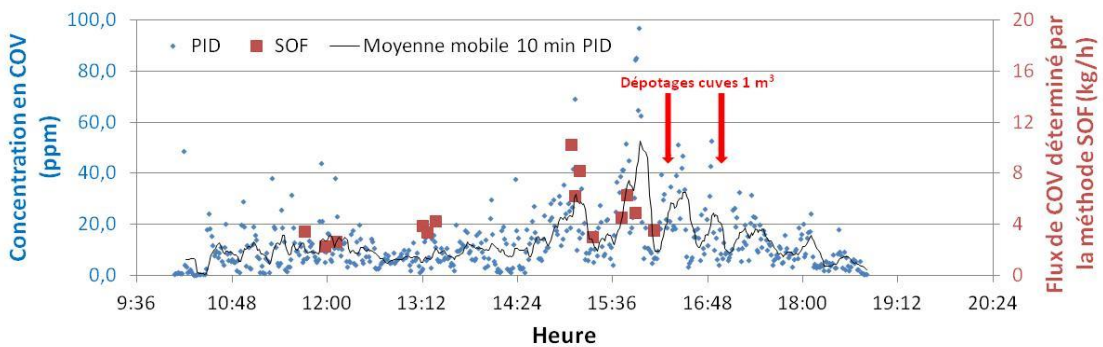


Figure 21: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 3 septembre 2013

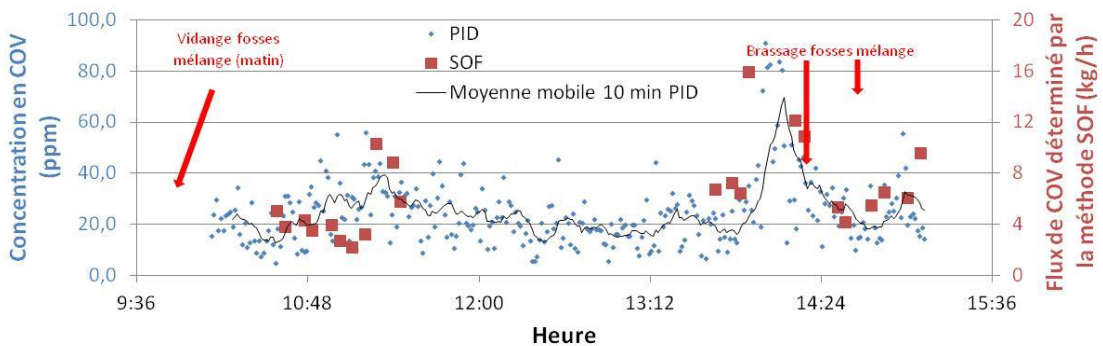


Figure 22: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 4 septembre 2013

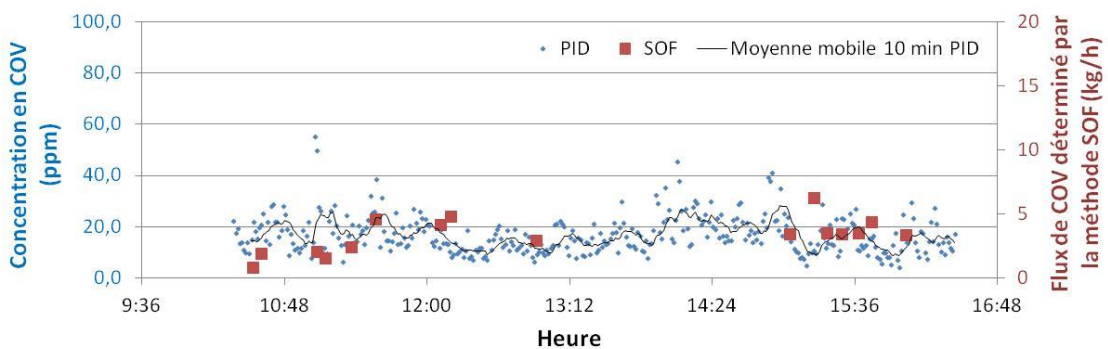


Figure 23: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode SOF – 5 septembre 2013

Les valeurs de flux déterminés par la méthode SOF semblent bien suivre les évolutions dynamiques des niveaux de concentration en COV au sein du bâtiment des fosses. Ces derniers semblent peu corrélés aux variations des températures. Ainsi, pour la journée du 5 septembre 2013, journée la plus chaude, on n'observe pas de concentration ni de flux de COV plus importants que les autres journées.

La représentation statistique de l'ensemble des valeurs de flux est présentée ci-dessous :

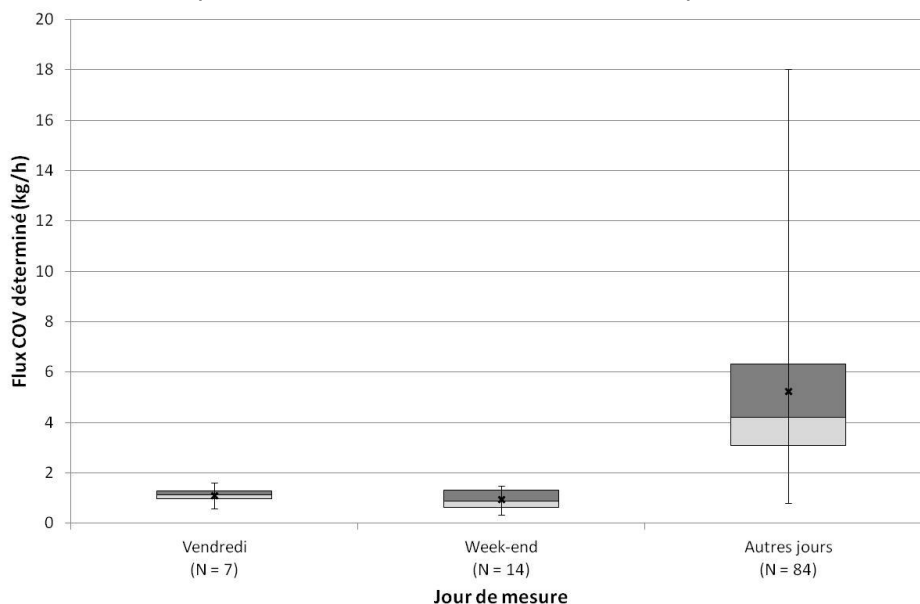


Figure 24 : représentation statistique des résultats SOF

Si la distribution des valeurs semble proche d'une loi normale les vendredi et jours de WE, celle obtenue lors des autres jours est différente, avec une augmentation de la taille des 3^{ème} et 4^{ème} quartile, due à la présence de quelques valeurs élevées associées principalement au brassage et à la vidange des fosses. De ces valeurs, on peut construire le tableau suivant :

Tableau 8 : statistiques sur les flux de COV déterminés par la méthode SOF

	Hors activité (vendredi et WE)	En activité
Flux médian	1,0	4,2
Flux moyen	1,0	5,3

Si on fait l'hypothèse d'une activité sur le site de 08h00 à 17h00, du lundi au vendredi, alors on peut calculer le flux horaire composite de la manière suivante:

$$\text{Flux médian hebdomadaire} = (45 \text{ heures ouvrées} * \text{flux « en activités »}) + (123 \text{ heures non ouvrées} * \text{flux « hors activités »})$$

On obtient :

$$\text{Flux médian hebdomadaire} = 45 * 4,2 + 123 * 1,0 = 312 \text{ kg}$$

Soit un flux médian horaire de $312 \text{ kg} / 168 \text{ h} = 1,9 \text{ kg/h}$ (COVt)

4.3 Méthode 1: méthode dite « de base » avec mesures de concentration en point fixe (COVt) et modélisation de la dispersion

4.3.1 Principe

On cherche ici à déterminer le flux des émissions diffuses grâce à des mesures de concentrations en COV totaux/ COV spécifique à l'air ambiant à partir desquels le flux des émissions diffuses sera déterminé grâce à une évaluation du ratio de dispersion (α) reliant les concentrations mesurées dans l'environnement (C) au flux des émissions diffuses (E) à l'aide d'outils de modélisation atmosphérique de premier niveau.

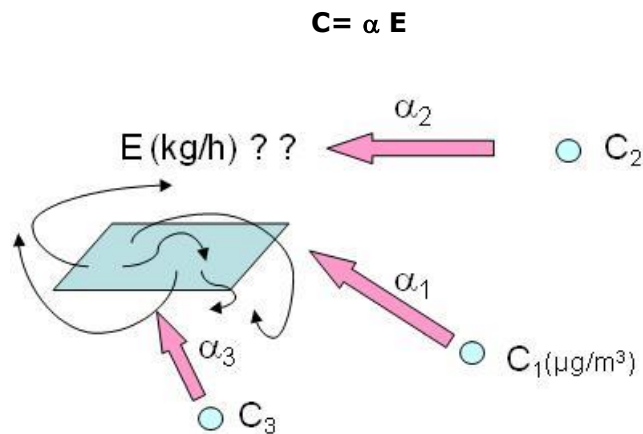


Figure 25 : Schéma illustratif du principe de la méthode 1

4.3.2 Mise en œuvre

Initialement prévue d'être réalisée à l'aide de sacs Tedlar, cette méthode a dû être revue au cours de la campagne suite à un problème de puissance de pompe permettant le gonflage des sacs et à des traces de COV parasites en provenance des sacs eux-mêmes. La mesure a donc été réalisée à l'aide d'un instrument infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) embarqué mis en œuvre sous les vents des fosses et en position fixe sur des durées de 90 à 120 minutes, comme présenté en Figure 26 ci-après. Le point de prélèvement est positionné à une hauteur de 4 m environ afin de s'affranchir des effets de sols ainsi que des turbulences liées à la circulation automobile.

La mesure FTIR est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par l'air échantillonné à l'extérieur au moyen d'une pompe. Par la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, cette méthode permet d'effectuer la mesure des concentrations en différents composés présents dans l'air, chaque composé ayant un spectre d'absorption spécifique.

Les longueurs d'onde auxquelles l'air échantillonné absorbe sont caractéristiques des différents composés présents dans l'air. Des banques de spectres permettent de déterminer les différents composés présents dans l'air.

De plus, l'intensité de l'absorption à une longueur d'onde donnée est fonction de la concentration des différents composés qui absorbent à cette longueur d'onde. Il est de fait possible à l'aide d'un programme informatique et de banque de données spectrales de déterminer les différents composés présents dans l'air échantillonné ainsi que leur concentration massique.

Dans le cas de cette étude, les différentes concentrations en COV détectés ont été sommées de manière à obtenir une concentration globale en COVt.



Figure 26: montage mesures FTIR statiques

Compte tenu des conditions météorologiques rencontrées au cours de la campagne, deux emplacements de mesure répondant aux objectifs et impératifs de la méthode 1 ont pu être utilisés, comme présentés en figures suivantes:



Figure 27: localisation des emplacements de mesure utilisés



Figure 28: vue sur le bâtiment des fosses depuis l'emplacement 1



Figure 29: vue en direction du bâtiment des fosses depuis l'emplacement 2

Quatre essais de ce type ont pu être réalisés, trois au niveau du parking camion sous vents de Sud Est (emplacement 1), un au niveau de la limite Nord du site par vent de Sud (emplacement 2), comme détaillé en annexe 1.

