

Synthèse de l'étude sur les émissions in-situ des composés organiques volatils (COV) issus de la mise en œuvre des enrobés

2022 – 2024

Plan Régional Ozone



Diffusion : Avril 2025

Siège social :
3 allée des Sorbiers 69500 BRON
Tel. 09 72 26 48 90
contact@atmo-aura.fr



Conditions de diffusion

Dans le cadre de la réforme des régions introduite par la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (loi NOTRe du 16 juillet 2015), les Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air de l'Auvergne (ATMO Auvergne) et de Rhône-Alpes (Air Rhône-Alpes) ont fusionné le 1er juillet 2016 pour former Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes est une association de type « loi 1901 » agréée par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (décret 98-361 du 6 mai 1998) au même titre que l'ensemble des structures chargées de la surveillance de la qualité de l'air, formant le réseau national ATMO.

Ses missions s'exercent dans le cadre de la loi sur l'air du 30 décembre 1996. La structure agit dans l'esprit de la charte de l'environnement de 2004 adossée à la constitution de l'Etat français et de l'article L.220-1 du Code de l'environnement. Elle gère un observatoire environnemental relatif à l'air et à la pollution atmosphérique au sens de l'article L.220-2 du Code de l'Environnement.

Atmo Auvergne-Rhône-Alpes communique publiquement sur les informations issues de ses différents travaux et garantit la transparence de l'information sur le résultat de ses travaux.

A ce titre, les rapports d'études sont librement disponibles sur le site www.atmo-auvergnerhonealpes.fr

Les données contenues dans ce document restent la propriété intellectuelle d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes.

Toute utilisation partielle ou totale de ce document (extrait de texte, graphiques, tableaux, ...) doit faire référence à l'observatoire dans les termes suivants : © **Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (2025) Synthèse de l'étude sur les émissions in-situ des composés organiques volatils (COV) issus des enrobés.**

Les données ne sont pas rediffusées en cas de modification ultérieure.

Par ailleurs, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes n'est en aucune façon responsable des interprétations et travaux intellectuels, publications diverses résultant de ses travaux et pour lesquels aucun accord préalable n'aurait été donné.

En cas de remarques sur les informations ou leurs conditions d'utilisation, prenez contact avec Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

- par mail : contact@atmo-aura.fr

- par téléphone : 09 72 26 48 90



Financement

Cette étude d'amélioration de connaissances a été rendue possible grâce à l'aide financière particulière des membres suivants :

DREAL ARA, Cerema, Atmo Auvergne-Rhône-Alpes

Toutefois, elle n'aurait pas pu être exploitée sans les données générales de l'observatoire, financé par l'ensemble des membres d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes



Remerciements

Autour d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, du Cerema et de la DREAL, plusieurs acteurs ont accepté de participer au comité de pilotage du projet : DIR Massif-Central, Métropole de Lyon, Routes de France (RF), Fédération Régionale des Travaux Publics Auvergne-Rhône-Alpes (FRTP AURA), Organisme Professionnel Prévention Bâtiment Travaux Publics (OPPBTP). Nous les remercions de leur implication aux réunions du COFIL et de leur implication dans la relecture de ce présent document.

Nous remercions également Routes de France pour l'identification des chantiers et leur expertise, ainsi que tous les gestionnaires de voirie, Département de la Savoie, DIR Centre-Est, Autoroutes et Tunnel du Mont-Blanc (ATMB), d'avoir accepté d'offrir des terrains d'expérimentation pour cette étude, et les entreprises de construction (Colas, Eiffage, Eurovia) d'avoir accepté de modifier leur protocole de mise en œuvre, pour l'accès sur leur chantier et pour leur accueil afin de réaliser les différentes campagnes de mesure.

Résumé non-technique

Objectif de l'étude

Cette étude a pour principal objectif d'évaluer **l'impact de la température** de mise en œuvre des enrobés sur **les émissions de composés organiques volatils (COV)** précurseurs de l'ozone.

La production d'enrobés se fait généralement à des températures élevées **entre 150 et 180°C**. Deux approches visent à réduire l'impact environnemental :

- L'utilisation de matériaux recyclés ;
- Le recours à des techniques d'abaissement de température.

Les **31 COV précurseurs de l'ozone**, définis dans la **directive européenne 2008/50/CE**, sont principalement émis lors **du déversement du mélange dans le finisseur**, de **la mise en œuvre au finisseur** et **du compactage des enrobés**. Selon la bibliographie, les enrobés tièdes **génèrent moins** de COV que les enrobés à chaud, mais certains additifs peuvent augmenter les émissions de certains composés.

Méthodes de mesures des COV émis par les enrobés

Aucune méthode commune au niveau international n'existe à l'heure actuelle pour caractériser les fumées d'enrobés. Des protocoles en laboratoire de mesures des fumées d'enrobés ont été développés afin de pallier les difficultés d'échantillonnages rencontrées *in situ*. Les **tubes adsorbants** et les **canisters** sont les moyens de prélèvements les plus couramment rencontrés.

Protocole de mesure

Ce protocole a pour objectif de **mesurer les émissions sur site des composés organiques volatils (COV)** lors de la mise en œuvre d'enrobés chaud et tiède. Il s'agit d'une **étude exploratoire** car peu de données sont disponibles sur ces émissions dans des conditions réelles. Le protocole **a évolué** en fonction des retours d'expérience des premiers tests. Les prélèvements de l'air ambiant sont réalisés avec des canisters. Les analyses de ces canisters, pour étudier les 30 COV précurseurs de l'ozone (le formaldéhyde ne pouvant pas être mesuré par la technique des canisters), sont réalisées par **le laboratoire d'Atmo AuRA**.

Les campagnes de mesure sur les chantiers doivent se dérouler sur un ou deux jours. Elles incluent des **prélèvements de fond** et des **mesures sur les enrobés tièdes et chauds**. Le temps de prélèvement est fixé à 30 minutes. Les canisters sont placés **au plus près** de la mise en œuvre de l'enrobé, sans interférer avec le travail sur le chantier. Des informations détaillées sur chaque chantier, comme **le type de travaux**, **les équipements utilisés** et **la composition des enrobés**, doivent être collectées. Un **suivi des températures** des enrobés à différents moments du prélèvement est également réalisé.

Réalisation des campagnes de mesure

Deux campagnes tests ont été effectuées en fin 2022 et en 2023 afin de valider le protocole de mesure, sur **Charancieu** et **Bellegarde** (Chantier test). Puis, **trois campagnes** expérimentales ont été réalisées entre juin et juillet 2024, à **Feissons-sur-Isère** (Chantier 1), **Les Déserts** (Chantier 2) et **Le Châtelard** (Chantier 3), avec le protocole de mesure mis en place.

Pour chacune de ces trois campagnes expérimentales, les prélèvements ont été réalisés **sur une journée** avec une alternance entre chaud et tiède, et un procédé d'abaissement de température des enrobés similaire incluant **le moussage de bitume**. Les chantiers 2 et 3 présentent **de fortes similitudes** en termes de conditions de mise en œuvre, d'environnement du chantier et de formule d'enrobé. Les **conditions météorologiques ont été stables** et globalement homogènes pendant les trois journées de mesure.

Résultats des mesures pour les chantiers expérimentaux

Les mesures réalisées sur les trois chantiers expérimentaux montrent que les concentrations de COV mesurées sont **généralement faibles** (inférieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, voire $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), particulièrement sur les chantiers 2 et 3, où les températures des enrobés étaient légèrement plus faibles comparées à celles du chantier 1.

- **Sur le chantier expérimental 1** : Pour les alcanes, les concentrations mesurées sur l'enrobé chaud montrent **des valeurs atypiques très élevées** dans un groupe de prélèvements, probablement en raison d'une **source extérieure**. Après avoir exclu ces valeurs, les concentrations des alcanes sur l'enrobé chaud et tiède **sont assez similaires**, bien que les enrobés tièdes ont des concentrations légèrement plus élevées. Les hydrocarbures aromatiques montrent des concentrations **plus élevées** pour l'enrobé tiède par rapport à l'enrobé chaud.
- **Sur le chantier expérimental 2** : Les concentrations des alcanes sur l'enrobé chaud sont **plus élevées** que sur l'enrobé tiède, avec des **valeurs atypiques plus nombreuses**. Les hydrocarbures aromatiques sont **dans les mêmes ordres de grandeurs** pour les deux types d'enrobés, bien que l'enrobé chaud montre plus de valeurs supérieures à $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les autres composés aliphatiques montrent des concentrations **globalement similaires** entre chaud et tiède.
- **Sur le chantier expérimental 3** : Les concentrations des COV **sont inférieures à $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$** . Les prélèvements montrent des **concentrations globalement similaires** pour les deux types d'enrobés.

Synthèse, perspectives et limites de l'étude

Trois chantiers expérimentaux ont été observés, et bien que la température et le type d'enrobé diffèrent d'un chantier à l'autre, cela **n'a pas permis de confirmer l'hypothèse** selon laquelle les enrobés chauds émettraient plus de COV par rapport aux tièdes. De plus, Les résultats montrent que les concentrations mesurées **sont très faibles**, souvent **inférieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$** , ce qui rend difficile la mise en évidence de tendances claires. Enfin, les canisters placés sur les chantiers ont montré **des variations importantes entre eux**, ce qui peut être lié à une difficulté de bien canaliser les émissions ou une dilution due aux conditions extérieures.

Plusieurs limites sont ressorties dans cette étude, en plus des faibles concentrations mesurées pour les COV et de la forte variabilité des mesures, c'est l'échantillon de chantiers expérimentaux réduit, seulement trois, qui ne permet pas de tirer des conclusions généralisables. Il serait nécessaire **d'élargir l'étude** pour mieux comprendre les tendances. En outre, l'étude se concentre uniquement sur les émissions pendant la mise en œuvre des enrobés, mais il serait important **aussi de prendre en compte les émissions liées à la fabrication et au transport des enrobés**, où les différences de température sont importantes sur une plus grande fenêtre temporelle et peuvent avoir un plus grand impact.

L'étude a permis **d'acquérir des connaissances sur les émissions de COV** lors de la mise en œuvre des enrobés, en identifiant **les facteurs influents** et **les défis méthodologiques** liés aux mesures en milieu ouvert. Cependant, en raison des limites observées (échantillon réduit, variabilité des conditions extérieures et contraintes techniques), **la poursuite des travaux** n'est pas jugée pertinente. Les perspectives d'approfondissement sont jugées **trop complexes et coûteuses** pour un apport scientifique limité. **Ainsi, malgré les enseignements tirés, il a été décidé de ne pas prolonger l'étude.**

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. État des lieux de l’ozone et de ses précurseurs sur la Région Auvergne-Rhône-Alpes.....	12
2.1. Ozone et exposition de la population.....	12
2.2. Répartition des émissions des polluants précurseurs de l’ozone	13
3. Synthèse bibliographique : État des connaissances sur les mesures des Composés Organiques Volatils pour les enrobés	15
3.1. Les différentes techniques de production d’enrobés.....	15
3.2. Les composés organiques volatils	17
3.3. Méthodes de mesure des composés organiques volatils émis par les enrobés	19
3.3.1. Les différentes méthodes de mesure identifiées.....	19
3.3.2. Les différentes méthodes de prélèvements identifiées.....	21
3.4. Synthèse des entretiens.....	23
3.5. Conclusion de la synthèse bibliographique	23
4. Protocole des campagnes de mesure in-situ des Composés Organiques Volatils émis par la mise en œuvre des enrobés.....	24
4.1. Polluants mesurés et méthode d’analyse	24
4.2. Moyen de prélèvement	26
4.3. Protocole d’une campagne de mesure sur un chantier	28
4.3.1. Premier test de prélèvements par canister	28
4.3.2. Organisation d’une campagne de mesure sur un chantier	30
5. Résultats des campagnes de mesure de l’étude « Enrobés tièdes »	33
5.1. Campagnes de mesure	33
5.1.1. Méthodes et mesures.....	33
5.1.2. Analyses et résultats	37
5.2. Synthèse de l’analyse des chantiers	60
5.3. Limites et perspectives de l’étude	62
6. Annexes.....	64

Illustrations

Figure 1 : Carte du nombre de jours de dépassement de la moyenne journalière sur 8 heures de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenné sur 3 ans pour l’ozone sur la région Auvergne-Rhône-Alpes en 2023 (Source : Atmo AuRA).....	12
Figure 2 : Répartition des émissions de COV par secteur d’activité sur la région Auvergne-Rhône-Alpes en 2021 (Source : Atmo AuRA - Inventaire v2023).....	13
Figure 3 : Répartition des émissions de NOx par secteur d’activité sur la région Auvergne-Rhône-Alpes en 2021 (Source : Atmo AuRA - Inventaire v2023).....	14
Figure 4 : Schéma du système utilisé par Jullien et al. (2006) pour la mesure des émissions des enrobés	20
Figure 5 : Exemple d’opération de mise en œuvre et de compactage (Chong et al., 2014).....	21
Figure 6 : Exemple de canister de 6L (Source : Eurofins).....	22
Figure 7 : Exemple de rapport d’analyse des canisters après leur nettoyage.....	27
Figure 8 : Prélèvement effectué par un canister lors d’un chantier de mise en œuvre d’enrobés tièdes ...	28
Figure 9 : Concentrations des différents COV analysés par le laboratoire d’Atmo AuRA pour les deux prélèvements réalisés sur le chantier test.....	29
Figure 11 : Exemple d’étiquette de traçage de canister	31
Figure 12 : Carte de la région Auvergne-Rhône-Alpes avec les différents sites des campagnes de mesure	33
Figure 13 : Plan de prélèvement des 20 canisters sur le chantier test sur la commune de Bellegarde.....	34
Figure 14 : Plan de prélèvement des 22 canisters sur le chantier expérimental 1 sur la commune de Feissons-sur-Isère	35
Figure 15 : Plan de prélèvement des 22 canisters sur le chantier expérimental 2 sur la commune Les Déserts	36
Figure 16 : Plan de prélèvement des 22 canisters sur le chantier expérimental 3 sur la commune Le Châtelard	37
Figure 17 : Distributions des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier test.....	41
Figure 18 : Distribution des concentrations des hydrocarbures aromatiques prélevés pour l’enrobé tiède sur le chantier test.....	42
Figure 19 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier test et comparaison entre les prélèvements sur l’enrobé chaud et tiède	43
Figure 20 : Évolution des températures des enrobés sur la campagne de mesure du chantier 1 (Source : Cerema).....	46
Figure 21 : Distributions des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 1.....	47
Figure 22 : Distributions des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 1 sans les données issues du 2 ^{ème} groupe prélevé sur l’enrobé chaud	48
Figure 23 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier expérimental 1 et comparaison entre les prélèvements sur l’enrobé chaud et tiède	49
Figure 24 : Évolution des températures des enrobés sur la campagne de mesure du chantier 2 (Source : Cerema).....	52

Figure 25 : Distribution des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 2.....	53
Figure 26 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier expérimental 2 et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède	54
Figure 27 : Évolution des températures des enrobés sur la campagne de mesure du chantier 3 (Source : Cerema).....	57
Figure 28 : Distribution des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 3.....	58
Figure 29 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier expérimental 3 et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède	59
Figure 30 : Concentrations des COVt pour les trois chantiers expérimentaux selon la teneur en liant	61
Figure 31 : Concentrations des COVt pour les trois chantiers expérimentaux selon la température de mise en œuvre.....	61
Figure 32 : Schéma de principe de la fabrication à la mise en œuvre des enrobés et courbes de température théoriques associées (orange : enrobé chaud, bleu : enrobé tiède).....	63
Figure 33 : Courbes d'évolution de la température dans le temps et émissions associées dans l'hypothèse où les émissions sont proportionnelles à l'aire sous la courbe	63
Figure 34 : Devis pour la réalisation de 20 prélèvements par canister	75
Figure 35 : Plan de prélèvement des 20 canisters pour la campagne de mesure sur le chantier test en juillet 2023	76
Figure 36 : Tableau des températures des enrobés relevées lors de la campagne sur le chantier test.....	81
Figure 37 : Exemple de graphique en boîte à moustaches ou box-plot (Source : datatab.fr/tutorial/box-plot).....	82
Figure 38 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier test sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud	83
Figure 39 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier test sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède.....	83
Figure 40 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 1 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud	84
Figure 41 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 1 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède.....	84
Figure 42 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 2 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud	85
Figure 43 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 2 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède.....	85
Figure 44 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 3 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud	86
Figure 45 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 3 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède.....	86
Figure 46 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 1 selon la teneur en liant	87
Figure 47 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 1 selon la température de mise en œuvre.....	88
Figure 48 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 2 selon la teneur en liant	89

Figure 49 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 2 selon la température de mise en œuvre.....	89
Figure 50 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 3 selon la teneur en liant	90
Figure 51 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 3 selon la température de mise en œuvre.....	90

1. Introduction

La pollution par l'ozone a des effets multiples, notamment sur la santé humaine. L'ozone, est un gaz agressif pour les muqueuses oculaires et respiratoires, qui pénètre facilement jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. Il est responsable de 16 800 décès prématurés chaque année en Europe, et de 1 140 hospitalisations annuelles en région Auvergne Rhône-Alpes chez les 65 ans et plus. Gaz à effet de serre, il provoque également des baisses des rendements agricoles et forestiers de l'ordre de 15% pour le blé tendre, ou encore de 22% pour le hêtre par exemple. Il perturbe enfin la pollinisation des abeilles et la reproduction des insectes.