4.3.3 Description des modèles de dispersion disponibles

Les modèles de dispersion atmosphériques traditionnellement utilisés pour la qualité de l'air sont de type gaussien, intégral, lagrangien ou eulérien.

4.3.3.1 Les modèles de type gaussiens

Les modèles gaussiens sont les plus utilisés. La méthode gaussienne propose une solution analytique qui vérifie les équations de transport de manière approchée : les équations de transport ne sont pas résolues. Cette solution est basée sur la construction d'une formule mathématique, validée par des mesures in-situ (dans l'atmosphère). Le modèle gaussien est très utilisé car le calcul est direct. Il permet donc la simulation de nombreuses situations météorologiques en peu de temps de calcul ce qui autorise des traitements statistique de type moyenne temporelle, percentile, fréquence de dépassement de seuil, etc... Les limitations de cette méthode apparaissent cependant assez vite avec la complexité des situations (complexité du terrain, météorologie, distance supérieure à 10km..). La validité de ce modèle n'est vérifiée que pour des situations que l'on peut qualifier de cas simples (sol plat ou peu accidenté, profil de vent constant ou bien connu).

Cependant les modèles gaussiens dits de seconde génération permettent une prise en compte plus fine de la météorologie grâce au développement de préprocesseurs météorologiques adaptés et capables de prendre en compte une description continue de la turbulence avec les paramètres de hauteur de couche limite et de longueur de Monin-Obukhov. Les profils verticaux de dispersion sont de types gaussiens dans les situations neutres ou stables et obliques en situation convective. Ces modèles ont acquis une meilleure représentation de l'écoulement du vent et donc de la dispersion pour les terrains à topographie variable, ceci avec l'intégration de module simplifié de calcul des écoulements atmosphérique à proximité du sol. Enfin, ils proposent un module de prise en compte des obstacles (bâti) qui autorise la paramétrisation de l'accumulation des polluants dans les zones de recirculation de l'écoulement.

Applications

Les modèles gaussiens sont très souvent utilisés dans le cadre d'étude d'impact des ICPE qui requièrent des simulations sur des périodes de plusieurs années.

4.3.3.2 Les modèles de type intégral

Lorsque le rejet est tel qu'il perturbe l'écoulement atmosphérique de l'air, ou bien lorsque l'écoulement est complexe, l'emploi d'un modèle gaussien est inadapté. Des mécanismes physiques non pris en compte par les modèles gaussiens doivent être considérés tels que :

- les effets de turbulence dynamique, pour les rejets sous forme de jet à grande vitesse d'émission ;
- les effets de gravité, pour les rejets de gaz lourds ;
- les effets de flottabilité pour les rejets de gaz légers.

L'emploi d'un modèle intégral permet de modéliser ces mécanismes. Ce type de modèle est basé sur les équations de la mécanique des fluides dont le système d'équations est suffisamment simplifié pour permettre une résolution rapide. Cette simplification se traduit par l'introduction de paramètres représentant globalement les mécanismes non modélisés. La trajectoire des panaches est calculée avec ce type d'équations. Les coefficients de dispersion transversaux des nuages de gaz passifs (dès leur rejet ou après une dilution suffisamment importante), sont eux calculés par un modèle gaussien.

Les limites et la précision d'un modèle Intégral seront identiques à celles d'un modèle Gaussien.

Applications

Ils sont le plus souvent utilisés dans le cadre de dispersion liés à des rejets de type accidentel.

- Source de type jet
- Evaporation de liquide toxique
- Explosions, bleves, boilover...

4.3.3.3 Les modèles de type lagrangiens

Un modèle de dispersion lagrangien suit mathématiquement des volumes élémentaires (également appelés particules) du panache pendant qu'ils se déplacent dans l'atmosphère. Le déplacement lié à l'advection de ces particules est calculé grâce à la connaissance des champs de vents atmosphériques, leur déplacement diffusif étant une fonction statistique liée à la turbulence du milieu. Les modèles récents permettent la reconstruction des champs météorologiques à l'aide d'un préprocesseur respectant les contraintes imposées par les mesures ou profils verticaux en entrée du modèle, la stabilité atmosphérique et les caractéristiques du sol. Des corrections analytiques permettant la prise en compte des zones de déventement amont, de sillage et de recirculation liés à la présence d'obstacles peuvent être apportées à l'écoulement atmosphérique. Ces méthodes de calculs permettent le diagnostic d'écoulements atmosphériques réalistes en s'émancipant du temps de calcul parfois réhhibitoire liés aux modèles CFD.

Le modèle lagrangien détermine les concentrations de polluants en compilant l'ensemble des trajectoires d'un grand nombre de particules du panache. Ce type de modèle permet une meilleure représentation de la physique du transport de polluant dans l'atmosphère que celle donnée par les modèles gaussiens. Leur utilisation requiert cependant davantage de temps de calcul pour chacune des situations météorologiques simulées.

Applications

Les modèles lagrangiens sont souvent utilisés en mode post accidentel ou en suivi immédiat d'une situation d'urgence. Ils permettent la reconstruction réaliste d'un panache de dispersion sur des périodes d'exposition limitées à quelques semaines. L'amélioration des performances informatiques et la parallélisation des modèles lagrangiens permettent aujourd'hui d'étendre leur champ d'application à l'évaluation de la qualité de l'air.

4.3.3.4 Les modèles de type eulériens

La méthode eulérienne, consiste à étudier l'écoulement traversant un volume élémentaire fixe. Les caractéristiques physiques sont alors définies en chaque point du repère (maillage 3D du domaine) et à chaque instant. Les équations de transports sont résolues à l'aide de méthodes numériques ce qui permet la connaissance des variables physiques en fonction du temps et du point où l'on se place. Les modèles eulériens se heurtent cependant au problème de fermeture des équations de quantités turbulentes qui sont alors résolues par différents modèles adaptés aux échelles d'espace et de temps. Les modèles eulériens proposent actuellement la meilleure description des écoulements atmosphériques en chaque point de l'espace.

Applications

La difficulté de leur mise en œuvre et le temps de calcul nécessaire restreignent cependant leur utilisation à des domaines d'études spécifiques : dispersion accidentelle, prévision météorologique, prévision de la qualité de l'air à grande échelle. A l'échelle locale, la résolution fine des équations de Navier -Stokes autorise difficilement les simulations sur des périodes dépassant quelques heures.

4.3.4 Choix du modèle de dispersion

Compte tenu des faibles distances de modélisations (quelques centaines de mètres) et des vents relativement faibles rencontrés au cours de la campagne, le choix du modèle de dispersion s'est porté vers un modèle lagrangien : MSS (ARIA technologies). Plus de détails sur les différentes conditions d'application des modèles sont également présentés dans l'étude RECORD 03-0805/2A². Cependant, afin d'étudier les résultats issus d'un modèle plus classique, la modélisation a été également réalisée à l'aide d'un modèle de dispersion gaussien (ADMS).

4.3.5 Résultats

4.3.5.1 A partir d'un modèle lagrangien

A l'aide du modèle de dispersion lagrangien MSS (ARIA technologies), les dispersions atmosphériques des essais 1 à 4 ont pu être modélisées. Celles-ci sont basées sur l'hypothèse d'une ou de deux sources d'émission ponctuelle à flux unitaire (1 kg/h) positionnées à une hauteur de 1 mètre au centre de chacune des sorties des émissions observées sur le terrain.

² Modélisation de la dispersion des émissions atmosphériques d'un site industriel – Vers un guide de l'utilisateur – Phase 1 : Etat de l'art, Phase 2 : Evaluation des modèles. 2005, LMFA – Ecole Centrale de Lyon, Référence RECORD : 03-0805/2A

Afin d'optimiser les résultats issus de ces modélisations, les données d'entrée suivantes ont été collectées :

- représentation 3D de la zone d'étude, avec relief et bâtiments,
- données météorologiques locales spécifiques aux essais (mesurées in situ).

Ont ainsi été modélisés les suivis dynamiques des concentrations pour les essais 1 à 4, comme présentés ci-dessous :

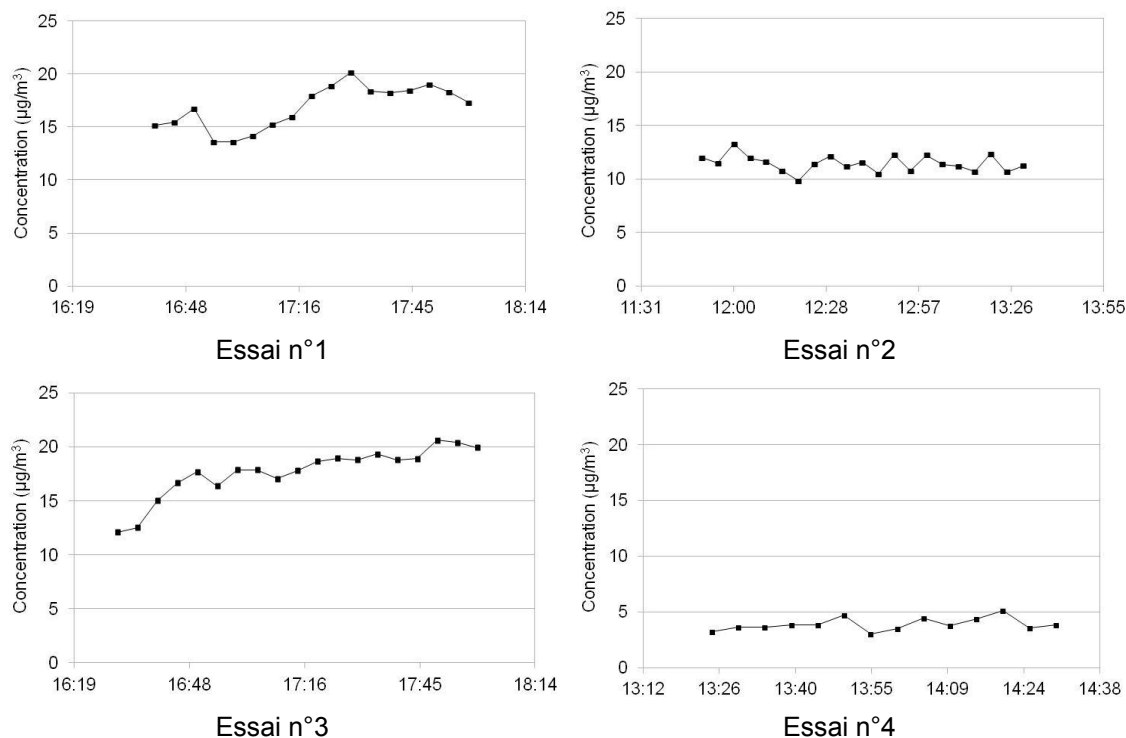


Figure 30: modélisations dynamiques des concentrations aux emplacements de mesure – modèle lagrangien MSS

A partir des concentrations modélisées et mesurées, on peut calculer le flux émis par la formule suivante :

$$\text{Flux émis} = (\text{Concentration mesurée} * \text{flux unitaire}) / \text{Concentration modélisée}$$

Tableau 9 : résultats de mesure – méthode 1 (modèle lagrangien)

	Horaires	Nombre de sources unitaires considérées	Concentration moyenne modélisée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration moyenne COVt mesurée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Flux émis déterminé par la méthode (kg/h)
Essai 1	03/09/2013 16:30 à 18:00	1	16,9	135,2	8,0
Essai 2	04/09/2013 11:40 à 13:30	1	11,5	150,5	13,1
Essai 3	04/09/2013 16:20 à 18:00	1	17,7	215,2	12,2
Essai 4	05/09/2013 13:15 à 14:30	2	5,4	67,4	25,0

La capacité à reproduire au maximum dans le modèle les conditions de dispersion est un paramètre clé de cette méthode. En effet, la topographie du site, la présence de bâtiments, d'arbres de grande taille va occasionner une modification de l'écoulement de l'air et donc modifier les résultats de la

dispersion. L'observation de terrain est pour cela essentielle, puisqu'elle va permettre de bien appréhender la situation.

4.3.5.2 Etude sensibilité des résultats de modélisation

La modélisation de la dispersion réelle des émissions (ici configuration avec deux sources unitaires et haie latérale) nécessite de réaliser de nombreuses observations de terrain durant la campagne de manière à évaluer la potentielle influence des différents obstacles existant (arbres, bâtiments, relief, etc.) et les zones sources identifiées (ouvertures du bâtiment, écoulement interne, etc.). Ces observations permettent également d'avoir un regard critique sur les zones réellement soumises à l'influence du site durant les mesures, sur la taille des panaches, etc. et de valider ainsi la pertinence des cartes de modélisation de la dispersion.

Sur les 4 essais réalisés sur le terrain, l'essai n° 4 est celui pour lequel la modélisation est la plus complexe, compte tenu de la présence de nombreux obstacles entre la source et l'emplacement de mesure. Afin de tester la sensibilité des résultats de la modélisation à divers paramètres, différentes simulations numériques ont été réalisées pour cet essai en utilisant différentes configurations.

L'influence de la végétation a ainsi été testée. Le site SMAB est en effet bordé en limite Est d'une haie assez dense sur quasiment toute la longueur. Au cours des mesures, cette haie a semblé influencer nettement la dispersion des émissions du bâtiment des fosses par vent de secteur sud, celles-ci se trouvant comme canalisées entre l'arrière des bâtiments SMAB et la haie. Les deux modélisations respectives sont présentées ci après (point récepteur marqué d'une croix) :

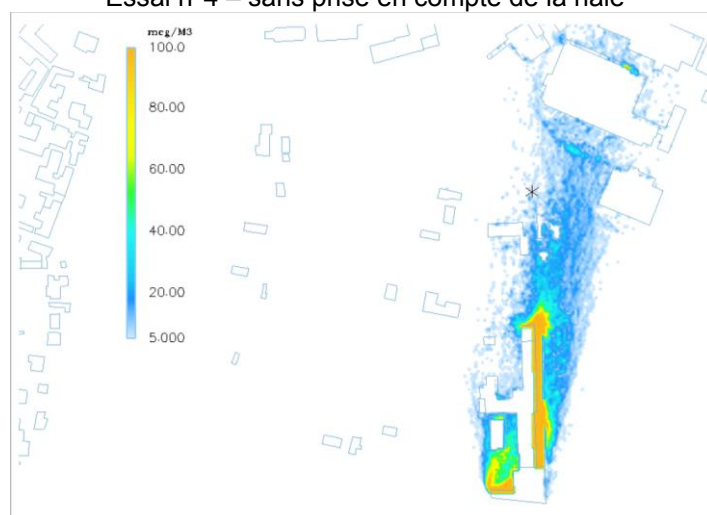
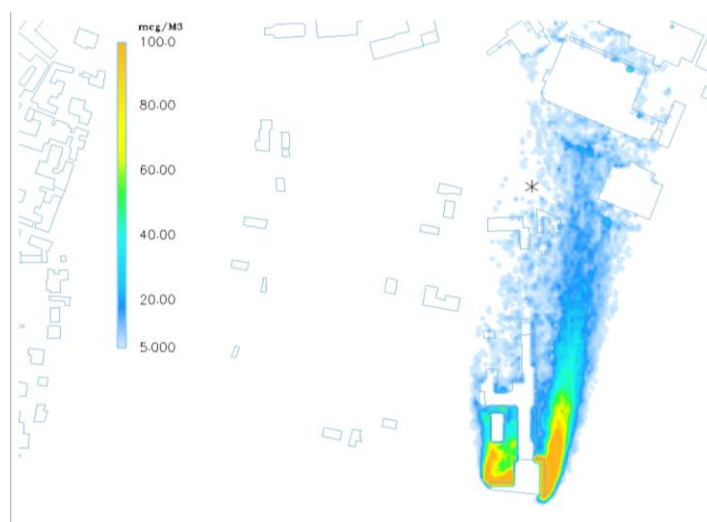


Figure 31 : résultat de modélisation de la dispersion atmosphérique des émissions (instantané)

La prise en compte de la haie située à l'Est des bâtiments a pour conséquences :

- de déplacer sensiblement le panache de dispersion vers l'ouest,
- de concentrer légèrement le panache, par diminution de la dispersion,
- de réduire fortement les niveaux de concentration à l'est du bâtiment des fosses.

La prise en compte de la haie permet d'obtenir des résultats de modélisation plus cohérents avec les observations faites sur le terrain (pas d'émission en partie est du bâtiment des fosses et canalisation des émissions par la haie).

Le vent étant majoritairement de secteur Sud au cours de l'essai n°4, le vent pénétrait le bâtiment majoritairement par la porte Sud pour sortir par la porte Nord. Compte tenu des dimensions importantes de l'ouverture en façade avant du bâtiment, la sortie des gaz par cette issue était difficile à appréhender.

Les fosses de mélange semblant être les sources majeures d'émission et compte tenu de leur proximité aux portes Nord et Sud, la modélisation a également été conduite en ne considérant que la porte Nord comme source d'émission (une seule source unitaire). Les différentes modélisations des concentrations au point récepteur sont présentées en figure suivante :

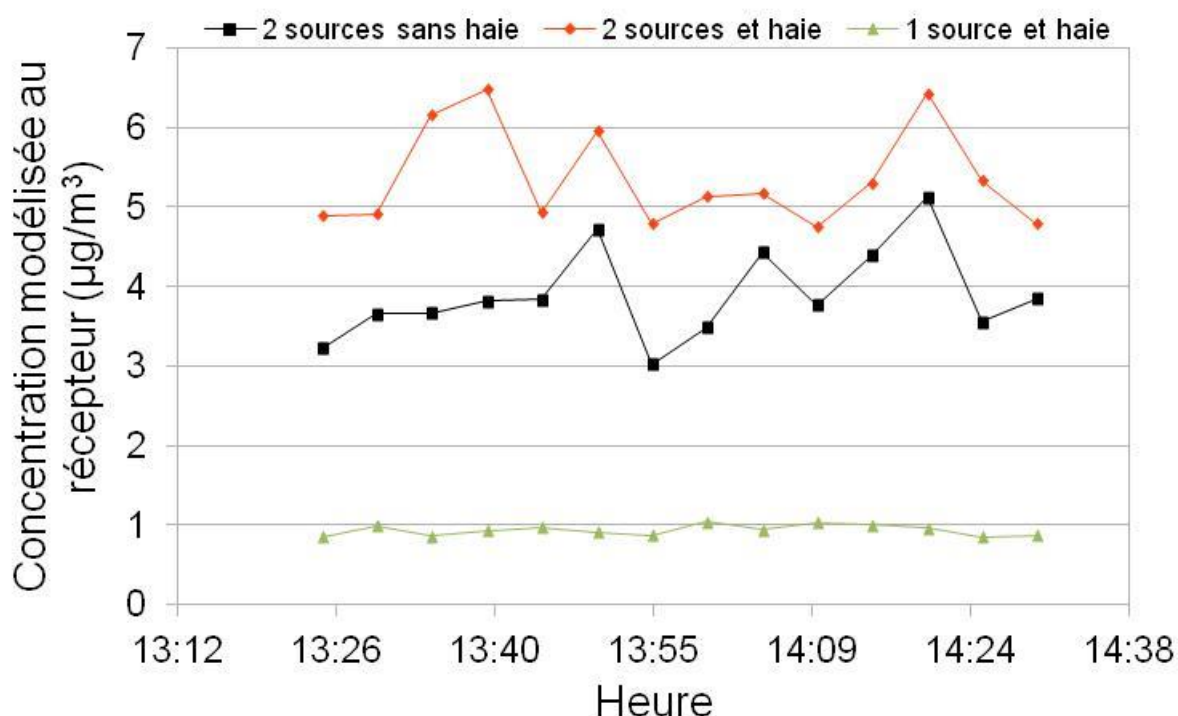


Figure 32 : test de différents paramètres sur les résultats de la modélisation – essai n°4

La non prise en compte de la source « façade avant du bâtiment » a pour conséquence de diminuer très nettement les niveaux de concentration au point récepteur. Il semble par conséquent que pour cet essai, cette source soit celle impactant le plus le point récepteur.

Sur la base des différentes configurations testées, on peut déterminer à partir des concentrations modélisées au point récepteur les flux de COV émis respectifs suivants :

Tableau 10 : flux de COV émis lors de l'essai 4 suivant différentes configurations

	Horaires	Nombre de sources unitaires considérées	Concentration moyenne modélisée (µg/m³)	Concentration moyenne COVt mesurée (µg/m³)	Flux émis déterminé par la méthode (kg/h)
Essai 4 (2 sources)	05/09/2013 13:15 à 14:30	2	3,9	67,4	34,6
Essai 4 (2 sources et haie)		2	5,4	67,4	25,0
Essai 4 (1 source et haie)		1	0,9	67,4	74,9

L'influence des différentes configurations de modélisation sur le résultat de flux émis déterminé par la méthode est importante (ici du simple au triple sur le résultat final). Au cours des mesures de terrain, il est donc primordial que soient réalisées des observations précises des zones sources, de la direction des vents, de la dispersion des émissions, des zones sous influence, etc. Ces observations permettent par la suite d'optimiser la modélisation de la dispersion atmosphérique et d'en diminuer ainsi les incertitudes sur le flux déterminé par la méthode.

Dans le cas de cette étude et d'après les observations réalisées sur le terrain, la meilleure configuration pour l'essai n° 4 correspond à « 2 sources et haie ».

De plus, la plupart des modèles de dispersion atmosphériques considèrent les bâtiments comme des structures étanches à l'air. L'écoulement de l'air au travers des bâtiments n'est donc pas considéré. Ici, les sources ont été positionnées en bordure des bâtiments, au niveau des ouvertures. C'est une limite à la méthode, actuellement non solvable. Si des modèles de type Fluent peuvent répondre à la modélisation de l'écoulement au sein du bâtiment (considéré comme clos), ils ne peuvent pas être actuellement couplés à des modèles de dispersion atmosphériques.