Dans le cadre du [Plan ozone](#) adopté en région Auvergne Rhône-Alpes, plusieurs actions sont déployées pour réduire les sources d'émissions de composés organiques volatils précurseurs d'ozone, le seul polluant en augmentation ces dernières années au niveau national et en région Auvergne Rhône-Alpes. Les concentrations en ozone ont augmenté de 20% en région AURA entre 2007 et 2023. L'ozone est un polluant secondaire, résultat de réactions entre dioxyde d'azote et composés organiques volatils (COV) en présence d'un fort ensoleillement et de fortes températures^{1,2,3} (Air Rhône-Alpes, 2014).

Dans le volet « industries » du Plan ozone, une action porte sur l'amélioration des connaissances et l'accompagnement au déploiement des enrobés tièdes pour les projets routiers, en partant de l'hypothèse que ces techniques permettent de réduire les émissions de COV des chantiers routiers, à travers un état des connaissances puis une campagne de mesures des COV émis par les enrobés tièdes et chauds. L'action se conclura par la diffusion de ces connaissances et un soutien éventuel au déploiement des enrobés tièdes par la commande publique.

Ce rapport présente une synthèse bibliographique, un protocole de mesure ainsi que les résultats des deux chantiers tests et des trois campagnes de mesure expérimentales effectuées sur la période de juin à juillet 2024, en collaboration avec les entreprises et les maîtrises d'ouvrage.

Cette action s'inscrit plus globalement dans le cadre de l'adoption de la [nouvelle Directive européenne sur la qualité de l'air le 14 octobre 2024](#).

¹ OMM, « N°1 - Mai 2017, Bulletin de l'OMM sur les gaz réactifs | E-Library ». https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=19939.

² OMM, « N°2 - Août 2018, Bulletin de l'OMM sur les gaz réactifs | E-Library ». https://library.wmo.int/index.php?lvl=bulletin_display&id=3960.

³ ADEME. « Ozone: formation et taux dans l'air », 2014. <https://librairie.ademe.fr/air-et-bruit/3071-ozone-formation-et-taux-dans-l-air.html>.

2. État des lieux de l’ozone et de ses précurseurs sur la Région Auvergne-Rhône-Alpes

L’ozone (O_3) est un polluant secondaire, c’est-à-dire qu’il n’est pas directement émis par des sources mais il se forme, sous l’effet du soleil et des fortes chaleurs, par des réactions photochimiques entre les oxydes d’azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV) présents dans l’air. L’augmentation des vagues de chaleur liée au changement climatique induit des conditions propices à la formation d’ozone.

Cette partie présente une description de l’état de la qualité de l’air pour l’ozone sur la région Auvergne-Rhône-Alpes en 2023, et la population exposée à des dépassements de la valeur cible actuelle ou de la valeur cible de la [nouvelle Directive européenne sur la qualité de l’air adoptée le 14 octobre 2024](#). Ainsi que la répartition par secteurs d’activité des émissions de ses précurseurs, les oxydes d’azote (NO_x) et les composés organiques volatils (COV).

2.1. Ozone et exposition de la population

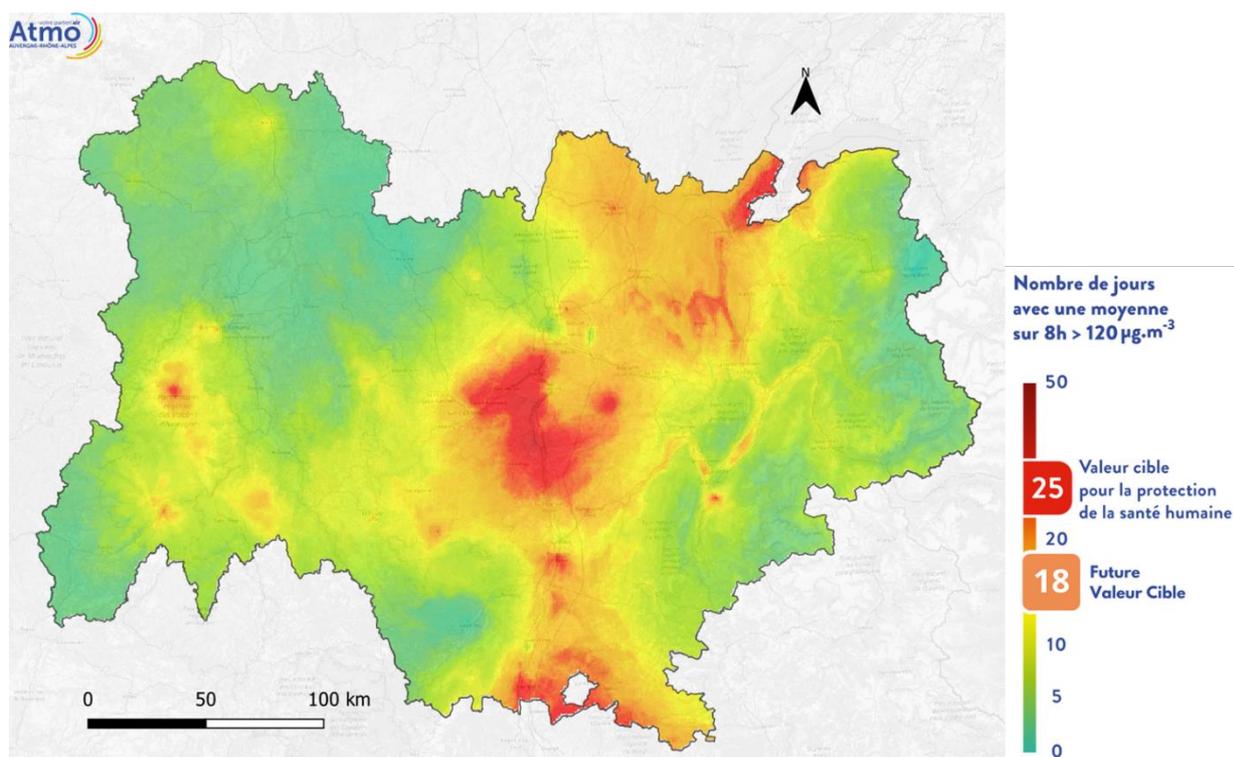


Figure 1 : Carte du nombre de jours de dépassement de la moyenne journalière sur 8 heures de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenné sur 3 ans pour l’ozone sur la région Auvergne-Rhône-Alpes en 2023 (Source : Atmo AuRA)

La Figure 1 montre le nombre de jours de dépassement de la concentration moyenne journalière sur 8 heures de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ moyenné sur 3 ans, c’est-à-dire ici pour 2021-2022-2023, sur la région Auvergne-Rhône-Alpes. La Vallée du Rhône est particulièrement exposée à des dépassements de la valeur cible actuelle (maximum 25 jours/an) ou de la valeur cible de la nouvelle Directive européenne (maximum 18 jours/an).

Tableau 1 : Part de la population exposée à un dépassement de la valeur cible actuelle, et de la future valeur cible de la nouvelle directive européenne pour l’ozone (Source : Atmo AuRA)

2023	Part de la population exposée à un dépassement	
	Valeur cible – 25 jours par an	Future valeur cible (nouvelle directive européenne) – 18 jours par an
Ozone	3,3%	32%

En 2023, 3,3 % de la population de la région est exposée à un dépassement de la valeur cible pour l’ozone, et 32% à un dépassement de la future valeur cible de la nouvelle directive européenne (18 jours par an) (Tableau 1).

2.2. Répartition des émissions des polluants précurseurs de l’ozone

La Figure 2 et la Figure 3 représentent les répartitions des émissions de composés organiques volatils (COV) et d’oxydes d’azote (NOx) sur la région Auvergne-Rhône-Alpes pour les différents secteurs d’activités en 2021.

Pour les COV, le secteur résidentiel est le principal émetteur avec plus de 62% des émissions sur la région, suivi par le secteur de l’industrie qui représente 29% des émissions. Pour les NOx, le transport routier est le principal secteur émetteur (45%), suivi par l’agriculture (22%) et par le secteur de l’industrie (16%).

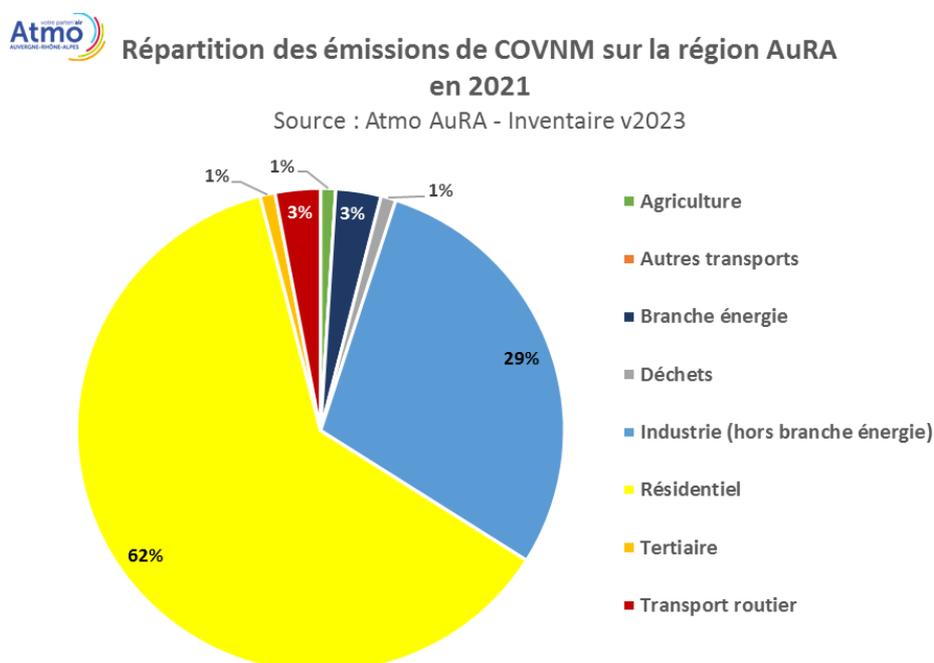


Figure 2 : Répartition des émissions de COV par secteur d’activité sur la région Auvergne-Rhône-Alpes en 2021 (Source : Atmo AuRA - Inventaire v2023)

Répartition des émissions de NOx sur la région AuRA en 2021

Source : Atmo AuRA - Inventaire v2023

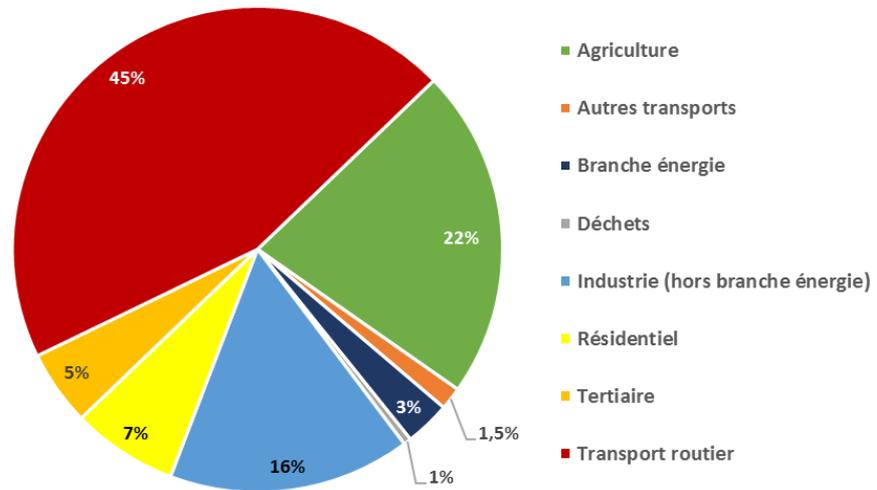


Figure 3 : Répartition des émissions de NOx par secteur d'activité sur la région Auvergne-Rhône-Alpes en 2021 (Source : Atmo AuRA - Inventaire v2023)

3. Synthèse bibliographique : État des connaissances sur les mesures des Composés Organiques Volatils pour les enrobés

L'objectif de cette synthèse bibliographique est de faire un état des lieux des différentes techniques de production d'enrobés existantes, de caractériser les polluants atmosphériques émis par les enrobés, et plus précisément les composés organiques volatils (COV), ainsi que d'identifier les diverses méthodes de mesures mises en œuvre pour quantifier ces polluants. Ce travail se base sur l'analyse de plus d'une cinquantaine d'articles de revues internationales, de thèses et de rapports d'étude.

3.1. Les différentes techniques de production d'enrobés

La technique la plus courante de production d'enrobés bitumineux repose sur des températures de fabrication élevées, entre 150 et 180°C et des températures minimales de répançage entre 115 et 145°C selon la classe du bitume utilisé⁴. La chauffe des matériaux nécessite une consommation d'énergie et génère des gaz à effet de serre (GES) et de polluants atmosphériques, notamment des composés organiques volatils (COV), des oxydes d'azote (NOx), du dioxyde de soufre (SO₂) et du monoxyde de carbone (CO), qui varient grandement selon le procédé de mise en œuvre, la nature des produits utilisés ainsi que le type de travail effectué.

Afin que la fabrication et la mise en œuvre des enrobés bitumineux répondent mieux aux objectifs de développement durable, deux leviers sont couramment utilisés :

- Utilisation de matériaux recyclés
- Recours à des techniques d'abaissement de température

Les enrobés dit « tièdes » ont été développés vers la fin des années 1990 avec des températures de fabrication moyennes abaissées d'au moins 30°C par rapport à la température de fabrication d'un enrobé chaud, soit à moins de 150°C. Cette diminution de température permet de réduire les consommations d'énergie et les émissions de GES et de polluants atmosphériques, tout en conservant les performances mécaniques des enrobés à chaud (Croteau, 2008 ; Oliveira 2011). Les procédés d'abaissement de température des enrobés sont regroupés en deux grandes familles : l'additivation et l'utilisation d'une mousse de bitume⁵.

Sous l'égide de l'IDRRIM, les acteurs des infrastructures de transport ont fixé comme un des objectifs du pacte de 2021 de réaliser d'ici 2030 80 % des enrobés courants à moins de 150°C lorsque les conditions le permettent – c'est-à-dire :

- Mise en œuvre mécanisée ;
- Température ambiante supérieure à 10°C ;
- Absence de pluie & vitesse de vent inférieure à 30km/h ;

⁴ NF P98-150-1, « Enrobés hydrocarbonés - Exécution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement - Partie 1 : enrobés hydrocarbonés à chaud - Constituants, formulation, fabrication, transport, mise en œuvre et contrôle sur chantier », 2010.

⁵ Cerema. « Abaissement de température des mélanges bitumineux », 2015. <http://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/abaissement-temperature-melanges-bitumineux>.

- Temps de transport entre usine & chantier inférieur à 1h ;
- ...