4.3.5.3 A partir d'un modèle gaussien

Afin de tester le gain apporté par les différents types de modèles de dispersion, une modélisation à l'aide du modèle de dispersion gaussien ADMS a été réalisée. Afin d'avoir deux configurations nettement différentes, ce travail a été réalisé à partir des données des essais n° 1 et 4, en considérant une source unitaire ponctuelle en lieu et place du bâtiment des fosses (flux = 1 kg/h) afin de reproduire les conditions courantes d'utilisation de ce type de modèle. Cette modélisation prend en compte le bâti au sein de la zone d'étude. Les simulations ont été faites avec les données météo sur 5 minutes et avec un temps d'intégration de 5 minutes.

Les cartographies des résultats de modélisation pour les essais 1 et 4 sont présentées en page suivante.



Figure 33 : cartographie modélisation ADMS – essai 1

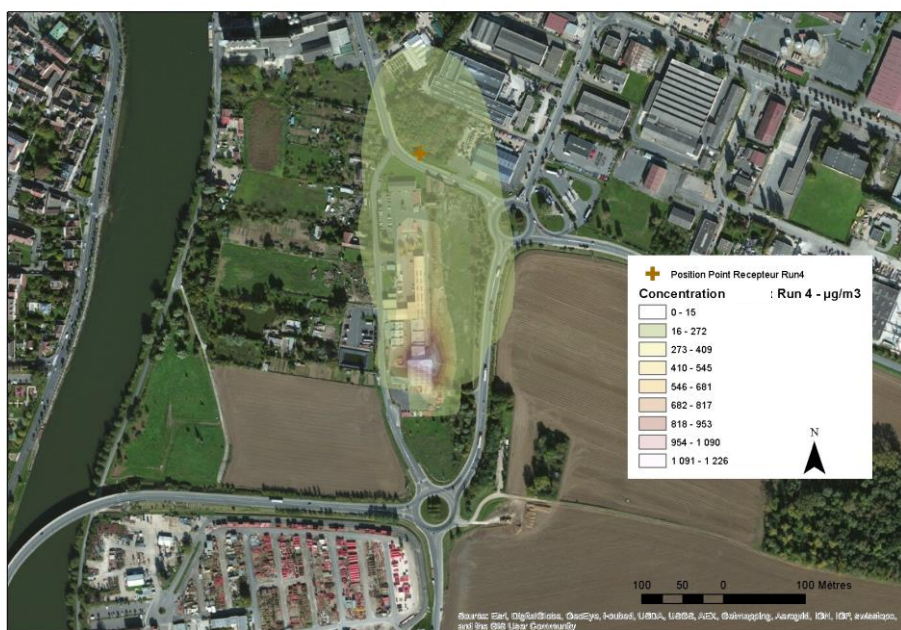


Figure 34 : cartographie modélisation ADMS – essai 4

A partir des concentrations modélisées et mesurées, on peut calculer le flux émis par la formule suivante :

$$\text{Flux émis} = (\text{Concentration mesurée} * \text{flux unitaire}) / \text{Concentration modélisée}$$

Les concentrations moyennes modélisées aux emplacements de mesure ainsi que les flux calculés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 11 : résultats de mesure – méthode 1 (modèle gaussien)

	Horaires	Nombre de sources unitaires considérées	Concentration moyenne modélisée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentration moyenne COVt mesurée ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Flux émis déterminé par la méthode (kg/h)
Essai 1	03/09/2013 16:30 à 18:00	1	167	135,2	0,8
Essai 4	05/09/2013 13:15 à 14:30	1	39	67,4	1,7

Les niveaux de concentration modélisés sont plus élevés que ceux obtenus pour la même configuration avec un modèle Lagrangien. Pour les trois premiers essais, les résultats issus de la modélisation lagrangienne sont bien comparables aux résultats obtenus à l'aide de la méthode repère SOF encadrant cette période. Pour l'essai 4, les résultats sont nettement différents.

La comparaison des deux types de modélisations pour les essais 1 et 4 montre que les résultats issus de l'utilisation d'un modèle Gaussien sont plus faibles que ceux obtenus avec un modèle Lagrangien. Comparés aux résultats de la méthode repère SOF, aucune des deux modélisations ne semble conduire à des valeurs de flux plus comparables à ceux obtenus par la méthode de référence.

METHODE 1	
Nature des sources diffuses	Toute source modélisable : source surfacique, volumique, linéique, ponctuelle
Polluants mesurés	Tout polluant dont la métrologie est possible à l'air ambiant Mesure simultanée de différents polluants possible
Contraintes logistiques	Très faibles si appareil autonome et peu encombrant : déplacement sur et autour du site facilité. Nécessité d'avoir accès à un emplacement situé sous les vents du site, à des distances de l'ordre de 250 à 500 mètres
DESCRIPTIF TECHNIQUE	
Principe de la mesure	Mesure des concentrations dans le panache en aval du site Rétro-modélisation des flux issus des sources qui sont censées produire ces niveaux de concentrations
Stratégie de mesure	Positionnement des mesures à poste fixe en aval du site pour déterminer les niveaux de concentrations du panache aval dispersé ; Tests de différents scénarios de sources rétro-modélisées pour simuler la réalité
Echelle spatio-temporelle des mesures	Discrimination de deux sources possibles si leurs panaches respectifs ne se recouvrent pas Mesures réalisées sur des périodes longues (2 h environ), donc représentatives des conditions moyennes
Coût associé à une campagne de mesure	€ €
Niveau de compétence nécessaire pour mise en œuvre	Mesure des concentrations : compétence faible Modélisation des données pour calcul des flux des sources : compétences importantes en modélisation de la dispersion atmosphérique (capacités à reproduire dans le modèle les configurations réelles des sources). Pour le positionnement et la caractérisation des sources, la configuration du modèle est réalisée « à dire d'expert », en fonction des observations réalisées sur le terrain
LIMITES DE LA METHODE	
Limite de détection	Capacités métrologiques à détecter de très faibles valeurs (ordre du ppb ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$) à des distances de quelques centaines de mètres des sources. Si flux émis trop faibles, risque fort d'être trop près des sources et de ne pas pouvoir modéliser
Incertitudes associées (appareils de mesure et environnementales)	Incertitudes liées à l'utilisation d'un modèle de dispersion atmosphérique Incertitudes liées aux hypothèses d'homogénéité des sources Très forte dépendance de la stabilité des conditions de vent (direction surtout) car besoin de mesures fixes sur de longues périodes (1h minimum)
Maturité technique, référentiels existants (guides, normes, références existantes...)	-

4.4 Méthode 2: méthode "de base" améliorée par l'utilisation d'un gaz traceur à débit connu pour évaluer les conditions de dispersion

4.4.1 Principe

Au cours de la méthode précédente, de nombreuses hypothèses sont établies dans la mise en œuvre de la modélisation : rugosité du sol, obstacles, conditions météorologiques. Ces hypothèses induisent des incertitudes pouvant conduire à un résultat éloigné de la réalité. La reproduction fidèle des conditions réelles de dispersion au travers des hypothèses du modèle est très délicate.

L'injection d'un gaz traceur à un débit connu au niveau de la source (bâtiment des fosses) et le suivi de sa concentration à l'air ambiant au niveau de l'emplacement de mesure permet de tester la représentativité des hypothèses de modélisation retenues et d'évaluer la fidélité de la modélisation.

Dans un second temps, l'injection d'un gaz traceur à débit connu peut être utilisé comme étalonnage, c'est-à-dire que l'on peut obtenir une mesure du flux de COV émis par la réalisation d'un produit en croix.

4.4.2 Mise en œuvre

Cette méthode a été mise en œuvre en parallèle de la méthode 1 par injection du gaz traceur au même moment au sein du bâtiment des fosses (source type ponctuelle). Le gaz traceur utilisé au cours de cette étude est le N₂O, émis à partir d'une bouteille de gaz équipée d'un manodétendeur et d'un débitmètre à bulle. Le débit est constamment vérifié et le flux déterminé par pesée de la bouteille en début et fin d'injection.

Différents gaz traceurs peuvent être utilisés, mais compte tenu de la grande diversité de composés susceptibles d'être émis par le site (famille des COV complète), le choix s'est porté sur le N₂O, gaz ne réagissant pas avec les COV, de masse molaire faible et de moindre impact environnemental que le SF₆.

Quatre essais ont donc pu être réalisés, trois sur l'emplacement 1 et un sur l'emplacement 2 (cf annexe 2). Pour les quatre essais réalisés, l'injection du gaz traceur a été réalisée au sein du bâtiment près de la porte Sud, là où l'air extérieur pénètre le bâtiment, de manière à ce que le traceur se mélange rapidement avec les COV émis et soit évacué rapidement en dehors du bâtiment (évite les effets « tampons »).

4.4.3 Résultats

Tableau 12 : résultats – méthode 2

	Horaires	Débit moyen gaz traceur émis (kg/h)	Concentration moyenne N ₂ O mesurée (µg/m ³)	Concentration moyenne modélisée Lagrangien (µg/m ³) – méthode 1
Essai 1	03/09/2013 16:30 à 18:00	1,2	19,1	16,9
Essai 2	04/09/2013 11:40 à 13:30	1,1	39,5	11,5
Essai 3	04/09/2013 16:20 à 18:00	1,1	32,7	17,7
Essai 4	05/09/2013 13:15 à 14:30	1,1	8,7	5,4

Le débit moyen de gaz traceur émis au cours de cette campagne est très proche d'un flux unitaire. Les concentrations en N₂O mesurées au niveau des emplacements de mesure peuvent donc être directement comparées aux concentrations modélisées à l'aide de flux unitaires (cf. Tableau 9).

Pour l'essai 1, une seule source unitaire a été considérée dans la modélisation. La concentration moyenne en N₂O mesurée est ici bien comparable à la concentration moyenne théorique modélisée à partir d'un flux unitaire. Il semble donc ici que la configuration du modèle soit relativement bonne : le flux émis déterminé par cet essai peut être considéré comme fiable.

Pour les essais 2 et 3, les concentrations moyennes modélisées sont de 1,8 à 3,4 fois inférieures aux concentrations en N₂O réellement mesurées. Il semble donc que pour ces deux essais, les paramètres du modèle ne soient pas optimaux. Les flux de COV déterminés lors de ces deux essais sont moins fiables, avec des écarts pouvant aller à 300 %.

Pour l'essai 4, les modélisations réalisées à partir de deux sources et en prenant en compte la haie conduisent à un écart assez faible entre la concentration en N₂O mesurée et la concentration moyenne modélisée (facteur 9). Il semble donc qu'ici la configuration du modèle soit assez bonne.

METHODE 2	
Nature des sources diffuses	Toute source modélisable : source surfacique, volumique, linéique, ponctuelle
Polluants mesurés	Tout polluant dont la métrologie est possible à l'air ambiant Mesure simultanée de différents polluants possible
Contraintes logistiques	Très faibles si appareil autonome et peu encombrant : déplacement sur et autour du site facilité. Nécessité d'avoir accès à un emplacement situé sous les vents du site, à des distances de l'ordre de 250 à 500 mètres Nécessité d'avoir accès au site pour le largage du gaz traceur. Maîtrise de l'émission du gaz traceur, dont le débit doit être constant et le point d'injection garantissant un mélange rapide
DESCRIPTIF TECHNIQUE	
Principe de la mesure	Mesure des concentrations en composé d'intérêt et en gaz traceur dans le panache en aval du site Rétro-modélisation des flux issus des sources qui sont censées produire ces niveaux de concentrations Comparaison des concentrations modélisées et concentration en gaz traceur modélisées (ramenées à un flux unitaire) pour évaluer la pertinence des paramètres du modèle
Stratégie de mesure	Positionnement des mesures à poste fixe en aval du site pour déterminer les niveaux de concentrations du panache aval dispersé ; Tests de différents scénarios de sources rétro-modélisées pour simuler la réalité
Echelle spatio-temporelle des mesures	Discrimination de deux sources possibles si leurs panaches respectifs ne se recouvrent pas Mesures réalisées sur des périodes longues (2 h environ), donc représentatives des conditions moyennes
Coût associé à une campagne de mesure	€ €
Niveau de compétence nécessaire pour mise en œuvre	Mesure des concentrations : compétences faibles Largage gaz traceur : compétences modérées Modélisation des données pour calcul des flux des sources : compétences importantes en modélisation de la dispersion atmosphérique (capacités à reproduire dans le modèle les configurations réelles des sources). Pour le positionnement et la caractérisation des sources, la configuration du modèle est réalisée « à dire d'expert », en fonction des observations réalisées sur le terrain
LIMITES DE LA METHODE	
Limite de détection	Capacités métrologiques à détecter de très faibles valeurs (ordre du ppb ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$) à des distances de quelques centaines de mètres des sources. Si flux réel émis trop faible, risque fort d'être obligé de se positionner trop près des sources et de ne pas pouvoir modéliser
Incertitudes associées (appareils de mesure et environnementales)	Incertitudes liées à l'utilisation d'un modèle de dispersion atmosphérique Incertitudes liées aux hypothèses d'homogénéité des sources Très forte dépendance de la stabilité des conditions de vent (direction surtout) car besoin de mesures fixes sur de longues périodes (1h minimum)
Maturité technique, référentiels existants (guides, normes, références existantes...)	-

4.5 Méthode 3: MeFTIR, mesure mobile concomitante de concentration (COVt ou COV spécifique) et d'un gaz traceur à débit connu.

4.5.1 Principe

La méthode MeFTIR est une technique optique basée sur la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), spectroscopie utilisée en mode actif, la source de lumière étant artificielle. Les mesures réalisées permettent, via l'obtention de spectres d'absorption infrarouges correspondants, de qualifier et quantifier les concentrations des différents composés gazeux présents dans l'air échantillonné au niveau du toit du véhicule.

L'absorption des infrarouges par les liaisons chimiques carbone – hydrogène et carbone – carbone (simple ou double) étant très importante, cette méthode est très sensible pour la mesure des concentrations d'alcane ou d'alcènes, qu'ils soient aliphatiques, cycliques, avec groupes fonctionnels ou non. Afin d'augmenter la sensibilité de la méthode, le spectromètre FTIR est équipé d'une cellule de White, cellule permettant d'obtenir un trajet optique des infrarouges de près de cent mètres. Des niveaux de concentration de l'ordre de quelques ppb peuvent ainsi être atteints.

L'analyseur MeFTIR est embarqué dans un moyen mobile. Cette méthode permet la mesure des niveaux de concentration en COV et d'un gaz traceur en un point situé au niveau du toit du moyen mobile. L'air extérieur est extrait à l'aide d'une pompe grand débit et analysé en continu par un spectromètre infra-rouge (Bruker IRCube), comme présenté dans la figure suivante:



Figure 35: Montage du MeFTIR – unité mobile de mesure

La méthode consiste à circuler sous les vents de la source de manière à traverser le panache, comme présenté dans la figure suivante:

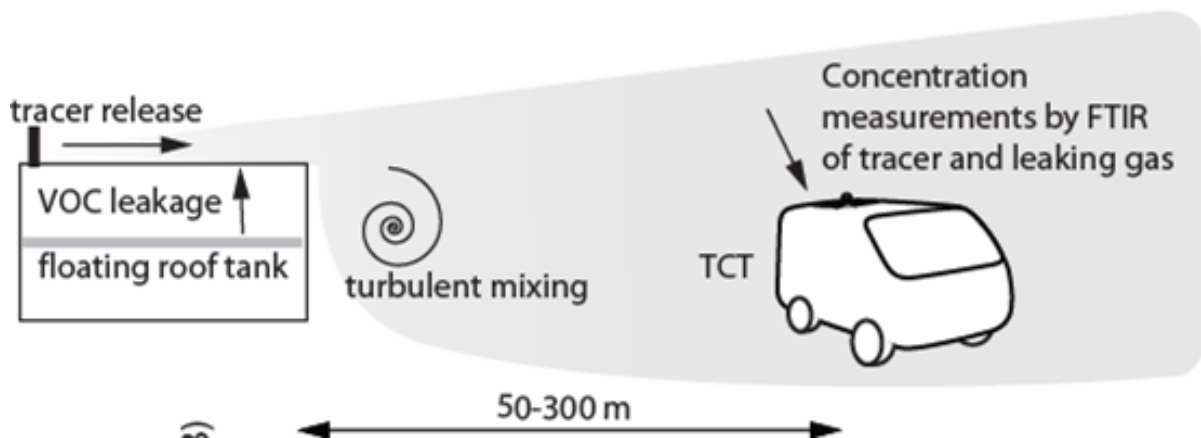


Figure 36: illustration du mode de fonctionnement du meFTIR (illustration au cas des COV diffus au stockage d'une unité chimique)

La mesure étant basée sur l'acquisition du spectre IR, de nombreux produits peuvent être mesurés de manière concomitante : alcanes, alcènes, aromatiques, N₂O, etc. La connaissance de la composition chimique des émissions (cf phase 1) est cependant importante car elle permet d'affiner les résultats par la prise en compte spécifique des spectres des composés majeurs.

Le MeFTIR ne permet la réalisation de mesures de concentration qu'au niveau du toit du moyen mobile, à hauteur de la prise d'air. Afin de pouvoir déterminer les flux émis, cette méthode nécessite l'injection à débit connu d'un gaz traceur (ici N₂O) dans ou à proximité de la source d'intérêt.

Le flux de la source étudiée, Q_s, est alors déterminé par la résolution de l'équation suivante :

$$Q_s = Q_t \times C_s / C_t$$

Avec Q_t le débit de traceur, C_t la concentration en traceur et C_s la concentration en gaz recherché. Cette détermination peut être moyennée à partir de l'ensemble des valeurs obtenues lors du transect sous les vents de la source (**version mobile**) ou à partir de mesures multiples réalisées en un seul emplacement (**version statique**), idéalement à l'emplacement où les concentrations au sol sont maximales pour augmenter la sensibilité.

Le MeFTIR peut être mis en œuvre sous des conditions météorologiques variables et également la nuit. La méthode repose sur l'hypothèse que le traceur et le polluant diffusent de la même façon dans l'atmosphère.

Le gaz traceur utilisé au cours de cette étude est le N₂O, émis à partir d'une bouteille de gaz équipée d'un manodétendeur et d'un débitmètre à bulle. Le débit est constamment vérifié et le flux déterminé par pesée de la bouteille en début et fin d'injection. Pour les différents essais réalisés, l'injection du gaz traceur a été réalisée au sein du bâtiment, là où l'air extérieur pénètre le bâtiment, de manière à ce que le traceur se mélange rapidement avec les COV émis et soit évacué rapidement en dehors du bâtiment (évite les effets « tampons »).

L'avantage ici est d'obtenir en quasi continu des données dynamiques du composé recherché et du gaz traceur sous les vents de la source considérée. Ceci permet de localiser en direct la position du panache (différence entre signal et bruit de fond supérieur à 50 ppb), de vérifier que les deux panaches sont bien corrélés (ce qui garanti un bon mélange du traceur au niveau de la source ou peut permettre d'identifier d'autres sources) et de s'affranchir des changements de direction des vents éventuels.

4.5.2 Mise en œuvre

La méthode 3 a été mise en œuvre en versions mobiles et statiques aux dates suivantes :

- Mardi 3 septembre 2013 (14:50 à 18:00),
- Mercredi 4 septembre 2013 (10:30 à 18:00),
- Jeudi 5 septembre 2013 (10:30 à 16:15).

Compte-tenu de la fermeture du site la nuit et les week-ends, il n'a pas été possible de réaliser des essais avec la méthode 3 durant ces périodes et de déterminer les flux émis correspondants.

4.5.3 Résultats

Au cours de la période d'étude, 120 passages ont pu être réalisés, sous des conditions de vents variables. L'ensemble des résultats est présenté sur la figure suivante :

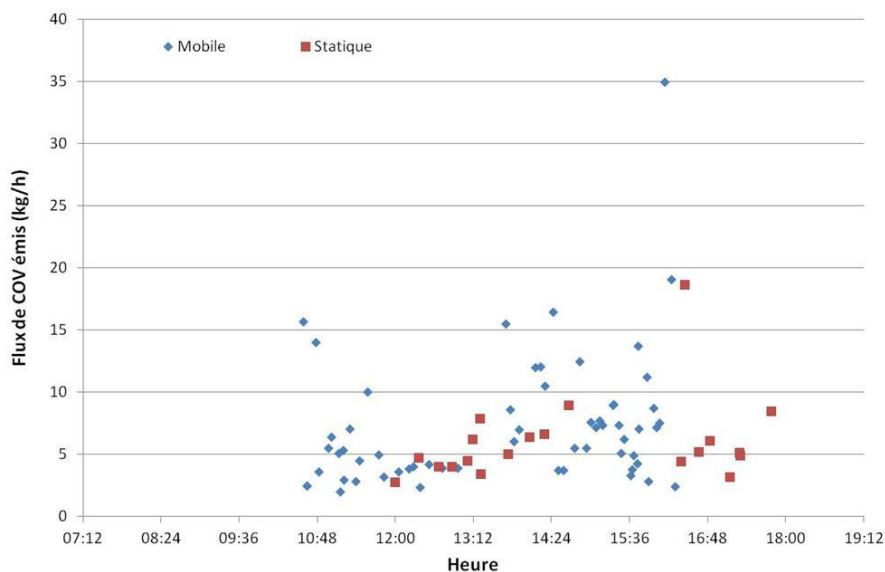


Figure 37: flux de COV émis (kg/h) en fonction de l'heure de la mesure – méthode MeFTIR

Les différents flux déterminés au cours de ces trois jours sont variables. Si une grande partie de ces flux sont inférieurs à 5 kg/h, les flux enregistrés au cours des journées des 4 et 5 septembre sont parfois nettement plus importants, allant jusqu'à 15 à 20 kg/h.

En faisant l'hypothèse que le taux de renouvellement de l'air au sein du bâtiment des fosses reste globalement constant, on peut considérer que le flux de COV émis par le bâtiment est proportionnel au niveau de concentration en COV dans le bâtiment. On peut alors représenter les niveaux de concentration mesurés au sein du bâtiment des fosses et les flux déterminés en parallèle par la méthode 3, comme présenté en page suivante.

Si la similitude des évolutions n'est pas aussi franche qu'avec la méthode SOF, les flux déterminés par la méthode 3 restent néanmoins cohérents avec les évolutions dynamiques des niveaux de concentration au sein du bâtiment.