Les bienfaits environnementaux de l'utilisation des enrobés abaissés en température sont bien documentés depuis les années 2000. Des études visant à quantifier les réductions potentielles de consommation d'énergie et d'émissions de GES rapportent des réductions de l'ordre de 20% mais pouvant être comprises entre 10 et 50% selon le procédé d'enrobé tiède choisi par rapport à un enrobé à chaud de référence (Philippot et al., 2006 ; Davidson et al., 2007 ; Dumont et al., 2009 ; Vaitkus et al., 2009 ; Prowell et al., 2014). Prowell et al. (2014) avance une réduction moyenne de consommation de combustible en usine d'enrobés de 22% pour 3 usines d'enrobés et 3 procédés d'enrobés tièdes différents, relativement à un enrobé chaud de référence, et une réduction moyenne des émissions de CO₂ dans les émissions à la cheminée du même ordre de grandeur. L'étude menée par Rubio et al. (2013) en centrale d'enrobé rapporte une réduction de 58% des émissions de CO₂ dans les gaz de combustion prélevés au niveau de la cheminée pour un enrobé semi-tiède à l'émulsion (fabriqué à moins de 100°C) par rapport à un enrobé chaud de référence.

Les fumées de bitume sont un mélange complexe d'hydrocarbures présent sous la forme d'un aérosol mixte de vapeurs et de particules (Sutter et al., 2014). Les vapeurs correspondent aux molécules organiques les plus volatiles (les COV et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) les plus légers) et les particules en suspension contiennent, quant à elles, les molécules organiques les moins volatiles (COSV comme les HAP à plus de 3 cycles).

L'émergence de nouveaux procédés de fabrication, notamment les procédés d'abaissement de la température de fabrication des enrobés, a soulevé la question de l'influence de ces procédés sur la composition des fumées de bitume. Des études, généralement en laboratoire ou en centrale, ont été menées en se concentrant particulièrement sur les HAP et les COV. Cependant, peu de données existent sur les émissions de ces polluants atmosphériques lors de la phase de mise en œuvre.

À retenir

- **La technique d'enrobés la plus courante repose sur des températures de fabrication élevées, comprises entre 150 et 180°C.**
- **Deux approches sont utilisées pour répondre aux objectifs de développement durable des enrobés :**
 - **L'utilisation de matériaux recyclés ;**
 - **Le recours à des techniques d'abaissement de température.**
- **De nombreuses études ont montré les réductions des émissions de GES et de polluants atmosphériques des enrobés tièdes par rapport aux enrobés à chaud.**

3.2. Les composés organiques volatils

Cette étude se concentre sur les émissions de composés organiques volatils (COV) émis notamment lors de la mise en œuvre des enrobés bitumineux, qui contribuent à la formation d’ozone dans la troposphère^{1,6}.

Les COV jouant un rôle principal à la formation de l’ozone et couramment mesurés sont ceux cités dans la directive européenne sur la qualité de l’air (Directive 2008/50/CE, 2008)⁷ à savoir : n-hexane, n-heptane, n-octane, m-p xylène ou encore le o-xylène. Le benzène peut également être mesuré en raison de son caractère cancérigène et du fait qu’il s’agit d’un polluant réglementé en air ambiant, ainsi que le toluène en raison de sa nocivité et de son écotoxicité (Air Rhône-Alpes, 2014). La liste complète de la directive européenne est donnée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Liste des COV précurseurs d’ozone pour lesquels les mesures sont conseillés par la Directive 2008/50/CE, 2008⁷.

Éthane	trans-2-Butène	n-Hexane	m+p-Xylène
Éthylène	cis-2-Butène	i-Hexane	o-Xylène
Acétylène	1,3-Butadiène	n-Heptane	1,2,4-Triméthylbenzène
Propane	n-Pentane	n-Octane	1,2,3-Triméthylbenzène
Propène	i-Pentane (isopentane)	i-Octane (isooctane)	1,3,5-Triméthylbenzène
n-Butane	1-Pentène	Benzène	Formaldéhyde
i-Butane (isobutane)	2-Pentène	Toluène	Total des hydrocarbures autres que le méthane
1-Butène	Isoprène	Éthylbenzène	

D’après le Potentiel de Création de l’Ozone Photochimique (PCOP), l’éthylène est un composé très actif dans les processus photochimiques et dans l’environnement. Il est l’un des COV dont les concentrations commencent à être bien connues et considérées parmi les plus élevées (Air Rhône-Alpes, 2014).

Les émissions de COV, COSV (composés organiques semi volatils) et COVI (composés organiques volatils intermédiaires) sont principalement générées lors du chargement du mélange dans les camions, du transport vers un chantier, et des opérations effectuées sur le site du chantier telles que le déversement du mélange dans le finisseur, la mise en œuvre et le compactage de l’enrobé (Chong et al., 2014 ; Farshidi et al., 2013).

La température de fabrication et de mise en œuvre est le facteur majeur qui impacte la concentration de COV dans les émissions provenant des enrobés bitumineux (Cavallari et al., 2012 ; Prowell et al., 2014 ; Diab et al., 2016 ; Autelitano et al., 2017 ; Hugener et al., 2019 ; Borinelli et al.,

⁶ Bruxelles Environnement, « Emissions des précurseurs d’ozone (NOx, COV, CO et CH4) », 2014. <https://environnement.brussels/lenvironnement-etat-des-lieux/rapports-sur-letat-de-lenvironnement/synthese-2011-2012/air/emission-0>.

⁷ Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l’air ambiant et un air pur pour l’Europe (s. d.).

2020 ; Khare et al., 2020 ; Li et al., 2021). Plusieurs études en laboratoire ont mis en évidence la relation entre la température de chauffe des liants (modifiés ou non) et les émissions de COV. Callari (2012) a défini une loi de proportionnalité entre la température de chauffe des bitumes et les émissions de HAP, une famille de COV. Autelitano (2017) présente plutôt une relation pseudo-hyperbolique entre la température de chauffe et les émissions de COV de bitumes purs et de liants modifiés par un additif à base de cire. Par des mesures *in situ*, Hugener (2019) a établi une corrélation entre la température de mise en œuvre des enrobés et les émissions de COVt (composés organiques volatils totaux) à partir de mesures réalisées pendant la phase de mise en œuvre de 5 chantiers d'enrobés chauds et tièdes utilisant des additifs à base de zéolite, de mousse de bitume et d'additifs chimiques.

Ainsi, pour de nombreux procédés d'enrobés tièdes, les émissions de COV sont réduites par rapport aux enrobés chauds standards grâce au principe d'abaissement de température - bien que la composition des fumées soit généralement modifiée par l'ajout des additifs (PN MURE, 2018 ; Hugener et al., 2019 ; Espinoza et al., 2020 ; Xiu et al., 2020 ; Jiang et al., 2021). Hugener (2019) avance une réduction des émissions de COVt prélevés *in situ* de 50% pour des enrobés tièdes à la mousse d'enrobé par rapport à un enrobé chaud standard et des réductions moindres pour des enrobés modifiés à la zéolite. Aussi, Xiu (2020) a présenté, via des mesures en chambre de flux lors de la phase de mise en œuvre, des concentrations de COV moins élevées pour un enrobé tiède modifié aux granulats de caoutchouc (CRM) par rapport à un enrobé chaud de référence. Une étude⁸ du Projet Nationale MURE (MULTI-Recyclage des Enrobés tièdes) (PN MURE) montre également le bénéfice de la réduction des températures d'enrobés avec une diminution des concentrations des composés organiques contenus dans les fumées.

Cependant, ces gains sont majoritairement estimés lors de la phase de fabrication des enrobés ou en laboratoire, et très peu de données sont mesurées pour les émissions de polluants atmosphériques lors de la phase de mise en œuvre.

En parallèle, la question de la qualité de l'air a fait émerger des procédés de fabrication d'enrobé utilisant des additifs, non-spécifiques aux enrobés tièdes, dont l'objectif est de réduire les émissions de COV, notamment en Chine où l'enjeu des polluants atmosphériques est important. Ainsi, des études en laboratoire ont été menées pour caractériser l'effet inhibiteur d'émission de COV de certains produits ajoutés dans la chaîne de production des enrobés (Autelitano et al., 2017 ; Tang et al., 2020 ; Zhou et al., 2020 ; Jiang et al., 2021 ; Chen et al., 2022). Autelitano (2017) a comparé en laboratoire les émissions de COV de bitumes purs et de liants modifiés à la cire (destinés aux enrobés tièdes) à différentes températures. Il rapporte des réductions jusqu'à 80% à 90°C par rapport à des bitumes à 180°C. Il prouve ainsi que ces additifs fluxant peuvent également avoir un effet inhibiteur de COV via la formation d'une structure micro et macro-cristalline avec le bitume piégeant ainsi les composés volatils. Dans la même optique, Jiang (2021) a démontré au moyen d'une expérimentation en laboratoire qu'une combinaison optimale d'additifs à base de cire et d'agents ignifugeant pouvant être introduits dans les enrobés chauds permet de réduire les émissions de COV de 45% en limitant en particulier les émissions d'hydrocarbures alicycliques et d'hydrocarbures aromatiques.

Cependant, certaines études mettent en avant une ambiguïté quant aux contributions des additifs introduits dans les enrobés tièdes dans les émissions de COV (Philippot et al., 2006 ; Farshidi et al., 2011 ; Rubio et al., 2013 ; Farshidi et al., 2013 ; Prowell et al., 2014 ; Xiu et al., 2020). Certains additifs, de composition inconnue ou brevetée, peuvent dans certains cas entraîner une augmentation des émissions de COV par rapport à des enrobés à chaud conventionnels. Philippot (2006) et Prowell

⁸ PN MURE, 2018. « Analyse comparative des émissions selon les procédés de fabrication ». www.pnmure.fr

(2014) observent en usine d'enrobé que les concentrations de COV dans les émissions à la cheminée peuvent être plus élevées pour certains procédés d'enrobés tièdes. Aussi, Farshidi (2013) mesure *in situ* des émissions plus élevées de COV pour certains enrobés tièdes. L'étude conclut qu'aucune généralisation n'est possible quant à la contribution positive des procédés tièdes sur les émissions de COV. Par une méthodologie similaire, Xiu (2020) observe une augmentation des émissions de certains COV et de HAP lors de l'utilisation d'un additif à base de caoutchouc (non-utilisé en France), bien que la température moindre permette d'équilibrer cette hausse liée à l'introduction de l'additif.

À retenir

- **Les 31 COV précurseurs de l'ozone sont définis dans la directive européenne (Directive 2008/50/CE, 2008).**
- **Les émissions de COV sur un chantier sont principalement générées lors du déversement du mélange dans le finisseur, du pavage et du compactage.**
- **De nombreuses études ont montré que les températures importantes des enrobés augmentent les émissions de COV.**
- **Cependant, quelques études montrent que des émissions plus importantes de certains composés organiques peuvent avoir lieu lors de l'utilisation de certaines techniques d'enrobés tièdes, notamment avec l'utilisation de certains additifs.**

3.3. Méthodes de mesure des composés organiques volatils émis par les enrobés

La recherche bibliographique des différentes méthodes de mesures des composés organiques volatils sur enrobés (i.e. tièdes et chauds) a mis en évidence l'existence d'une grande diversité de méthodes normalisées. Les chercheurs ont donc aujourd'hui de nombreuses options disponibles lorsqu'ils planifient une étude sur la caractérisation des fumées d'enrobés. Cette diversité de méthodes provient plus globalement des diverses réglementations spécifiques existantes et surtout du fait qu'il n'existe actuellement aucune méthode commune au niveau international ou national pour caractériser les fumées d'enrobés (Deller et al., 2022).

3.3.1. Les différentes méthodes de mesure identifiées

- Les mesures en laboratoire

Mesurer et caractériser les fumées émanant des enrobés sur site (i.e. chantier) n'est pas chose aisée. Les variations climatiques, les opérations de compactage et de circulation d'engins (e.g. compacteur) peuvent en effet perturber les mesures. Différentes méthodes de caractérisation et de quantification ont donc été développées en laboratoire pour pallier les difficultés rencontrées sur site.

Jullien et al. (2006) proposent par exemple un système alternatif de mesure des émissions des enrobés en laboratoire. La méthode consiste à simuler tout d'abord, la pose d'un enrobé ciblé dont

l'épaisseur est identique à l'épaisseur mise en place sur le chantier. Puis dans un second temps, une chambre de mesure, sous la forme d'un demi-tonneau en acier, est déposée sur la plaque pour y effectuer les mesures. Les mesures réalisées dans cette étude concernent principalement les composés organiques volatiles (COV) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Pour ce faire, la sortie de la chambre a été connectée à la fois à un détecteur à ionisation de flamme et à un thermocouple pour obtenir une quantification en temps réel des COV totaux et de la température. Un filtre supplémentaire a été également utilisé pour l'analyse détaillée des COV et des HAP par chromatographie en phase gazeuse après échantillonnage (AFNOR, 1991⁹).

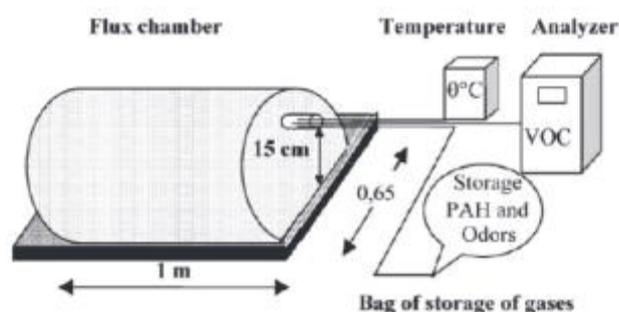


Figure 4 : Schéma du système utilisé par Jullien et al. (2006) pour la mesure des émissions des enrobés

D'autres études en laboratoire présentant d'autres protocoles expérimentaux existent également. Brandt et al. (1999) ont créé un dispositif de laboratoire dans lequel des fumées d'enrobé pouvaient être générées de manière reproductible dans des conditions bien contrôlées. Les fumées ont ainsi été collectées par l'utilisation de cassettes filtrantes standards de 37 mm, avec une combinaison de filtres constituée d'une fibre de verre de 37 mm de type A/E suivie d'une membrane d'argent de 37 mm de 0,8 mm. Bolliet et al. (2015) ont, quant à eux, échantillonnés les émissions de 5 enrobés commerciaux différents en laboratoire par l'intermédiaire de tube adsorbant XAD-2 + charbon de bois. Ces échantillons ont ensuite été analysés par différentes méthodes existantes similaires à celles utilisées sur le terrain. Ces méthodes sont explicitées dans l'Annexe 1.

- Les mesures sur site de production de l'enrobé et sur chantier

Que ce soit sur le site de production de l'enrobé ou sur chantier, la bibliographie a mis en évidence deux étapes majeures dans les protocoles de mesures :

- La méthode de prélèvement de l'échantillon ;
- La méthode d'analyse quantitative et qualitative de l'échantillon.

Seul un article scientifique du corpus analysé présente une méthode de mesure directe, c'est-à-dire sans prise d'échantillon, en utilisant un appareil d'analyse donnant la concentration de COV en continu. Cet appareil est un détecteur à photo ionisation nommé PID (Photo Ionization Detector) (Cui et al., 2020) qui permet donc de connaître la concentration totale de COV présents dans l'atmosphère pour une concentration variant de 0,1 ppm à 10 000 ppm. La méthode PID utilise une source de lumière ultraviolette (UV) pour décomposer les COV présents dans l'air en ions positifs et négatifs. Ensuite, la charge du gaz ionisé est détectée ou mesurée comme la concentration totale de COV sans toutefois les caractériser. Cette méthode de mesure est très adaptée pour le terrain et surtout sur les chantiers puisque l'appareil peut être porté par un ouvrier au cours de ses opérations.

⁹ AFNOR (Association Française de Normalisation), NFX 43-300. Emissions de sources fixes – Echantillonnage de gaz en continu par méthodes extractives. Recueil de normes Françaises. Toulouse, France : Paragraphe, 1991. p. 283–96.

Cependant, les résultats sont à prendre avec du recul notamment lorsque qu'il s'agit des mesures des mélanges de substances complexes, car cela peut impacter le facteur de réponse du PID.

Comme la mise en place des enrobés est effectuée dans un environnement en air ambiant, la concentration des polluants atmosphériques peut être affectée par les conditions météorologiques telles que la température, la vitesse et la direction du vent. Les conditions météorologiques et la température de l'enrobés doivent être enregistrées pendant le processus d'échantillonnage (Chong et al., 2014). Elle peut également être influencée par d'autres sources d'émission ne provenant pas du chantier. Pour ne pas prendre en compte ces émissions lors des prélèvements sur le chantier, des mesures de l'air ambiant de fond avant les travaux doivent être effectuées (Chong et al., 2014).