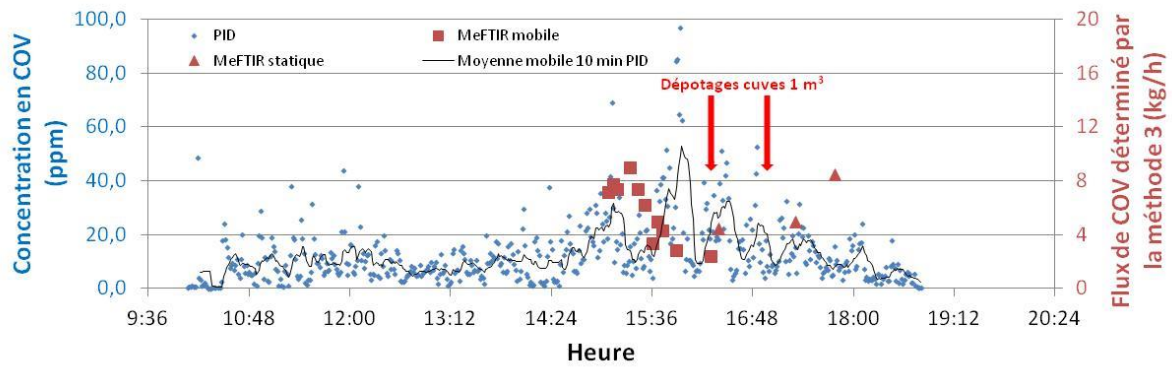


Figure 38: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode 3 – 3 septembre 2013

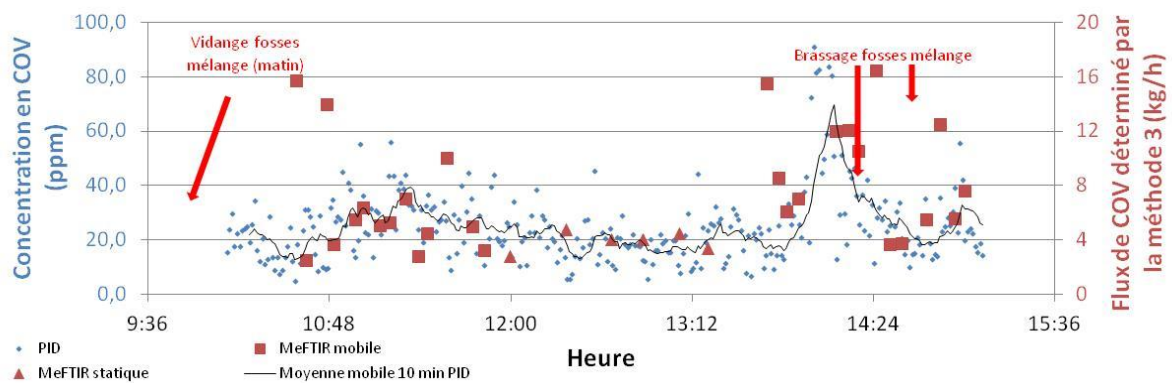


Figure 39: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode 3 – 4 septembre 2013

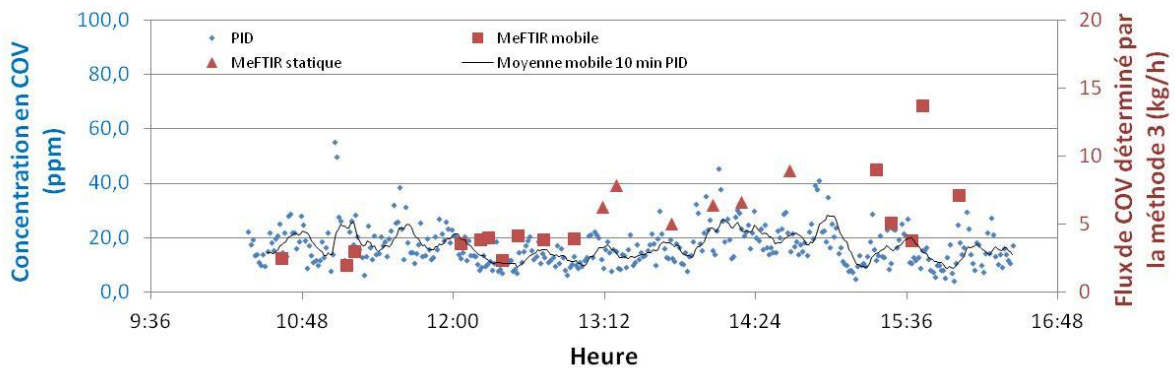


Figure 40: suivi des concentrations indicatives en COV et flux de COV déterminés par la méthode 3 – 5 septembre 2013

METHODE 3	
Nature des sources diffuses	Toute source : source surfacique, volumique, linéique, ponctuelle
Polluants mesurés	Tout polluant dont la métrologie est possible à l'air ambiant Mesure simultanée de différents polluants possible
Contraintes logistiques	Méthode simple à mettre en œuvre si présence de routes carrossables entourant le site à étudier. Très faibles si appareil autonome et peu encombrant : déplacement sur et autour du site facilité. Matériel embarqué, donc adaptabilité importante aux changements de conditions météorologiques. Nécessité d'avoir accès au site pour le largage du gaz traceur. Maîtrise de l'émission du gaz traceur, dont le débit doit être constant et le point d'injection garantissant un mélange rapide
DESCRIPTIF TECHNIQUE	
Principe de la mesure	Mesure des concentrations en composé d'intérêt et en gaz traceur par circulation multiple dans le panache en aval du site
Stratégie de mesure	Mesure concomitante des concentrations en un gaz traceur émis à débit connu pour déterminer les paramètres de dispersion Permet la détection de sources sous-estimées ou non soupçonnées (détection d'un pic non corrélé à un pic de gaz traceur)
Echelle spatio-temporelle des mesures (pour 5 ha)	Discrimination de deux sources possibles si leurs panaches respectifs ne se recouvrent pas Mesures réalisées sur des périodes courtes (15 min environ), mais nécessité de multiplier les mesures pour une meilleure fiabilité des mesures Méthode mobile qui s'adapte rapidement aux variations des conditions de vent Possibilité de mesurer la nuit
Coût associé à une campagne de mesure (pour 5 ha)	€ € €
Niveau de compétence nécessaire pour mise en œuvre	Mesure des concentrations : compétences faibles Largage gaz traceur : compétences modérées Exploitation des résultats : compétences importantes dans le traitement des résultats FTIR et l'exploitation de nombreuses données collectées
LIMITES DE LA METHODE	
Limite de détection	Capacités métrologiques à détecter de très faibles valeurs (ordre du ppb ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$) à des distances de quelques centaines de mètres des sources. Si flux réel émis trop faible (<0,5 kg/h), risque fort de ne rien détecter
Incertitudes associées (appareils de mesure et environnementales)	Incertitudes liées aux hypothèses d'homogénéité de la dispersion du gaz traceur et du gaz d'intérêt
Maturité technique, référentiels existants (guides, normes, références existantes...)	-

5 Comparaison des méthodes

Si l'on considère les résultats obtenus à l'aide de la méthode SOF comme les moins incertains, on peut positionner les résultats de chacune des méthodes par rapport à ceux-ci. Les mesures SOF et MeFTIR ont été réalisées de manière concomitante, alors que les mesures des méthodes 1 et 2 ont été réalisées en décalé, entre deux séries de mesures SOF.

5.1 Méthode 1

La méthode dite de base n'a pu être mise en œuvre que quatre fois au cours de la période d'étude, uniquement en période d'activité. La comparaison avec les données issues de la méthode de référence est de fait assez limitée, comme présenté en figure ci-dessous :

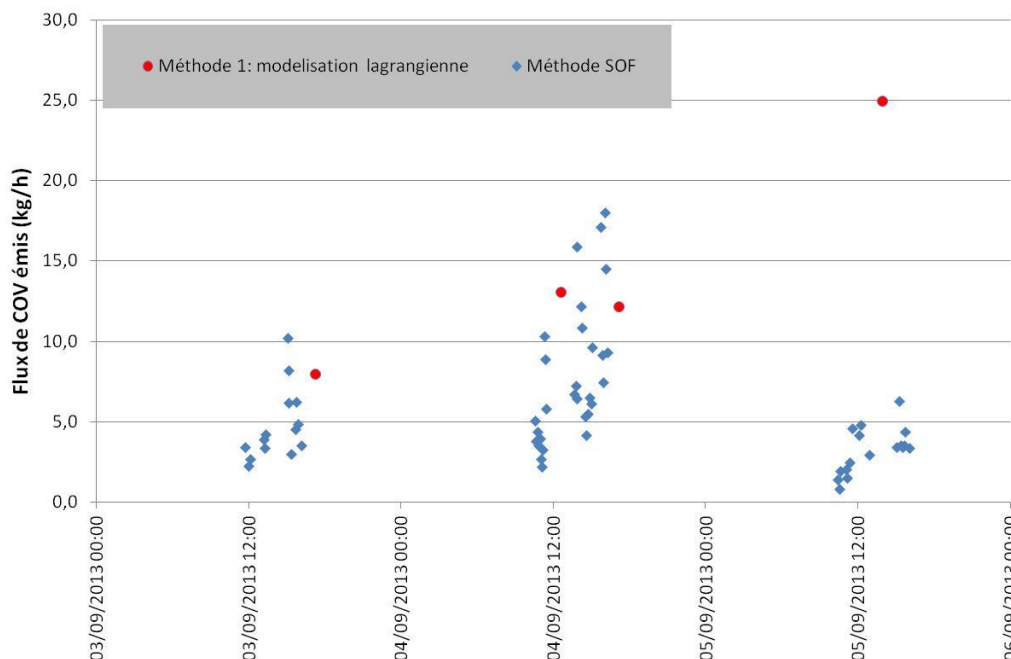


Figure 41 : comparaison des résultats de la méthode 1 avec ceux de la méthode repère

Si l'on considère isolément les résultats de la méthode 1, il semble que pour les trois premiers essais, les niveaux de flux déterminés soient bien comparables à ceux obtenus en moyenne par la méthode SOF. Pour le quatrième essai, le flux déterminé est très éloigné des autres valeurs.

La différence entre les quatre essais réside principalement dans la localisation des mesures : les trois premiers essais ont été réalisés au niveau du parking camion du site, à 80 mètres à l'ouest du bâtiment des fosses. Le quatrième essai a quant à lui été réalisé à plus de 200 mètres du bâtiment des fosses.

Si plus la distance à la source est importante, plus les modèles de dispersion sont utilisés dans une plage conforme, s'ajoute ici les incertitudes liées à la capacité à reproduire aussi fidèlement que possible les conditions de dispersion. En effet, si le premier emplacement est plus proche du site, son environnement est aussi moins encombré, avec aucun bâtiment ni végétation importante entre la source et l'emplacement de mesure. Le second emplacement, plus éloigné, l'est beaucoup plus.

Malgré tout, les niveaux de flux restent très proches et presque du même ordre de grandeur.

Si l'on considère le flux moyen obtenu à partir des quatre essais, le flux ainsi obtenu par la méthode 1 et spécifique à la période d'activité est de 14,6 kg/h. L'absence de mesure durant la période de non activité ne permet pas de déterminer le flux horaire moyen.