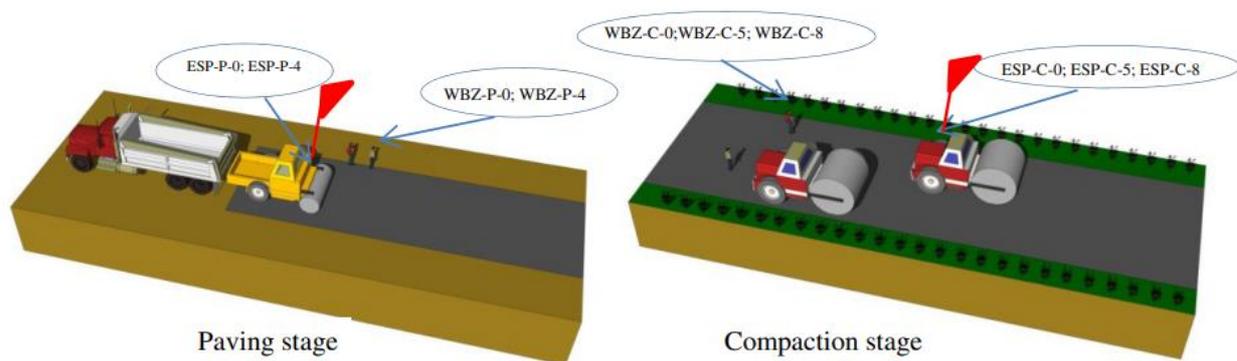


Figure 5 : Exemple d'opération de mise en œuvre et de compactage (Chong et al., 2014)

3.3.2. Les différentes méthodes de prélèvements identifiées

- L'échantillonnage par tube adsorbant

L'utilisation de tubes contenant des filtres adsorbant permet de concentrer de grands volumes de fumées de bitume sur une série de filtres, ce qui augmente considérablement la concentration des composés à l'état de traces qui peuvent être recueillis. Les émissions gazeuses d'enrobé sont ainsi pompées par un système adapté et recueillies dans des tubes contenant des filtres. Différentes configurations de ce système sont utilisées dans la recherche et il n'existe pas de système universellement standardisé (Deller et al., 2022). En général, le système se compose d'un filtre en PTFE (Polytétrafluoroéthylène) (Deygout et al., 2009 ; Sutter et al., 2018) ou en laine de verre pour éliminer physiquement les particules et, en aval, d'au moins un filtre pour recueillir les substances chimiques gazeuses ; il s'agit souvent d'un filtre à charbon (Zanetti et al., 2014 ; Bolliet et al., 2015) pour les COV et d'un filtre XAD-2 (Kriech et al., 2010 ; Sutter et al., 2018) pour les HAP. Souvent, une combinaison des deux filtres est utilisée pour analyser une gamme plus large de substances chimiques dans les émissions.

- L'échantillonnage par canister

D'après Guo et al. (2004) et Chong et al. (2014), la méthode d'échantillonnage par canister est la plus largement utilisée en raison de sa facilité de transport, de son volume d'échantillon suffisant et de sa stabilité de stockage. Cependant ce système d'échantillonnage est la moins représentative de l'ensemble du corpus utilisé pour ce travail bibliographique (2 études recensées : Chong et al., 2013 et Lin et al., 2016). Attention tout de même de ne pas tirer de conclusion trop hâtive sur ce sujet, la liste des articles scientifique analysés n'est pas exhaustive. De plus, cette méthode de prélèvement est reprise et utilisée dans des laboratoires français comme l'INERIS, qui utilise les canisters pour

prélever les composés organiques volatils (INERIS, 2011), ainsi que par l'EPA (l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis) (EPA, 1999).



Figure 6 : Exemple de canister de 6L (Source : Eurofins)

Les canisters sont des bonbonnes en acier passives, d'un volume de 1 à 6 litres. Plusieurs fonctionnements sont possibles :

- Le canister est mis sous vide juste avant d'être expédié sur le terrain. L'air est prélevé par aspiration naturelle à travers un capillaire permettant de contrôler le débit. Une électrovanne programmable, permet de démarrer l'échantillonnage au moment voulu, et de faire durer le prélèvement sur plusieurs heures (4 à 24 heures par exemple). Le point délicat est qu'au laboratoire, il faut effectuer le prélèvement depuis le canister par pompage. De plus, une fuite même faible sur le canister, entre le prélèvement et l'analyse au laboratoire, rend l'échantillon inutilisable. Enfin, le nettoyage du canister avant utilisation est critique, la présence de traces d'un échantillon antérieur pouvant contaminer l'échantillon suivant.
- L'air peut être prélevé à l'aide d'une pompe dont la sortie est reliée à l'entrée du canister, ce qui permet de le pressuriser. Un by-pass sur la pompe peut permettre de limiter le débit, et donc de jouer sur le temps de prélèvement. Le point délicat est que la pompe doit être non contaminante. Pour éviter cette contamination, des pompes entièrement métalliques (en inox par exemple) sont généralement utilisées.

À retenir

- **Aucune méthode commune au niveau international, ni national n'existe à l'heure actuelle pour caractériser les fumées d'enrobés.**
- **Des protocoles en laboratoire de mesures des fumées d'enrobés ont été développés afin de pallier les difficultés d'échantillonnages rencontrés *in situ*.**
- **Les tubes adsorbants et les canisters sont les moyens de prélèvements les plus couramment rencontrés.**

3.4. Synthèse des entretiens

Trois entretiens ont été réalisés dans le cadre de cette étude avec différents acteurs qui sont le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), la Direction Interdépartemental des Routes du Massif Central (DIR Massif Central), et la Métropole de Lyon, afin d'avoir un retour d'expérience sur l'utilisation des enrobés tièdes ainsi que d'avoir l'opportunité de trouver des chantiers pour réaliser les campagnes de mesure. À la suite de ces entretiens, un questionnaire de retour d'expérience a été envoyé et retourné par la DIR Massif Central et la Métropole de Lyon. Les réponses sont retranscrites dans le Tableau 19 de l'Annexe 4.

À retenir

- **Divers retours d'expérience des deux acteurs sur les enrobés tièdes :**
 - **Très peu utilisés à la suite d'une mauvaise expérience sur deux chantiers en 2010. Mais volonté de mettre en œuvre des enrobés tièdes en 2024**
 - **Premiers tests d'enrobés tièdes réalisés en 2007. Depuis 8 ans, le recours aux enrobés tièdes est la règle si les conditions le permettent**
- **Les enrobés tièdes sont utilisés pour la réduction de l'empreinte écologique des chantiers, pour améliorer les conditions de travail et réduire les nuisances des chantiers. Et, également, pour suivre la mise en place d'une circulaire en 2024 sur la décarbonation des travaux de chaussées**
- **Une des difficultés remontées est qu'une centrale ne produit pas en alternance de formules à chaud et tièdes sur des cycles courts dans la même journée pour une raison de sobriété énergétique. Il faut donc que les principes de fabrication à température abaissée soient partagés par tous lorsque les conditions extérieures sont réunies**

3.5. Conclusion de la synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique a ici permis de mettre évidence qu'il existait une grande variété de méthodes normalisées pour mesurer les composés organiques volatils (COV) émis par les enrobés, que ce soit en laboratoire ou sur site. Les mesures effectuées sur site de production de l'enrobé et sur chantier sont souvent réalisées par deux moyens de prélèvements principaux : les tubes adsorbants et les canisters. Au vu de nos objectifs et des moyens mis à disposition notamment concernant les dispositifs de mesures, il a été décidé d'utiliser le canister comme moyen de prélèvements pour nos futures phases de mesures.

La synthèse des entretiens a mis en avant le choix d'utiliser des enrobés tièdes pour réduire l'empreinte écologique des chantiers, pour améliorer les conditions de travail et réduire les nuisances des chantiers mais également pour suivre la mise en place de la circulaire en 2024 sur la décarbonation des travaux de chaussées, qui visent à généraliser les pratiques d'enrobés tièdes et de recyclage. Elle montre aussi divers retours d'expériences sur la mise en œuvre des enrobés tièdes ainsi que les différents leviers/opportunités et freins/difficultés à les utiliser lors des chantiers.

Pour la suite de cette étude, un protocole de mesure in situ des émissions de COV des enrobés a été rédigé et validé par tous les acteurs. Ce protocole a servi à mettre en place les campagnes de mesure qui ont été effectuées sur les années 2023 et 2024.

4. Protocole des campagnes de mesure in-situ des Composés Organiques Volatils émis par la mise en œuvre des enrobés

Ce protocole de campagne de mesure est plus précisément un protocole pour des mesures exploratoires des émissions in-situ lors de la mise en œuvre d'enrobés, qu'ils soient tièdes ou chauds. La littérature étudiée ne rapporte que très peu d'études réalisées sur les mesures des émissions de COV dans des conditions réelles de mise en œuvre des enrobés.

C'est pourquoi cette étude était exploratoire et que ce protocole était une première version de l'organisation des mesures de prélèvement de COV qui était amenée à évoluer au fur et à mesure des campagnes qui étaient réalisées et de leur analyse, ainsi que des expériences de terrain et des échanges avec les membres du COPIL.

4.1. Polluants mesurés et méthode d'analyse

Les polluants concernés par cette étude sont les composés organiques volatils (COV) précurseurs de l'ozone qui sont définis par la Directive 2008/50/CE, 2008¹⁰. Cela représente 31 composés qui sont cités dans le Tableau 2 de la Partie 3.2.

La quasi-totalité de ces composés peuvent être analysés par le laboratoire d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes (Atmo AuRA) suivant une méthode d'analyse de COV sur canister mise au point par le Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air¹¹ (LCSQA) dans les années 2000. La liste des composés, précurseurs de l'ozone, analysés par la méthode est donnée dans le Tableau 3 avec leur limite de quantification et leur potentiel de création d'ozone photochimique (PCOP). Seul le formaldéhyde n'est pas analysé, car la méthode par canister ne permet pas de le mesurer, seulement des cartouches imprégnées de DNPH¹² peuvent permettre son prélèvement. Son PCOP est important (52) mais il n'est pas le plus élevé parmi les composés de la liste de la directive.

La technique utilisée par le laboratoire pour l'analyse est la chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme (GC-FID)¹³. L'utilisation de 2 colonnes chromatographiques en simultané permet de séparer, en une seule analyse, l'ensemble des 30 COV précurseurs de l'ozone avec une résolution satisfaisante. L'analyseur est étalonné toutes les 4 semaines à partir d'un mélange de COV dans l'azote afin de garantir son bon fonctionnement et la fiabilité des résultats rendus.

¹⁰ Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (s. d.).

¹¹ <https://www.lcsqa.org/fr>

Organisme désigné par le ministère de l'environnement qui est chargé d'assurer la coordination technique du dispositif de surveillance de la qualité de l'air en France.

¹² Dinitrophénylhydrazine

¹³ <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2004/mines-douai/assistance-formation-personnel-reseaux-mesure-cov>

Tableau 3 : Liste des 30 COV précurseurs de l'ozone, définis par la Directive 2008/50/CE, 2008, mesurés par le laboratoire d'Atmo AuRA avec leur limite de quantification et leur potentiel de création d'ozone photochimique (PCOP).

Composés	Limite de quantification ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Potentiel de Création d'ozone photochimique (PCOP)^{14,15}
Éthane	0,06	12
Éthylène	0,07	100
Acétylène	0,01	9
Propane	0,05	18
Propène (propylène)	0,03	112
n-Butane	0,02	35
i-Butane (isobutane)	0,02	31
1-Butène	0,02	108
Éthylbenzène	0,04	73
1,2,4-Triméthylbenzène	0,05	128
trans-2-Butène	0,02	113
cis-2-Butène	0,02	115
1,3-Butadiène	0,02	85
n-Pentane	0,03	40
i-Pentane (isopentane)	0,03	41
1-Pentène	0,02	98
Trans-2-Pentène	0,03	112
Cis-2-Pentène	0,03	112
m+p-Xylène	0,04	106
1,2,3-Triméthylbenzène	0,05	127
Isoprène	0,03	109
n-Hexane	0,04	48
i-Hexane	0,04	43
n-Heptane	0,04	49
n-Octane	0,05	45
i-Octane (isooctane)	0,05	45
Benzène	0,03	22
Toluène	0,04	64
o-Xylène	0,04	105

¹⁴ Jenkin, M. E., N. R. Passant, et H. J. Rudd. « Development of species profiles for UK emissions of VOCs ». A report produced for the Department of the Environment, Transport & the Regions. AEAT\backslashEPSC-0044 Issue 1 (2000).

¹⁵ <http://www.atmo-alsace.net/medias/produits/Analyse de 31 COVNM Ann2.pdf>

4.2. Moyen de prélèvement

À partir des informations relevées dans la synthèse bibliographique (Partie 3) et des retours d'expériences d'Atmo AuRA, le choix du moyen de prélèvement, pour mesurer les émissions de COV, s'est porté sur les canisters (Figure 6). Ce sont des bonbonnes en acier d'un volume de 1 à 6 litres qui sont facilement transportables et dont la mise en œuvre est rapide. C'est un matériel robuste, en inox, qui peut supporter des températures élevées, jusqu'à 150°C. Pour réaliser les mesures sur le terrain, le canister est mis sous vide juste avant la campagne. Puis une fois sur site, l'air est prélevé par aspiration naturelle à travers un capillaire permettant de contrôler le débit et ainsi réaliser le prélèvement sur un temps défini. Ces appareils de prélèvement sont bien validés pour la mesure des concentrations de COV précurseurs de l'ozone dans l'air ambiant¹⁶.

Avant utilisation, les canisters sont nettoyés par Atmo AuRA par lots de 8 à l'aide d'un appareil appelé « Cleaner ». On effectue une série de cycles de nettoyage avec application d'un ruban chauffant sur la paroi extérieure des canisters pour empêcher l'adsorption des polluants sur la paroi intérieure. Un cycle de nettoyage commence par le remplissage des canisters avec de l'air zéro humidifié. Les canisters sont ensuite mis sous vide à l'aide d'une pompe primaire, puis d'une pompe turbomoléculaire. On effectue une quarantaine de cycles pour un nettoyage complet. À l'issue du nettoyage, un des 8 canisters est rempli d'air zéro humide et est analysé pour vérifier la conformité du nettoyage, par rapport à ce qui est indiqué dans la méthode d'analyse du LCSQA¹⁷. Celui-ci est conforme lorsqu'il n'y a pas de résidu de COV. Un exemple d'analyse des canisters nettoyés est présenté dans la Figure 7.

¹⁶ <https://www.srainstruments.fr/s/domaines-dapplication-de-lechantillonnage-au-moyen-de-canisters-ou-de-tubes-adsorbants-pour-les-cov/>

¹⁷ <https://www.lcsqa.org/fr/rapport/2004/mines-douai/assistance-formation-personnel-reseaux-mesure-cov>

		Rapport d'analyse de canister blanc		
Identification : F0.968		Indice de révision : 3	Page : 1/1	
N° Test :	1371	N° Canister :	1420	1724
			2109	1404
Test du :	15/03/23		1417	1956
			1959	1957
Date de nettoyage :	15/03/23	Par :	MOR	
CONFORME				
RESULTATS DU BLANC				
Composé analysé	Valeur analysée en ppb	Limite de Détection de l'appareil en ppb	Vert si valeur < LD	
éthane	0,00	0,06	-0,06	
éthylène	0,00	0,06	-0,06	
propane	0,00	0,04	-0,04	
propène	0,00	0,02	-0,02	
isobutane	0,00	0,01	-0,01	
butane	0,00	0,01	-0,01	
acétylène	0,00	0,01	-0,01	
trans-2-butène	0,00	0,01	-0,01	
1-butène	0,01	0,01	0,00	
CVM	0,00	0,01	-0,01	
cis-2-butène	0,00	0,01	-0,01	
isopentane	0,00	0,01	-0,01	
pentane	0,00	0,01	-0,01	
1,3-butadiène	0,00	0,01	-0,01	
1-1 dichloroéthylène	0,00	0,01	-0,01	
trans-2-pentène	0,00	0,01	-0,01	
1-pentène	0,00	0,01	-0,01	
cis-2-pentène	0,00	0,01	-0,01	
1-1 dichloroéthane	0,00	0,01	-0,01	
isopène	0,00	0,01	-0,01	
1-hexène	0,00	0,01	-0,01	
1-2 dichloroéthylène	0,00	0,01	-0,01	
hexane	0,00	0,01	-0,01	
Trichlorométhane	0,00	0,01	-0,01	
1-2 dichloroéthane	0,00	0,01	-0,01	
1-1-1 trichloroéthane	0,00	0,01	-0,01	
Benzène	0,00	0,01	-0,01	
tétrachlorométhane	0,00	0,01	-0,01	
Cyclohexane	0,00	0,01	-0,01	
trichloroéthylène	0,00	0,01	-0,01	
isooctane	0,00	0,01	-0,01	
heptane	0,00	0,01	-0,01	
1-1-2 trichloroéthane	0,00	0,01	-0,01	
toluène	0,00	0,01	-0,01	
octane	0,00	0,01	-0,01	
tétrachloroéthylène	0,00	0,01	-0,01	
chlorobenzène	0,00	0,01	-0,01	
éthylbenzène	0,00	0,01	-0,01	
méta-para-xylène	0,00	0,02	-0,02	
styrène	0,00	0,01	-0,01	
ortho-xylène	0,00	0,01	-0,01	
Cumène	0,00	0,01	-0,01	
Ethyltoluène	0,00	0,01	-0,01	
1,3,5 triméthyl benzène	0,00	0,01	-0,01	
1,2,4 triméthyl benzène	0,00	0,01	-0,01	
p-dichlorobenzène	0,00	0,01	-0,01	
Limonène	0,00	0,01	-0,01	
1,2,3 triméthyl benzène	0,00	0,01	-0,01	
				Signature
SIEGE SOCIAL 3 allée des Sorbiers - 69500 BRON SIRET 534 194 461 00025 - APE 7120B Tél : 09 72 26 48 90 - Fax : 09 72 15 65 64 Serveur vocal : 09 10 800 710 (coût d'un appel local depuis un poste fixe) Courriel : contact@atmo-aura.fr - Site internet : www.air-rhonealpes.fr				

Figure 7 : Exemple de rapport d'analyse des canisters après leur nettoyage

4.3. Protocole d'une campagne de mesure sur un chantier

4.3.1. Premier test de prélèvements par canister

Deux premiers prélèvements par canister ont pu être réalisés sur un chantier de mise en œuvre d'enrobés tièdes à Charancieu (38490), le 27 octobre 2022. La durée de prélèvement choisie était de 30 minutes. Les résultats d'analyse de ces deux canisters ont montré que ce temps de prélèvement était suffisant pour avoir des concentrations de COV supérieures aux limites de quantification des différents composés (Figure 9).



Figure 8 : Prélèvement effectué par un canister lors d'un chantier de mise en œuvre d'enrobés tièdes

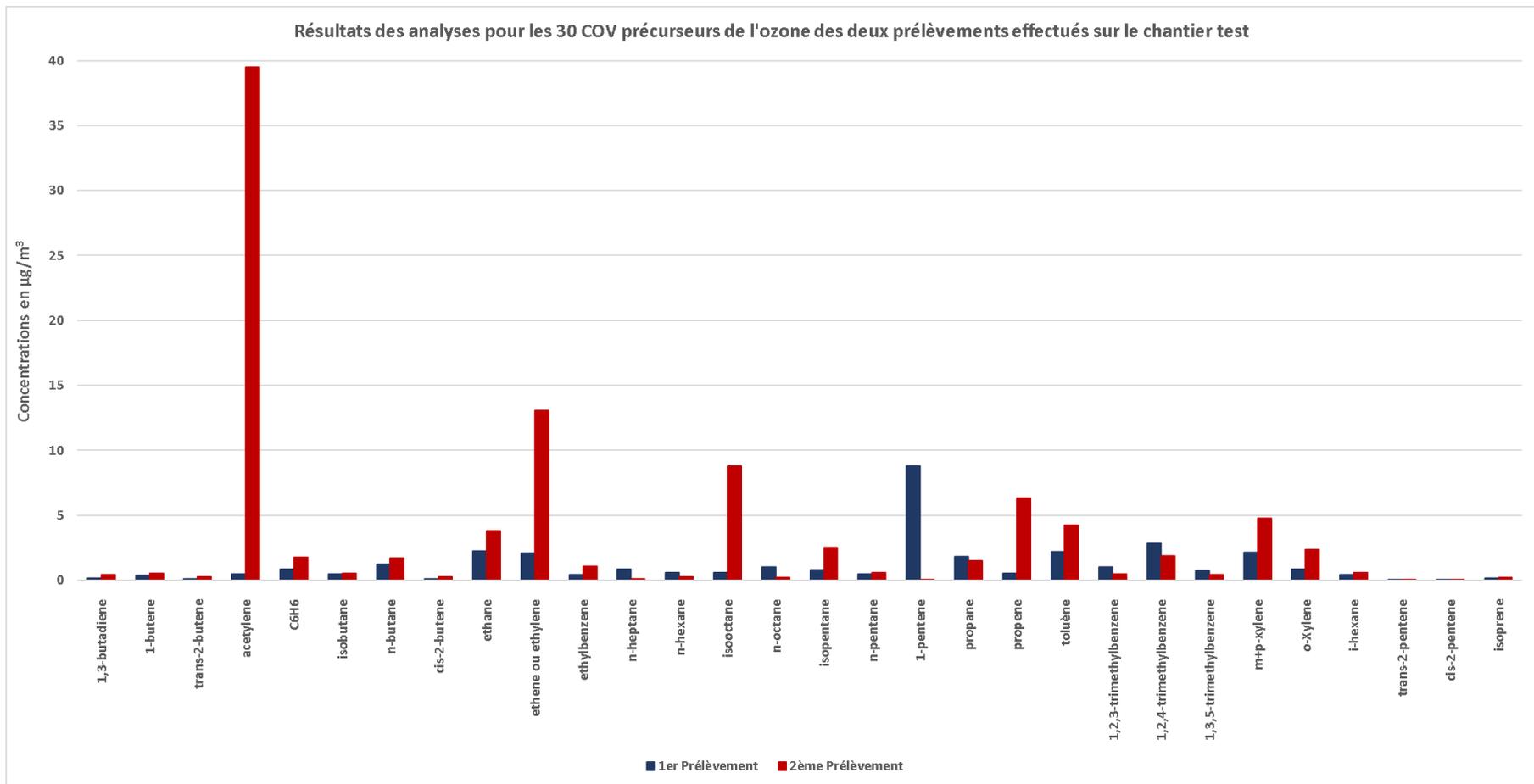


Figure 9 : Concentrations des différents COV analysés par le laboratoire d'Atmo AuRA pour les deux prélèvements réalisés sur le chantier test

4.3.2. Organisation d'une campagne de mesure sur un chantier

4.3.2.1. Prélèvement

Le protocole de mesure défini dans cette partie est prévu pour la réalisation des mesures sur un chantier et se veut reproductible sur tous les chantiers où des mesures seront effectuées.

Le protocole consiste à réaliser des mesures sur un ou deux jours, en prenant un jour ou une demi-journée pour faire des mesures sur des enrobés tièdes et un jour ou une demi-journée sur des enrobés à chaud, idéalement avec des conditions météorologiques proches (ensoleillées, peu ou pas de vent).

Pour chaque jour ou demi-journée de mesure, 11 prélèvements sont réalisés, dont 2 prélèvements pour caractériser les concentrations de fond présentes sur le site, et 9 prélèvements sur les enrobés. Ce qui représente un total de 22 prélèvements par chantier comprenant 4 mesures de fond et 18 mesures pour les émissions des enrobés.

Les 9 canisters utilisés pour les enrobés sont répartis en groupe afin de voir la répétabilité des mesures entre eux. Chaque groupe est composé de trois canisters qui sont placés les uns à côté des autres pour le même groupe. Le nombre de canisters total ou par groupe peut être adapté en fonction des campagnes de mesure et du retour d'expérience des campagnes précédentes (Par exemple : 2 groupes de 3 canisters + 1 groupe de 2 canister, ou 4 groupes de 2 canisters ou 3 groupes de 3 canisters) (Annexe 6 Figure 34).

Tableau 4 : Récapitulatif du déroulement des prélèvements sur un chantier

	Types d'enrobés	Nombre de mesures de fond	Nombre de mesures sur les enrobés
Jour ou Demi-journée 1	Enrobés tièdes	2 prélèvements de 30 minutes	9 prélèvements de 30 minutes
Jour ou Demi-journée 2	Enrobés à chaud	2 prélèvements de 30 minutes	9 prélèvements de 30 minutes

La pose des canisters pour les prélèvements des émissions d'enrobés doit se faire au plus proche de la mise en œuvre de l'enrobé, idéalement à une distance inférieure à 2 mètres, tout en veillant à respecter les protocoles d'intervention sur chantier notamment en matière de sécurité et à ne pas gêner les équipes du chantier.

Pour cela, un document doit être établi au préalable (convention avec la Maîtrise d'Ouvrage, les entreprises concernées ou Routes de France, courrier de la DREAL à la Maîtrise d'Ouvrage et aux entreprises concernées, ...) et un protocole d'intervention sur le chantier, fourni par la Maîtrise d'Ouvrage et par l'entreprise en charge des travaux, doit être mis en place pour la réalisation des mesures.

Une fois mis en place, les canisters ne sont plus bougés durant toute la durée du prélèvement. Des étiquettes de traçage pour chaque canister (Figure 10) sont remplis par la personne en charge des prélèvements. Ces informations sont utilisées par le laboratoire d'Atmo AuRA pour le suivi et la validation des prélèvements avant d'effectuer les analyses.

N° série <u>canister</u> :
Pression départ labo :
Pression à la mise en place :
ETUDE :
SITE : Nom opérateur :
Prélèvement du : / / à : H
	Au : / / à : H
Pression finale :
Pression arrivée labo :

Figure 10 : Exemple d'étiquette de traçage de canister

4.3.2.2. Caractérisation du chantier

Pour traiter au mieux les résultats d'analyse des prélèvements effectués sur les différents chantiers, il est important de connaître un grand nombre d'informations afin de caractériser chaque chantier. Ces informations sont :

- Le type de chantier, qu'il soit manuel ou mécanique, ouvert ou semi-fermé ;
- Le nombre d'engins et leur type : nombres de finisseurs, avec ou sans aspiration, de compacteurs et d'autres catégories d'engins de chantier ;
- Le type de bitume, modifié ou non ;
- La composition de la formule d'enrobés, avec le taux de recyclés, et les quantités et épaisseurs d'enrobés appliquées ;
- Le type d'enrobé tiède, que ce soit par une mousse de bitume, un additif ou autre ;
- Le type de couche d'accrochage, ainsi que la méthode d'application, le rupteur et la quantité au m² ;
- Le type de produit débitumant et leurs quantités ;
- Les températures d'application des enrobés ;
- Un plan de mesurage de température sur l'enrobé mis en œuvre ;
- L'indication sur les alentours du chantier, avec l'adresse exacte, les grands axes à proximité, la présence d'usine utilisant des solvants ;
- Toutes observations complémentaires qui peuvent avoir un impact sur les mesures ;

Une fiche récapitulative de toutes ces informations, remplie par Atmo AuRA lors de chaque journée de mesure, est rédigée (Annexe 3). Elle doit également indiquer le nombre de prélèvements par canister, les heures et la durée de chaque prélèvement, les informations nécessaires pour les analyses, ainsi que les données météorologiques.

Pour la mesure des températures des enrobés lors des campagnes de mesure, le Cerema propose un protocole de suivi de ces températures ainsi que la réalisation de ces relevés. La mesure des températures est réalisée avec un thermocouple enrobé sur toute la durée des prélèvements, notamment :

- o Prise de la température dans la vis du finisseur à l'ouverture des canisters ;
- o Prise de la température dans l'enrobé au plus proche du point de prélèvement du canister, relevé toutes les 5 minutes.

Enfin, pour caractériser les enrobés mis en place aux points de mesure des canisters, des prélèvements d'enrobé sont réalisés. Ces prélèvements font l'objet d'une analyse de la teneur en liant selon la norme NF EN 12697-1 méthode B.1.

5. Résultats des campagnes de mesure de l'étude « Enrobés tièdes »

5.1. Campagnes de mesure

5.1.1. Méthodes et mesures

Les différentes campagnes de mesure présentées dans cette partie ont suivi le protocole de mesure présenté précédemment (Partie 4), qui consiste à réaliser des mesures sur une ou deux journées, pour avoir idéalement des conditions météorologiques similaires pour les différents prélèvements, avec des prélèvements sur l'enrobé chaud et des prélèvements sur l'enrobé tiède, en utilisant des canisters pour réaliser ces prélèvements lors de leur mise en œuvre des enrobés.

Pour chaque type d'enrobé, 11 prélèvements sont réalisés, dont 2 prélèvements pour caractériser les concentrations de fond présentes sur le site, et 9 prélèvements sur les enrobés. Cela représente un total de 22 prélèvements par chantier comprenant 4 mesures de fond et 18 mesures pour les émissions des enrobés. Les 9 canisters utilisés pour les enrobés sont répartis en groupe afin de voir la répétabilité des mesures entre eux. Chaque groupe est composé de trois canisters qui sont placés les uns à côté des autres.

Les différents chantiers qui ont servi d'expérimentation pour cette étude sont présentés dans la Figure 11 ci-dessous et dans les parties suivantes.

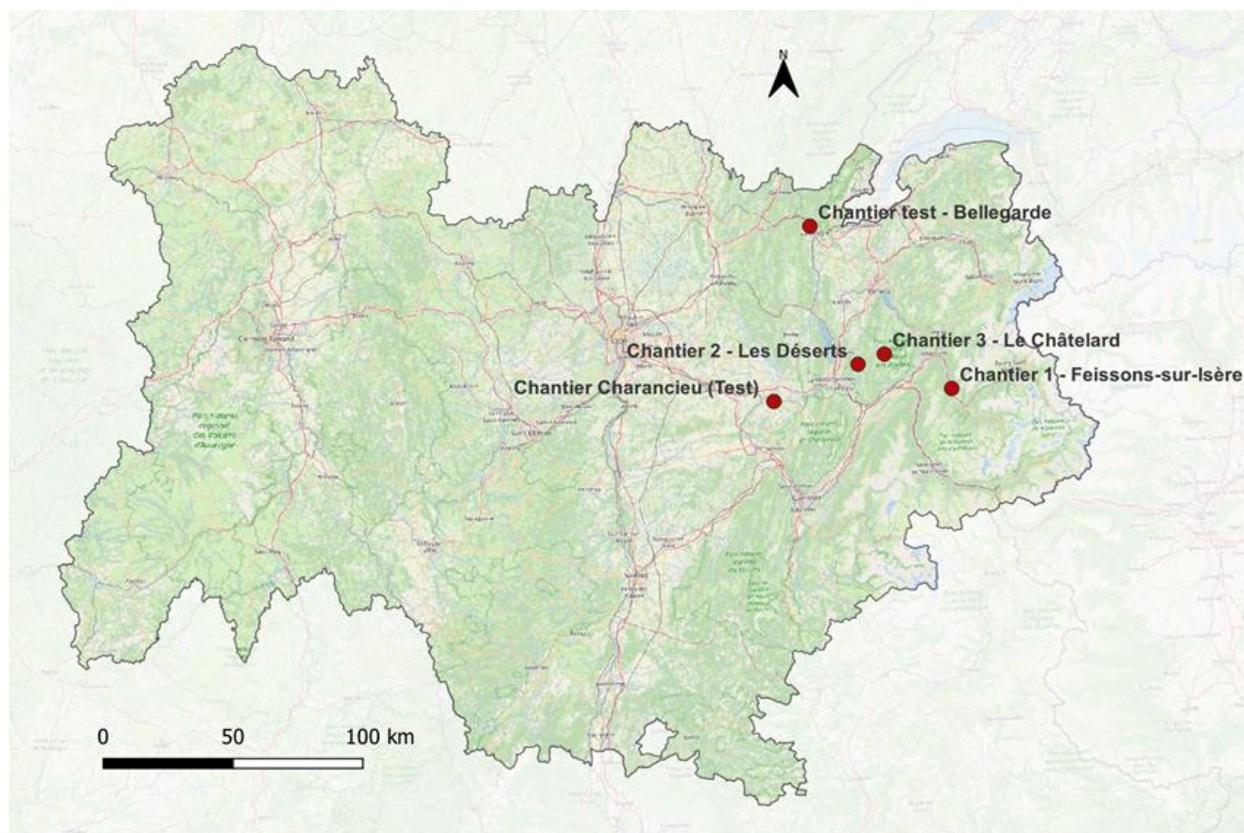


Figure 11 : Carte de la région Auvergne-Rhône-Alpes avec les différents sites des campagnes de mesure

5.1.1.1. Caractéristiques du site de mesure test sur un chantier – Bellegarde-sur-Valserine

La Figure 12 montre les sites de prélèvement, le long d'une autoroute à proximité de la commune de Bellegarde-sur-Valserine, des différents groupes de canisters pour les deux types d'enrobés (chaud et tiède). Les mesures ont été effectuées le 25 juillet 2023 entre 9h08 et 13h48. Les horaires précis des différents prélèvements sont donnés dans le Tableau 20 de l'Annexe 7. La mise en œuvre a été réalisée sur la double voie fermée à la circulation qui a été déviée en double sens sur l'autre voie.