5.2 Méthode 2

L'injection d'un gaz traceur durant les périodes de mesure sous les vents apporte des informations complémentaires vis-à-vis de la qualité et de la représentativité de la modélisation. Ainsi, si les

concentrations en gaz traceur présenté dans le Tableau 12 indiquent que la modélisation semble correcte pour le premier essai, les essais 2 et 3 sont aussi entachés d'incertitudes. La modélisation de l'essai 4 semble malgré tout assez proche de la réalité.

A partir des débits de gaz traceur émis, des concentrations résultantes en COV et en gaz traceur, il est également possible de calculer le flux de COV émis, indépendamment de la modélisation, comme présenté dans le tableau suivant :

Tableau 13 : calculs des flux de COV moyens émis à partir des débits de gaz traceur

	Débit moyen gaz traceur émis (kg/h)	Concentration moyenne N ₂ O mesurée (µg/m ³)	Flux émis déterminé par la méthode 2 (kg/h)
03/09/2013 16:30 à 18:00	1,2	19,1	8,5
04/09/2013 11:40 à 13:30	1,1	39,5	4,2
04/09/2013 16:20 à 18:00	1,1	32,7	7,2
05/09/2013 13:15 à 14:30	1,1	8,7	8,5

D'après ces résultats, les résultats obtenus par modélisation gaussienne apparaissent comme encore plus éloignés de la réalité (cf. Tableau 11), avec une tendance à minorer très fortement les flux calculés.

Comparativement à la Figure 41, les données du tableau ci-dessus permettent d'aboutir à des flux plus cohérents avec les résultats moyens SOF obtenus ces mêmes journées :

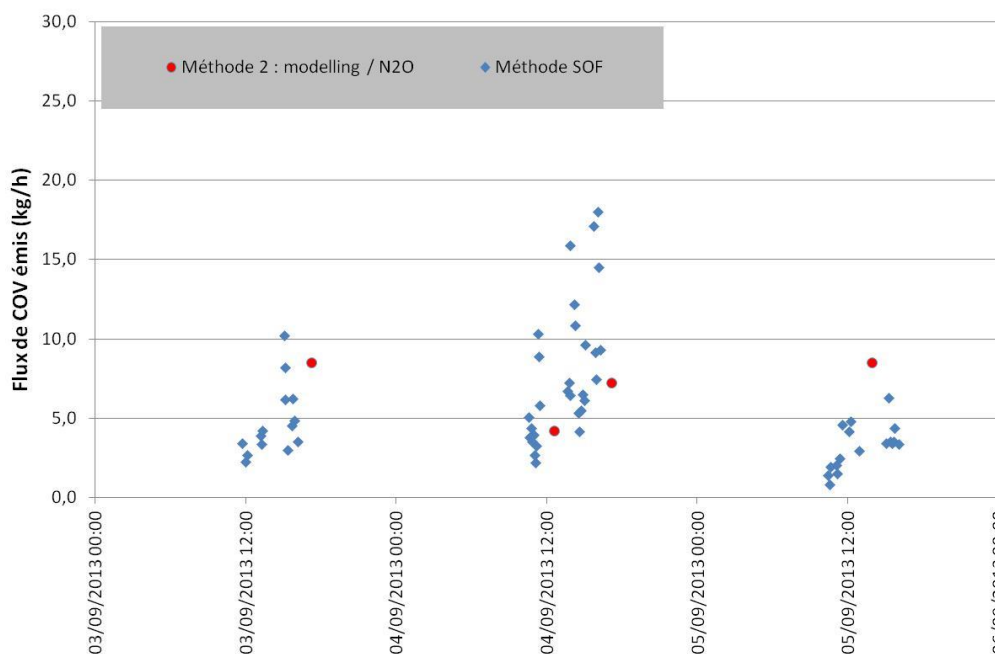


Figure 42 : comparaison des résultats de la méthode 2 avec ceux de la méthode repère

Si l'on considère le flux moyen obtenu à partir de ces quatre essais, le flux ainsi obtenu par la méthode 2 et spécifique à la période d'activité est de 7,1 kg/h. L'absence de mesure durant la période de non activité ne permet pas de déterminer le flux horaire moyen.

5.3 Méthode 3

La méthode 3 (MeFTIR) a permis d'obtenir 120 données de flux, mais uniquement en période d'activité. En effet, la fermeture du site les soirs et week-end n'a pas permis de réaliser des largages de gaz traceurs sur ces périodes.

Malgré tout, il est possible de comparer les résultats obtenus sur les périodes d'activités, comme présenté en figure suivante :

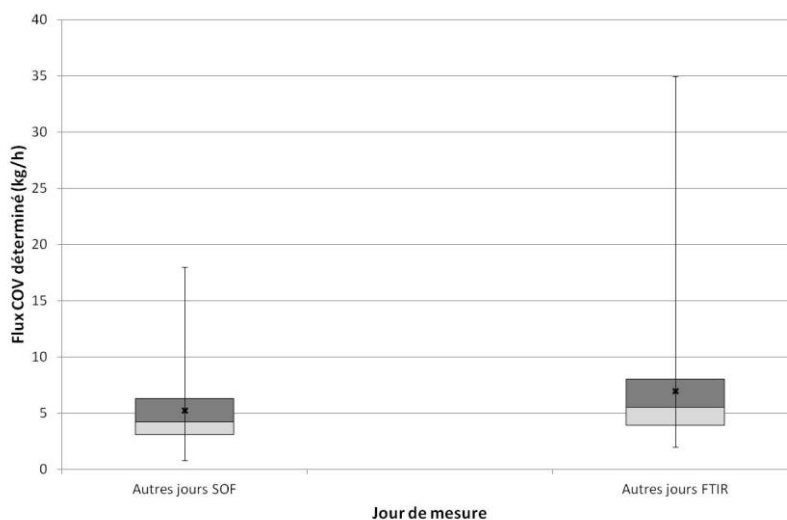


Figure 43 : comparaison des méthodes SOF et MeFTIR (hors WE et Vendredi)

Globalement, les méthodes SOF et MeFTIR conduisent aux mêmes résultats. La dispersion des valeurs semble plus importante pour la méthode MeFTIR, mais les gammes de valeurs sont tout de même très proches.

Si l'on considère le flux moyen obtenu à partir de ces essais, le flux ainsi obtenu par la méthode 3 et spécifique à la période d'activité est de 5,5 kg/h. L'absence de mesure durant la période de non activité ne permet pas de déterminer le flux horaire moyen.

5.4 Ensemble des méthodes

Si l'on considère l'ensemble des valeurs obtenues par les différentes méthodes, on obtient la figure suivante :

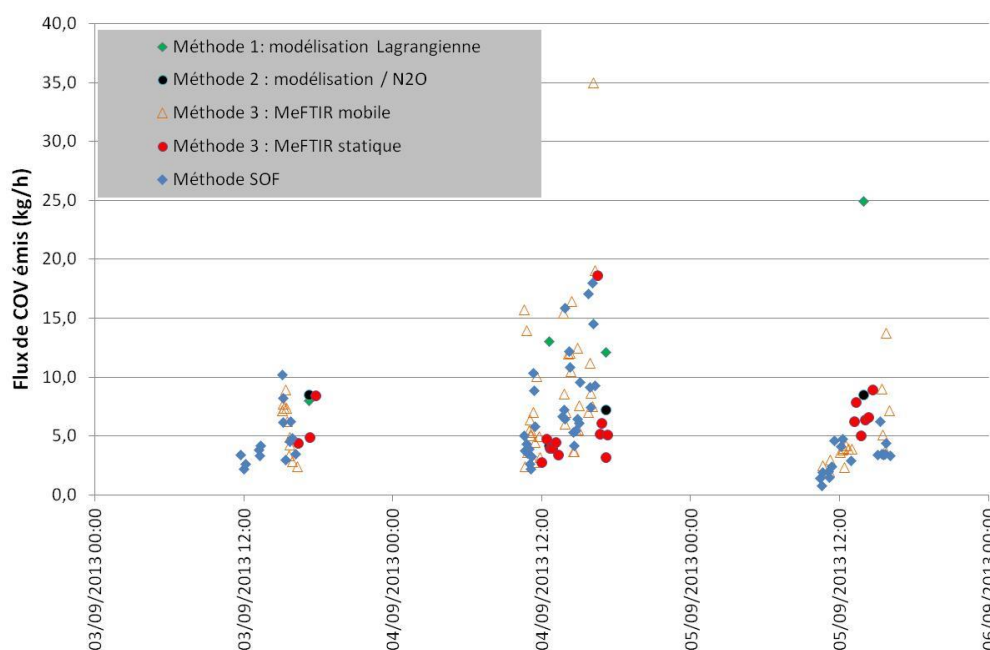


Figure 44 : comparaison de l'ensemble des résultats

Si l'on fait abstraction du nombre de données variable, les différentes méthodes conduisent toutes à des résultats de flux du même ordre de grandeur. C'est un point très intéressant, puisque chacune des méthodes est basée sur un concept relativement distinct.

Pour ce qui est de la détermination du flux moyen émis par le site, les résultats obtenus au cours de cette campagne ne permettent pas de conclure, compte tenu de l'impossibilité pour certaines techniques de faire des mesures le WE.

Tableau 14 : synthèse

Méthode	Nombre de mesures réalisées (période activités)	Flux de COV émis (période activités)	Flux de COV émis (période activités)	Commentaires / améliorations possibles	
		Moyen	Médian		
Repère - SOF -	84	5,3	4,2	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne appréciation de la variabilité dynamique des flux par le nombre de mesures élevé, - Augmenter le nombre de données hors période d'activité 	
1 – mesure de la concentration en COV en point fixe et modélisation de la dispersion	Modèle Lagrangien	4	14,6	12,2	<ul style="list-style-type: none"> - optimiser les paramètres d'entrée du modèle afin de renforcer la fidélité de la maquette 3D de la zone d'étude (utilisation des sols, typologie et positionnement des sources, etc.), - renforcer les connaissances sur l'aérodynamique au sein des bâtiments, ou la contraindre - augmenter nettement le nombre de mesures afin de s'affranchir des variations dynamiques de la source et de renforcer le poids statistique des valeurs,
	Modèle Gaussien	2	1,3	-	<ul style="list-style-type: none"> - optimiser les paramètres d'entrée du modèle afin de renforcer la fidélité de la maquette 3D de la zone d'étude (utilisation des sols, typologie et positionnement des sources, etc.), - renforcer les connaissances sur l'aérodynamique au sein des bâtiments, ou la contraindre - augmenter nettement le nombre de mesures afin de s'affranchir des variations dynamiques de la source et de renforcer le poids statistique des valeurs, - tester le modèle gaussien dans ses conditions optimales par des mesures intégratives et sur des périodes longues
2 – injection d'un gaz traceur et mesure de la concentration en COV/gaz traceur en point fixe et modélisation de la dispersion	4	7,1	7,2	<ul style="list-style-type: none"> - optimiser les paramètres d'entrée du modèle afin de renforcer la fidélité de la maquette 3D de la zone d'étude (utilisation des sols, typologie et positionnement des sources, etc.), - renforcer les connaissances sur l'aérodynamique au sein des bâtiments, ou la contraindre - augmenter nettement le nombre de mesures afin de s'affranchir des variations dynamiques de la source et de renforcer le poids statistique des valeurs, 	
3 - MeFTIR -	120	7,0	5,5	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne appréciation de la variabilité dynamique des flux par le nombre de mesures élevé, - Augmenter le nombre de données hors période d'activité (WE et nuit) 	

6 Conclusion

La mesure des flux de COV diffus émis par un site industriel peut être la réponse à différents objectifs. La réflexion doit tout d'abord être menée sur l'objectif des mesures, qui conditionne les niveaux de précision attendus sur les résultats et donc le choix de la méthode la plus adaptée et le plan d'échantillonnage conséquent. En termes d'objectifs, on peut lister :

- le positionnement de la source vis-à-vis d'autres émetteurs nationaux : précision faible, ordre de grandeur recherché,
- la qualification de bonnes pratiques ou de systèmes de traitement des émissions : précision moyenne, travail en relatif,
- la caractérisation de l'exposition sanitaire (étude ERS, etc.) : précision de l'ordre du kg/h recherchée,
- la déclaration du flux moyen émis (GEREP, etc.) : précision de l'ordre du kg/h recherchée.