Les caractéristiques de l'enrobé mis en œuvre sont les suivantes :

- OPTIBASE – 6473S 0/14 R60
- Epaisseur : 12 cm avant compactage
- Grade bitume : 70/100
- Procédé d'abaissement de la température : moussage du bitume

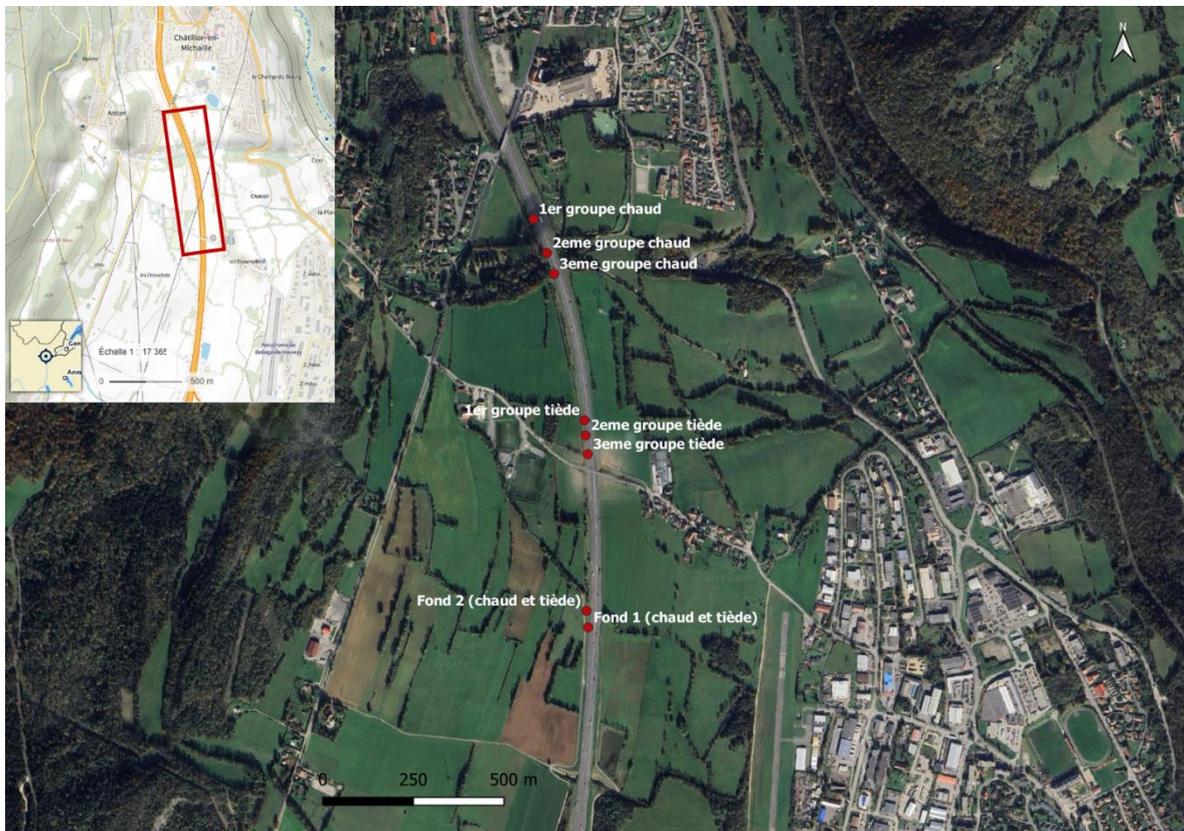


Figure 12 : Plan de prélèvement des 20 canisters sur le chantier test sur la commune de Bellegarde

5.1.1.2. Caractéristiques du site de mesure sur le chantier expérimental 1 – Feissons-sur-Isère

La Figure 13 montre les sites de prélèvement, le long d'une route nationale sur la commune de Feissons-sur-Isère, des différents groupes de canisters pour les deux types d'enrobés (chaud et tiède). Les mesures ont été effectuées le 7 juin 2024 entre 8h27 et 12h21. Les horaires précis des différents prélèvements sont donnés dans le Tableau 20 de l'Annexe 7. La mise en œuvre a été réalisée sur la voie lente en direction d'Albertville, la circulation a été déviée en double sens sur l'autre voie.

Les caractéristiques de l'enrobé mis en œuvre sont les suivantes :

- GB 3 0/14 – 40% d'AE
- Epaisseur : 8 cm
- Grade bitume : 50/70
- Teneur en liant : 4.20%
- Procédé d'abaissement de la température : moussage du bitume

La distance entre la centrale d'enrobé et le chantier était d'environ 20 kilomètres, avec un intervalle de temps moyen entre le chargement des camions à la centrale et la mise en œuvre de l'enrobé d'environ 33 minutes.



Figure 13 : Plan de prélèvement des 22 canisters sur le chantier expérimental 1 sur la commune de Feissons-sur-Isère

5.1.1.3. Caractéristiques du site de mesure sur le chantier expérimental 2

– Les Déserts

La Figure 14 montre les sites de prélèvement, le long d'une route départementale sur la commune Les Déserts, des différents groupes de canisters pour les deux types d'enrobés (chaud et tiède). Les mesures ont été effectuées le 4 juillet 2024 entre 9h55 et 13h39. Les horaires précis des différents prélèvements sont donnés dans le Tableau 20 de l'Annexe 1. La mise en œuvre des enrobés a été réalisé sur les deux voies en parallèle. Le chantier était totalement coupé à la circulation.

Les caractéristiques de l'enrobé mis en œuvre sont les suivantes :

- BBSG 2 0/10 – 20% d'AE
- Epaisseur : 6 cm
- Grade bitume : 100/150
- Teneur en liant : 5.21%
- Procédé d'abaissement de la température : moussage du bitume

La distance entre la centrale d'enrobé et le chantier était d'environ 28 kilomètres, avec un intervalle de temps moyen entre le chargement des camions à la centrale et la mise en œuvre de l'enrobé d'environ 45 minutes.



Figure 14 : Plan de prélèvement des 22 canisters sur le chantier expérimental 2 sur la commune Les Déserts

5.1.1.4. Caractéristiques du site de mesure sur le chantier expérimental 3 – Le Châtelard

La Figure 15 montre les sites de prélèvement, le long d'une route départementale sur la commune Le Châtelard, des différents groupes de canisters pour les deux types d'enrobés (chaud et tiède). Les mesures ont été effectuées le 15 juillet 2024 entre 9h35 et 14h51. Les horaires précis des différents prélèvements sont donnés dans le Tableau 20 de l'Annexe 1. Le chantier était totalement coupé à la circulation.

Les caractéristiques de l'enrobé mis en œuvre sont les suivantes :

- BBSG 2 0/10 – 20% d'AE
- Epaisseur : 6 cm
- Grade bitume : 100/150
- Teneur en liant : 5.21%
- Procédé d'abaissement de la température : moussage du bitume

La distance entre la centrale d'enrobé et le chantier était d'environ 46 kilomètres, avec un intervalle de temps moyen entre le chargement des camions à la centrale et la mise en œuvre de l'enrobé d'environ 60 minutes.



Figure 15 : Plan de prélèvement des 22 canisters sur le chantier expérimental 3 sur la commune Le Châtelard

5.1.2. Analyses et résultats

Les analyses sont réalisées par le laboratoire d'Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, suivant une méthode d'analyse de COV sur canister mise au point par le LCSQA dans les années 2000, et elles se concentrent sur 30 COV précurseurs de l'ozone définis par la Directive 2008/50/CE, 2008¹⁸ (Tableau 5).

Tableau 5 : Liste des COV précurseurs d'ozone pour lesquels les mesures sont conseillées par la Directive 2008/50/CE, 2008

Éthane	trans-2-Butène	n-Hexane	m+p-Xylène
Éthène	cis-2-Butène	i-Hexane	o-Xylène
Acétylène	1,3-Butadiène	n-Heptane	1,2,4-Triméthylbenzène
Propane	n-Pentane	n-Octane	1,2,3-Triméthylbenzène
Propène	i-Pentane (isopentane)	i-Octane (isooctane)	1,3,5-Triméthylbenzène
n-Butane	1-Pentène	Benzène	Total des hydrocarbures autres que le méthane
i-Butane (isobutane)	2-Pentène	Toluène	
1-Butène	Isoprène	Éthylbenzène	

¹⁸ Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 concernant la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe (s. d.).

Pour chaque campagne, les résultats d'analyse des canisters égaux ou inférieurs à la limite de quantification donnée pour chaque COV (Tableau 3) ne sont pas pris en compte. Puis dans un second temps, les résultats des mesures de fond (Annexe 10) sont soustraits aux données des canisters des différents groupes correspondants. Les données qui sont alors égales ou inférieures à 0 ne sont également pas prises en compte. Les données restantes sont utilisées pour l'analyse des résultats des différentes campagnes, effectuées ci-dessous.

Pour certaines analyses, les composés ont été regroupés en trois familles :

- **Les alcanes** qui regroupent Éthane, i-Hexane, Isobutane, Isooctane, Isopentane, n-Butane, n-Heptane, n-Hexane, n-Octane, n-Pentane, Propane ;
- **Les autres composés aliphatiques** qui regroupent 1,3-Butadiène, 1-Butène, 1-Pentène, 2-Pentène phase gazeuse, Acétylène, cis-2-Butène, Éthène, Propène ;
- **Les hydrocarbures aromatiques** qui regroupent 1,2,3-Triméthylbenzène, 1,2,4-Triméthylbenzène, 1,3,5-Triméthylbenzène, Benzène, Éthylbenzène, Isoprène, m+p-Xylène, o-Xylène, Toluène, trans-2-Butène.

5.1.2.1. Résultats de la campagne de mesure sur le chantier test – Bellegarde-sur-Valserine

Prélèvements sur l'enrobé chaud

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé chaud, après traitement, sont données dans le Tableau 6 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Tableau 6 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé chaud lors de la campagne sur le chantier test

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	9h08			9h22			9h42	
	1717	1719	2310	1408	1417	1424	1957	2113
Éthane	0,025		0,062	1,035	2,619	2,145	0,736	0,299
n-Butane	0,109	0,109	0,133	0,784	1,748	1,459	0,615	0,229
n-Heptane	0,006	0,006	0,089	1,71	3,956	2,916	1,502	0,505
n-Hexane	0,018	0,018	0,089	1,269	2,985	2,306	1,054	0,268
n-Octane			0,071	2,204	4,716	3,958	1,635	0,545
n-Pentane	0,015	0,015	0,045	0,823	1,93	1,541	0,643	0,194
Propane	0,1275	0,0365	0,0735	0,9505	2,4325	2,0845	0,8045	0,2745
i-Hexane		0,143			0,035	0,143	0,178	
Isobutane	0,048	0,048	0,048	0,506	1,036	0,843	0,385	0,12
Isooctane			0,047	0,332	0,758	0,616	0,332	0,095
Isopentane	0,045	0,075	0,075	0,883	1,751	1,481	0,673	0,224
1,3-Butadiène				0,034	0,146	0,101		
1-Butène	0,024	0,024	0,14	0,349	0,885	0,722	0,28	0,117
1-Pentène			0,038	0,155	0,387	0,358	0,096	0,038
2-Pentène phase gazeuse			0,009	0,009	0,038	0,096	0,009	
Acétylène			0,016	0,168	0,514	0,416	0,049	0,016
cis-2-Butène		0,0115	0,0115	0,0815	0,1975	0,1745	0,0345	0,0115
Éthène	0,0645	0,0405	0,3435	1,3325	3,2185	2,5085	0,4835	0,4015
Isoprène	0,0845	0,0285	0,3395	0,0565	0,0565	0,0845		
Propène	0,1045	0,0175	0,3835	1,2395	2,5665	2,0775	0,6455	0,2265
trans-2-Butène		0,023	0,023	0,14	0,279	0,233	0,116	0,023
1,2,3-Triméthylbenzène					0,0495	0,1995	0,5485	0,0495
1,2,4-Triméthylbenzène				2,943	5,936	4,639	0,997	0,199
1,3,5-Triméthylbenzène					0,1495	0,1995		
Benzène			0,0325	1,0705	2,2055	1,9135	0,9405	0,2915
Éthylbenzène				0,132	0,176	0,573		
m+p-Xylène			0,088	2,909	5,553	4,451	1,455	0,617
o-Xylène		0,066	0,066	0,948		1,344	0,154	0,419
Toluène	0,115	0,191	0,153	1,224	2,295	2,027	0,918	0,306

Prélèvements sur l'enrobé tiède

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé tiède, après traitement, sont donnés dans le Tableau 7 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Tableau 7 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé tiède lors de la campagne sur le chantier test

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12h38			13h01			13h18	
	1419	1423	1727	1421	1713	1959	1404	1721
Éthane	0,6355	0,9095	0,1365	0,5735	0,4115	0,0245	0,3115	0,1995
n-Butane	0,374	0,591	0,109	0,495	0,495	0,133	0,736	0,47
n-Heptane	1,2885	2,5365	0,6235	1,9125	1,9535	0,5815	0,9565	0,7065
n-Hexane	0,8045	1,5195	0,4115	1,2695	1,3045	0,4465	1,2335	0,8755
n-Octane	0,7825	1,6825	3,3415	2,6785	2,6305	0,8295	1,8245	1,3035
n-Pentane	0,389	0,718	0,179	0,628	0,628	0,209	0,299	0,179
Propane	0,53	0,658	0,238	0,604	0,658	0,128	0,53	0,421
i-Hexane			0,107	0,107		0,178	0,035	0,035
Isobutane	0,1685	0,1925	0,1205	0,1685	0,1685	0,0245	3,3995	0,2165
Isooctane	0,38	0,664	0,048	0,617	0,522	0,19	0,285	0,237
Isopentane	0,299	0,538	0,149	0,538	0,479	0,179	0,209	0,119
1,3-Butadiène								
1-Butène	0,21	0,256	0,07	0,256	0,256	0,07	0,163	0,07
1-Pentène	0,0435	0,1315	0,0145	0,1025	0,1025	0,0435	0,0725	0,0435
2-Pentène phase gazeuse								
Acétylène				0,027	0,027	0,038	0,016	
cis-2-Butène	0,046	0,046	0,023	0,069	0,046	0,046	0,046	0,023
Éthène	0,495	0,565	0,391	0,763	0,949	0,426	0,367	0,449
Isoprène								
Propène	0,4625	0,6375	0,2355	0,6895	0,7245	0,2005	0,4445	0,2355
trans-2-Butène	0,046	0,116	0,023	0,139	0,139	0,163	0,093	0,07
1,2,3-Triméthylbenzène	0,199	0,299	0,1	0,149	0,05	0,698	0,349	0,05
1,2,4-Triméthylbenzène	0,724	1,721	0,374	1,572	1,672	0,325	1,622	1,023
1,3,5-Triméthylbenzène	0,125	0,324	0,025	0,274	0,224	0,025	0,274	0,075
Benzène	0,129	0,259	0,032	3,761	1,491	0,064	1,848	1,135
Éthylbenzène	0,227	0,492	0,139	0,36	0,404	0,139	0,36	0,183
m+p-Xylène	0,8815	2,1155	0,1325	1,8955	1,6755	0,3085	2,4245	1,2345
o-Xylène	0,331	0,816	0,11	0,816	0,771	0,199	0,595	0,331
Toluène	0,765	1,339	0,344	90,959	32,666	0,65	46,13	26,622

Conditions météorologiques et températures des enrobés

Les conditions météorologiques sur la journée de mesure ont été plutôt stables avec une température moyenne le matin de 16°C, et une moyenne de 19°C en début d'après-midi. En début de matinée, le vent était très faible avec des vitesses comprises entre 2 et 3 km/h. À partir de 10h, le vent s'est légèrement levé pour atteindre des vitesses entre 5 et 8 km/h.

Les relevés de températures des enrobés, avec un appareil « Ecoliant », ont été réalisées par l'entreprise en charge des travaux (Figure 35 Annexe 8) dans la vis de répartition du finisseur et à hauteur des différents groupes de canisters. Sur les 30 minutes de prélèvement, les températures moyennes pour l'enrobé chaud étaient comprises entre 140 et 145°C à leur mise en œuvre, puis entre 105 et 110°C à la fin du prélèvement des canisters. Pour l'enrobé tiède, les températures au début des prélèvements des canisters étaient comprises entre 120 et 125°C pour atteindre entre 95 et 105°C à la fin du prélèvement. La décroissance plus rapide de température de l'enrobé chaud est intuitive : elle est expliquée par l'écart initial de température plus important avec la température ambiante, en comparaison avec l'enrobé tiède.

Analyses des données

La Figure 16 montre les distributions des concentrations des COV, classés suivant les différentes familles définies précédemment, mesurées pour tous les canisters mis en place sur le chantier test pour les enrobés chaud et tiède.

Pour les hydrocarbures aromatiques prélevés sur l'enrobé tiède, et plus précisément pour le toluène, des valeurs atypiques très élevées par rapport aux autres composés ont été mesurées. Ces valeurs sont observables sur la « boîte à moustaches » (ou « box-plot » cf. définition en annexe 9) de la Figure 17 avec 4 mesures comprises entre 25 et 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La cause de ces pics de concentration pour le toluène n'a pas pu être définie avec les informations relevées sur le chantier.

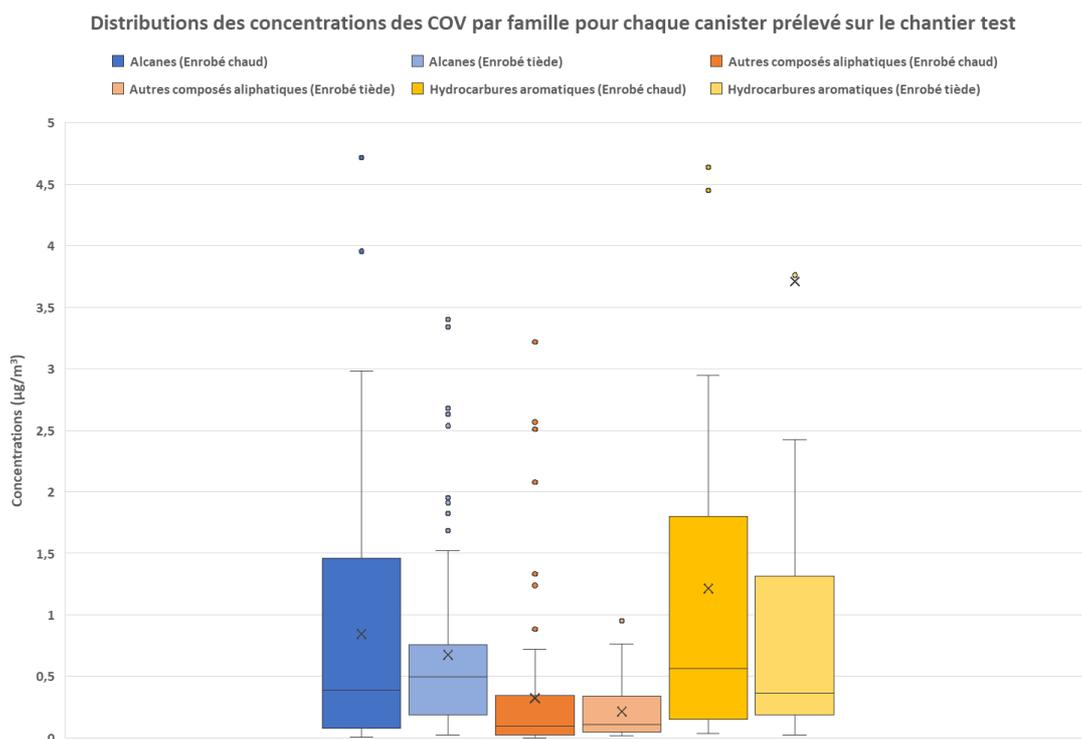


Figure 16 : Distributions des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier test

Moyennes de tous les canisters et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède

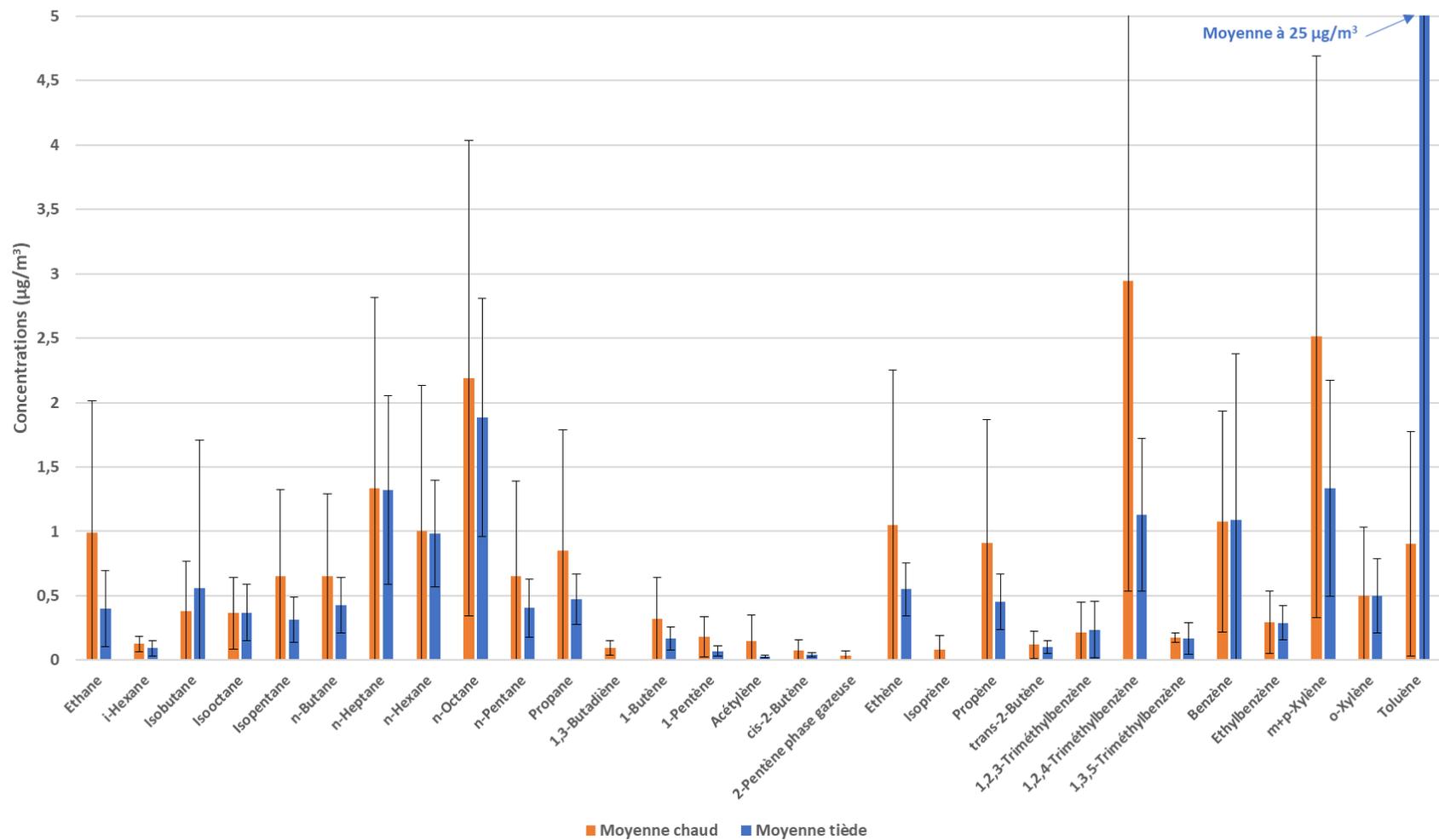


Figure 18 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier test et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède

5.1.2.2. Résultats de la campagne de mesure sur le chantier expérimental 1 – Feissons-sur-Isère

Prélèvements sur l'enrobé chaud

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé chaud, après traitement, sont donnés dans le Tableau 8 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Tableau 8 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé chaud lors de la campagne sur le chantier expérimental 1

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	08h39			08h52			09h12		
	1427	1717	1965	1721	1725	1419	1428	2312	1956
Éthane		0,42	0,33		1,86		0,58	0,50	0,30
n-Butane	0,36	0,36	1,20	56,10	64,80	90,07	2,58	0,43	0,43
n-Heptane	0,10	0,19	0,19	0,02	0,31	0,02	0,27	0,31	0,27
n-Hexane	0,13	0,20	0,17	5,81	7,35	5,92	0,88	0,27	0,24
n-Octane	0,29	0,33	0,33	0,67	1,09	0,86	0,57	0,57	0,52
n-Pentane			0,06	1,08	1,41	1,29	0,09	0,09	0,03
Propane	0,36	0,32	1,29	15,69	17,96	25,03	0,89	0,71	0,65
i-Hexane	0,25	0,11		0,14	0,47	0,25	0,22	0,14	0,07
Isobutane	0,17	0,19	0,77	26,28	30,50	43,27	1,08	0,09	0,12
Isooctane	0,05	0,10	0,10	3,51	3,51	3,94	0,19	0,19	0,10
Isopentane	0,12	0,15	0,33	7,39	7,72	8,86	0,21	0,12	0,06
1,3-Butadiène		0,04	0,02	0,11	0,13	0,09	0,04	0,02	0,04
1-Butène	0,09	0,09	0,16	0,14	0,21	0,44	0,21	0,28	0,18
1-Pentène	0,06	0,03	0,01		0,01		0,09	0,15	0,01
2-Pentène phase gazeuse	0,01	0,07	0,06	0,01			0,01	0,01	
Acétylène	0,00								
cis-2-Butène	0,04	0,07	0,02	0,14	0,21	0,25	0,09	0,07	0,07
Éthène	0,30	0,25	0,38				0,52	1,25	0,31
Isoprène	0,03				0,03		0,23	0,20	0,17
Propène	0,25	0,25	0,34	0,07	0,25	0,06	0,58	1,05	0,62
trans-2-Butène	0,08	0,15	0,06	0,24	0,29	0,38	0,22	0,13	0,10
1,2,3-Triméthylbenzène	0,25	0,75	0,65	0,25	0,20	0,35	0,90	0,25	0,00
1,2,4-Triméthylbenzène	0,50	0,70	0,65	0,90	0,90	1,00	2,49		
1,3,5-Triméthylbenzène	0,13	0,17	0,17	0,32	0,17	0,27	0,67	1,47	1,32
Benzène	0,03	0,06	0,09		0,16		0,13	0,39	
Éthylbenzène	0,06	0,06	0,15	0,42	0,46	0,46	0,19	0,11	0,06
m+p-Xylène	0,30	0,39	0,57	2,64	3,17	3,61	1,23	1,05	1,23
o-Xylène	0,20	0,24	0,28	0,90	0,81	0,72	0,33	0,46	0,33
Toluène			0,44	0,14	0,25	0,33			

Prélèvements sur l'enrobé tiède

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé tiède, après traitement, sont donnés dans le Tableau 9 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Pour le canister N°1404, les données n'ont pas pu être récupérées à la suite d'un problème technique.

Tableau 9 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé tiède lors de la campagne sur le chantier expérimental 1

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	11h12			11h30			11h51		
	1424	1963	1727	1423	1404	2110	2313	1959	1713
Éthane	0,45	1,64	0,51	0,88		0,42	0,35	0,26	0,25
i-Hexane									
Isobutane	1,15	0,14	0,12	0,12		0,07	0,17	0,17	0,24
Isooctane	0,24	0,19	0,29	0,19		0,19	0,34	0,24	0,29
Isopentane	0,21	0,21	0,30	0,33		0,33	0,33	0,27	0,33
Propane	0,76	0,73	0,62	0,43		0,76	0,64	0,54	0,69
n-Butane	0,45	0,50	0,53	0,62		0,43	0,53	0,53	0,55
n-Heptane	0,85	0,85	0,60	0,56		0,52	0,52	0,56	0,52
n-Hexane	0,45		0,42	0,34		0,31	0,27	0,31	0,34
n-Octane	1,42	1,28	1,28	1,19		1,14	1,05	1,14	1,05
n-Pentane	0,12	0,12	0,12	0,18		0,18	0,12	0,06	0,09
1,3-Butadiène	0,04	0,07	0,09	0,02		0,07	0,07	0,04	0,07
1-Butène	0,32	0,32	0,35	0,32		0,37	0,30	0,23	0,25
1-Pentène	0,15	0,12	0,12	0,12		0,18	0,09	0,06	0,09
2-Pentène phase gazeuse	0,04	0,04	0,04	0,01		0,07	0,01	0,03	0,27
Acétylène	0,09	0,08	0,10				0,00	0,04	0,03
cis-2-Butène	0,07	0,11	0,07	0,16		0,11	0,07	0,02	0,07
Éthène	1,05	1,22	1,86	0,80		0,32	0,93	0,60	0,47
Isoprène	0,34	0,26	0,23	0,34		0,28	0,31	0,34	0,34
Propène	1,12	1,09	1,23	0,69		0,69	0,82	0,65	0,70
trans-2-Butène	0,06	0,10	0,08	0,13		0,08	0,10	0,08	0,08
1,2,3-Triméthylbenzène	1,05	1,30	1,65	1,65		0,10	1,00	1,15	0,85
1,2,4-Triméthylbenzène	2,64	2,64	2,74	2,89		0,05	1,75	1,90	1,85
1,3,5-Triméthylbenzène	0,62	0,47	0,52	0,67		1,72	0,27	0,37	0,03
Benzène	0,19	0,16	0,16	0,03		0,06	0,06	0,06	0,06
Éthylbenzène	0,33	0,37	0,33	0,33		0,42	0,15	0,33	0,37
m+p-Xylène	1,98	1,98	1,94	2,11		1,94	1,76	1,63	1,71
o-Xylène	1,43	0,77	0,72	0,81		1,08	0,72	0,20	0,20
Toluène	0,63	0,56	0,75	0,59		0,48	1,59	0,86	0,98

Conditions météorologiques, températures des enrobés et teneur en liant

Les conditions météorologiques sur la journée de mesure ont été plutôt stables avec une température moyenne le matin de 19°C, et une moyenne de 23°C en début d'après-midi. En début de matinée, le vent était très faible avec des vitesses comprises entre 2 et 3 km/h. À partir de 11h, le vent s'est légèrement levé pour atteindre des vitesses entre 5 et 8 km/h.

Les températures des enrobés ont été mesurées selon un protocole mis en place par le Cerema et qui est défini dans le protocole de mesure (Partie 4).

Sur 30 minutes, les températures moyennes des enrobés montrent une décroissance linéaire avec une perte d'environ 1,6°C/minute pour le chaud et 1,2°C/minute pour le tiède (Figure 19). La décroissance plus rapide de température de l'enrobé chaud est intuitive : elle est expliquée par l'écart initial de température plus important avec la température ambiante, en comparaison avec l'enrobé tiède.