Les différentes méthodes mises en œuvre conduisent toutes à des résultats de flux du même ordre de grandeur. La durée de la campagne étant limitée, la précision de chaque méthode, fortement dépendante du nombre de mesures obtenu, ne peut pas être ici correctement documentée. On peut cependant écrire :

- méthode 1 : doit être réservée aux topographies les plus simples, avec un encombrement minimal dans la zone de dispersion des émissions. De la qualité de la modélisation dépendra très fortement la précision des résultats. Cette méthode a le désavantage d'obliger à la réalisation de mesures fixes, potentiellement très dépendantes des conditions de vent,
- méthode 2 : l'injection d'un gaz traceur permet de tester très facilement la fidélité des résultats de modélisation et peut également permettre de déterminer directement les flux. Cette méthode a le désavantage d'obliger à la réalisation de mesures fixes, potentiellement très dépendantes des conditions de vent,
- méthode 3 : l'obtention rapide d'une évaluation des flux permet de multiplier le nombre de données et de renforcer ainsi la qualité des résultats de flux et de bien évaluer la dynamique d'évolution du flux au cours du temps. L'utilisation d'un moyen mobile permet également de mieux s'adapter aux variations dynamiques de l'écoulement de l'air. C'est une méthode qui peut permettre également de caractériser des opérations très ponctuelles.

En tant qu'étude de faisabilité, l'essentiel des méthodes a été conduit sur une durée courte (5 jours). La réalisation sur un plus long terme de chacune des méthodes peut permettre d'augmenter le nombre de mesures et ainsi diminuer les incertitudes. En effet :

- les modèles gaussien sont moins sensibles aux imprécisions sur le terme source avec des hypothèses de sources volumiques/surfaciques à l'échelle de/des bâtiments et sur des modélisations long terme.
- la mesure/modélisation sur le long terme permet également de niveler les épiphénomènes et permet de prendre en compte les périodes sans activités et/ou de nuit.

Si les flux détectés sont très faibles (de l'ordre du kg/h), les résultats de cette étude montrent qu'il est bien possible techniquement de déterminer des flux de COV émis par un site de regroupement / tri de déchets dangereux par chacune des méthodes testées. La mise en œuvre de chacune des méthodes s'est révélée simple, même si l'environnement du site étudié peut être délicat (bruit de fond élevé, encombrement important, inaccessibilité aux zones de dispersion des émissions).

D'après les résultats obtenus, les différentes activités du site occasionnent une élévation des flux en COV émis, tandis que la température semble moins influencer sur les émissions. Hors période d'activité, les flux déterminés semblent relativement comparables, ceci quelle que soit l'heure à laquelle ils ont été obtenus. La météorologie ayant été la même au cours de la période d'étude, il ne semble pas y avoir d'influence de la température extérieure sur les émissions du site. Ceci peut s'expliquer par l'inertie au sein des fosses, la température de celles-ci restant probablement constante au cours du temps.

Dans le but de déclarer les émissions annuelles d'un site, si l'on souhaite déterminer le flux moyen émis (moyenne hebdomadaire, mensuelle ou annuelle), il est de fait important :

- de déterminer les flux hors période d'activité (WE ou nuit), qui semblent relativement comparables,
- d'acquérir le maximum de données durant la période d'activité, qui doit comporter les différentes opérations rencontrées au cours de l'année,
- de déterminer enfin le flux moyen composite en prenant en compte la proportion de temps hors activité et avec activité.

Afin d'assurer une bonne représentativité, il semble que la détermination des flux émis par un site doive être conduite *a minima* sur une échelle d'une semaine calendaire incluant les périodes d'activité et de non activité.

La réalisation d'une étude complémentaire permettrait de mieux appréhender les différents facteurs d'influence pour chacune des méthodes. Dans ce cadre, l'apport de certaines méthodes (test au fumigène, taux de renouvellement d'air, etc.) ou la mise en œuvre de méthodes intégratives sur une plus longue période pourraient également compléter ces premiers résultats.

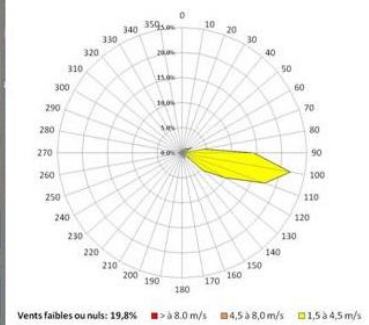
7 Annexes

ANNEXE 1

Descriptif des essais – Méthode 1

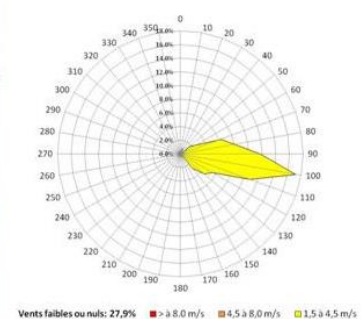
Essai 1:

- emplacement: 48°22'58,10 N / 2°57'47,63 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 03/09/2013 16:30
- date/heure fin: 03/09/2013 18:00
- nébulosité: ciel 100% dégagé, quelques cirrus très hauts
- concentration moyenne COVt mesurée: 135,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment:



Essai 2:

- emplacement: 48°22'58,10 N / 2°57'47,63 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 04/09/2013 11:40
- date/heure fin: 04/09/2013 13:30
- nébulosité: ciel 100% dégagé
- concentration moyenne COVt mesurée: 150,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment:



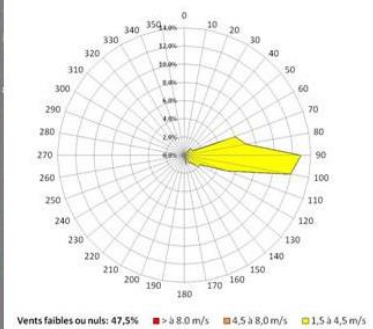
Essai 3:

- emplacement: 48°22'58,10 N / 2°57'47,63 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 04/09/2013 16:20
- date/heure fin: 04/09/2013 18:00
- nébulosité: ciel 100% dégagé
- concentration moyenne COVt mesurée: 215,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment:



- Ouvertures ouvertes
- Ouvertures fermées

★ Emplacement de mesure



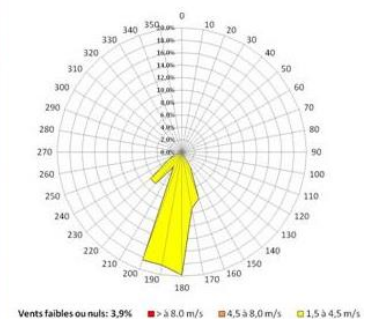
Essai 4:

- emplacement: 48°23'04,57 N / 2°57'51,85 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 05/09/2013 13:15
- date/heure fin: 05/09/2013 14:30
- nébulosité: ciel 100% dégagé
- concentration moyenne COVt mesurée: 67,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment :



- Ouvertures ouvertes
- Ouvertures fermées

★ Emplacement de mesure



ANNEXE 2

Descriptif des essais – Méthode 2

Méthode 2

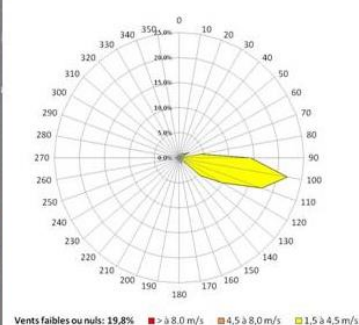
Essai 1:

- emplacement: 48°22'58,10 N / 2°57'47,63 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 03/09/2013 16:30
- date/heure fin: 03/09/2013 18:00
- nébulosité: ciel 100% dégagé, quelques cirrus très haut
- concentration moyenne COVt mesurée: 135,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- concentration moyenne N₂O mesurée: 19,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment:



— Ouvertures ouvertes
— Ouvertures fermées

★ Emplacement de mesure



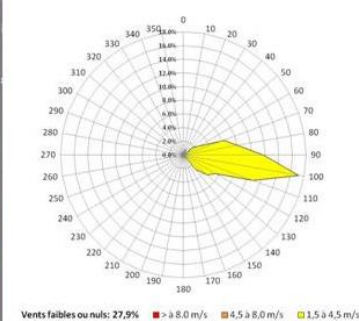
Essai 2:

- emplacement: 48°22'58,10 N / 2°57'47,63 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 04/09/2013 11:40
- date/heure fin: 04/09/2013 13:30
- nébulosité: ciel 100% dégagé
- concentration moyenne COVt mesurée: 150,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- concentration moyenne N₂O mesurée: 39,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment:



— Ouvertures ouvertes
— Ouvertures fermées

★ Emplacement de mesure

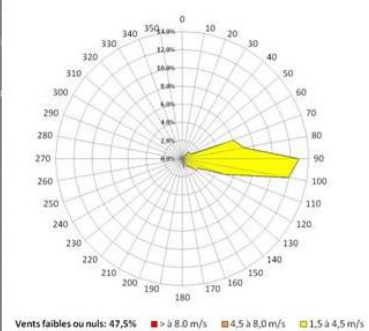


Essai 3:

- emplacement: 48°22'58,10 N / 2°57'47,63 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 04/09/2013 16:20
- date/heure fin: 04/09/2013 18:00
- nébulosité: ciel 100% dégagé
- concentration moyenne COVt mesurée: 215,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- concentration moyenne N₂O mesurée: 32,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment:



— Ouvertures ouvertes
— Ouvertures fermées
★ Emplacement de mesure



Essai 4:

- emplacement: 48°23'04,57 N / 2°57'51,85 E
- hauteur de mesure: 4,50 m
- date/heure début: 05/09/2013 13:15
- date/heure fin: 05/09/2013 14:30
- nébulosité: ciel 100% dégagé
- concentration moyenne COVt mesurée: 67,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- concentration moyenne N₂O mesurée: 8,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- config bâtiment:



— Ouvertures ouvertes
— Ouvertures fermées
★ Emplacement de mesure