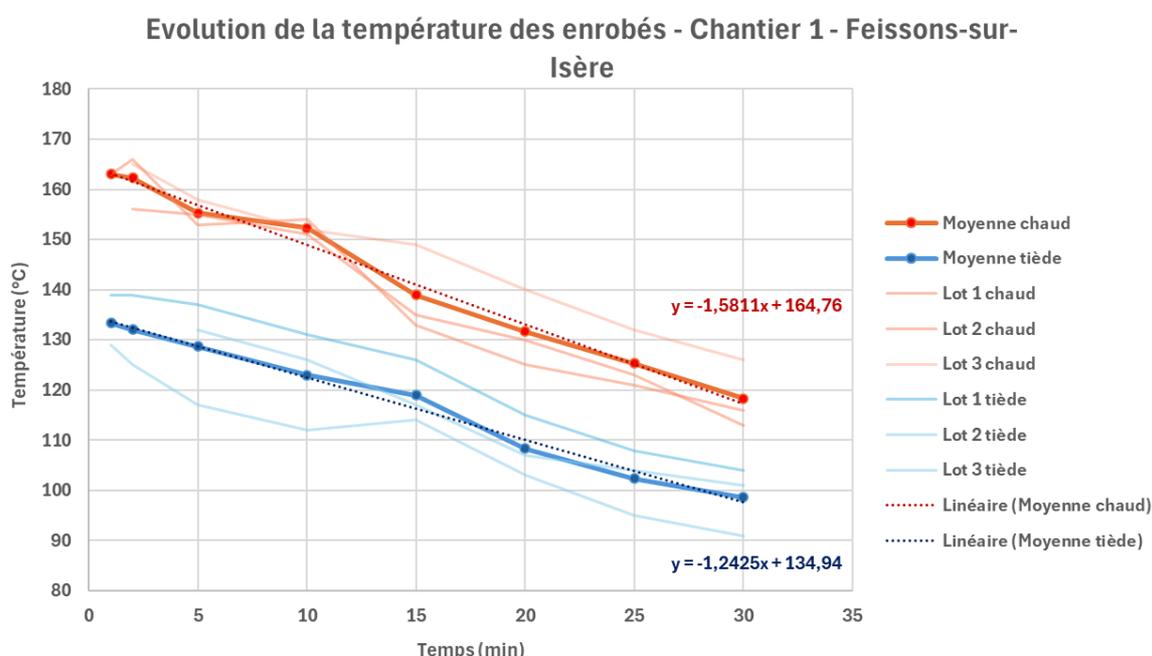


Figure 19 : Évolution des températures des enrobés sur la campagne de mesure du chantier 1 (Source : Cerema)

Des prélèvements d'enrobés ont été réalisés aux emplacements des canisters. La détermination de la teneur en liant a été réalisée selon la norme NF EN 12679-1 – Méthode B.1. Les teneurs en liant des enrobés prélevés sont donnés dans le Tableau 10. Le pourcentage est exprimé par rapport à la masse totale d'enrobés (dite interne).

Les valeurs de teneur en liant sont homogènes entre les prélèvements, avec une amplitude de 0.28% entre la valeur minimale et la valeur maximale. Toutes les valeurs sont supérieures à la teneur totale en liant du rapport d'épreuve de formulation, fixé à 4.2%.

Tableau 10 : Teneurs en liant au droit des points de prélèvement du chantier 1

Taux de bitume (%) Heure de prélèvement	Lot 1 8h25 / 11h12	Lot 2 8h40 / 11h30	Lot 3 8h55 / 11h51
Chaud	4.58	4.77	4.49
Tiède	4.64	4.70	4.53

Analyses des données

La Figure 20 montre les distributions des concentrations des 30 COV, classés suivant les différentes familles définies précédemment, mesurées pour tous les canisters mis en place sur le chantier expérimental 1 pour les enrobés chaud et tiède.

Pour les alcanes prélevés sur l'enrobé chaud, la « boîte à moustaches » (ou « box-plot » cf. définition en annexe 9) montre des valeurs atypiques très élevées en comparaison des autres composés. Ces concentrations atypiques sont mesurées sur le 2^{ème} groupe de canister sur l'enrobé chaud (Tableau 8), avec une probable source extérieure qui a entraîné des concentrations plus élevées comprises allant jusqu'à 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ notamment pour le n-Butane.

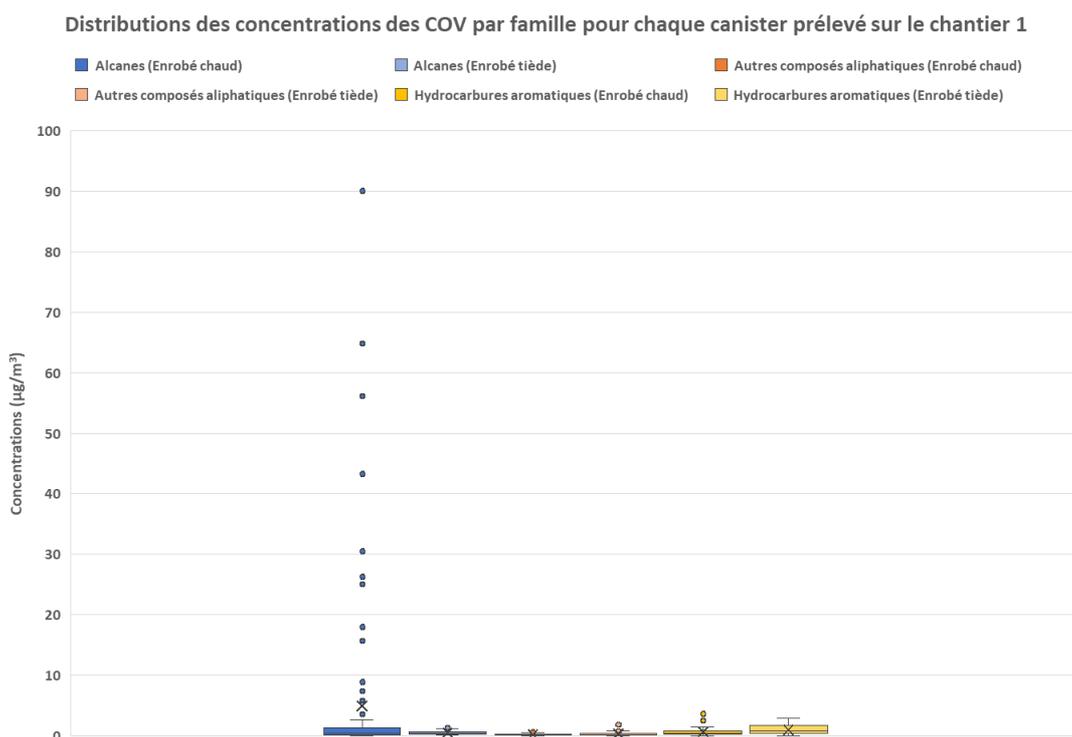


Figure 20 : Distributions des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 1

Le choix a été fait dans la Figure 21 de ne pas prendre en compte les résultats de ce second groupe. Les box-plots pour la famille des alcanes sont plus cohérentes entre les mesures sur le chaud et le tiède et montrent une médiane au milieu de la boîte avec cependant des moustaches supérieures plus étirées qui induisent des distributions asymétriques positives. Les mesures sur l'enrobé tiède montrent une médiane ($0,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et une moyenne ($0,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$) légèrement plus élevées que celles sur le chaud, respectivement $0,26$ et $0,37 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Distributions des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 1 (sans le 2ème groupe sur l'enrobé chaud)

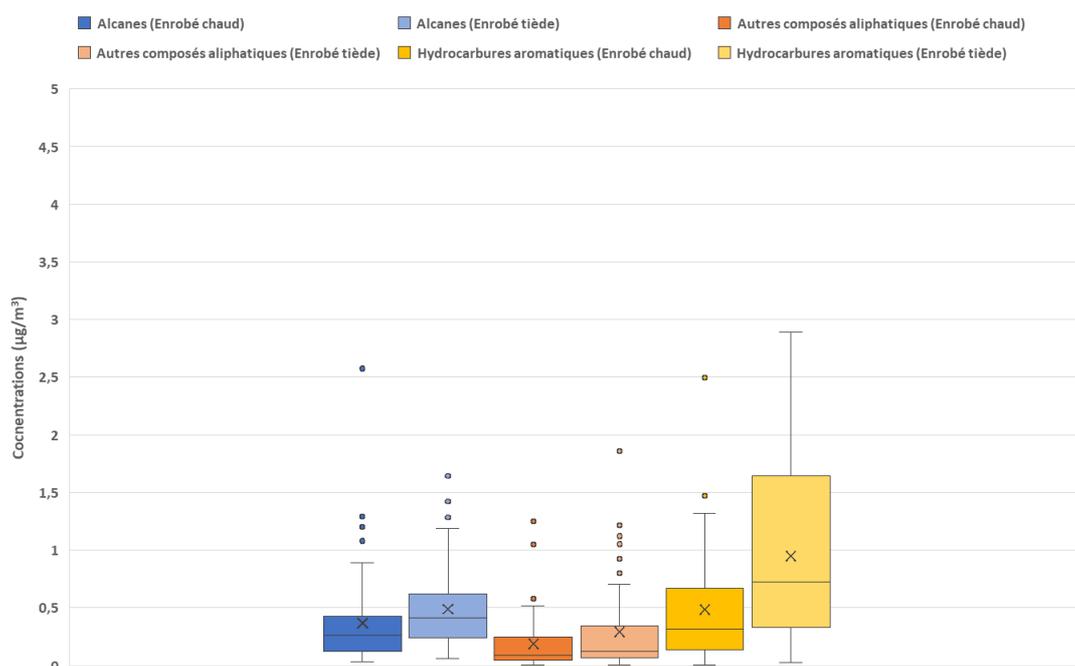


Figure 21 : Distributions des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 1 sans les données issues du 2ème groupe prélevé sur l'enrobé chaud

Pour les box-plots des autres familles (hydrocarbures aromatiques et autres composés aliphatiques), ils montrent également des distributions asymétriques positives avec leur médiane dans la partie inférieure de la boîte et des moustaches supérieures plus étirées.

Pour les autres composés aliphatiques, la médiane et la moyenne des concentrations mesurées sur l'enrobé chaud, respectivement $0,09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $0,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sont légèrement inférieures à celles observées pour les prélèvements de l'enrobé tiède, respectivement $0,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $0,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Cette différence est plus marquée pour les hydrocarbures aromatiques avec des médianes et des moyennes 2 fois plus importantes sur les prélèvements de l'enrobé tiède, respectivement $0,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $0,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, par rapport aux prélèvements réalisés sur l'enrobé chaud, respectivement $0,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $0,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Figure 22 permet de confirmer ces différences entre les moyennes de chaque composé, avec des moyennes globalement plus élevées pour les prélèvements sur l'enrobé tiède par rapport à ceux sur l'enrobé chaud.

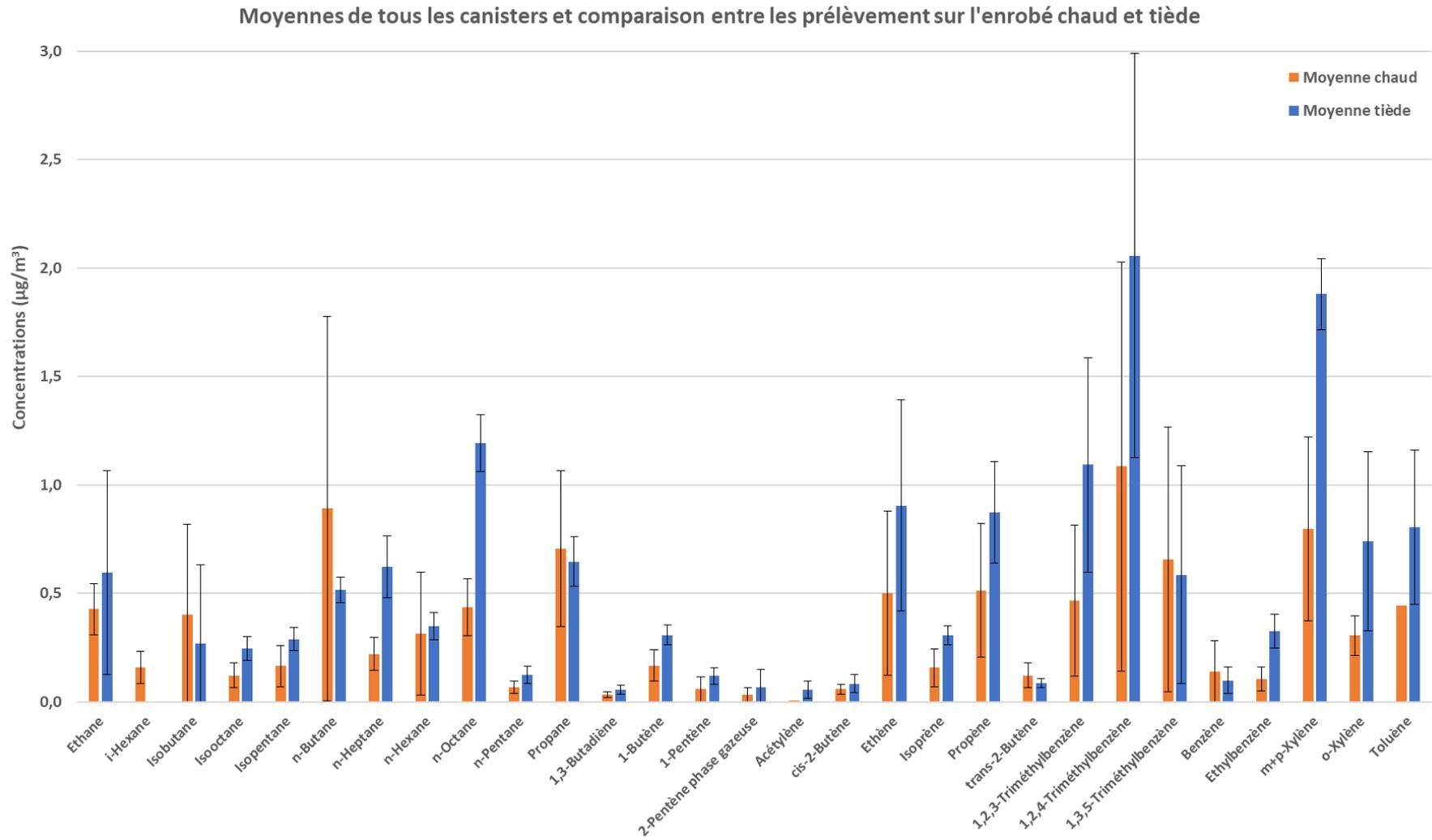


Figure 22 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier expérimental 1 et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède

5.1.2.3. Résultats de la campagne de mesure sur le chantier expérimental 2 – Les Déserts

Prélèvements sur l'enrobé chaud

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé chaud, après traitement, sont donnés dans le Tableau 6 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Tableau 11 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé chaud lors de la campagne sur le chantier expérimental 2

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	12h22			12h41			13h09		
	S3049	S3147	S3336	S3048	S3050	S3002	S3849	S3850	S3848
Éthane	0,21	0,52	0,37	0,41	0,74	0,59	0,13	0,17	0,64
i-Hexane	0,02	0,16			0,05			0,02	0,09
Isobutane		0,10	0,10	2,15	1,76	1,86	0,02	0,05	0,29
Isooctane									0,14
Isopentane		0,07	0,04	0,04	0,07	0,13			0,16
n-Butane	0,27	0,31	0,14	4,27	3,59	3,93	0,10	0,10	0,29
n-Heptane	0,46	0,50	0,42	0,50	0,54	0,54	0,50	0,50	0,46
n-Hexane	0,34	0,34	0,30	0,81	0,88	0,84	0,27	0,30	0,34
n-Octane	0,66	0,71	0,71	1,04	1,00	1,19	0,95	0,95	0,90
n-Pentane	0,25	0,34	0,25	0,28	0,43	0,31	0,22	0,19	0,28
Propane	0,39	0,27	0,30	3,65	3,30	3,10	0,27	0,28	0,19
1,3-Butadiène		0,01		0,01			0,01	0,01	
1-Butène	0,07	0,05	0,07	0,09	0,07	0,07	0,07	0,05	0,14
1-Pentène	0,06		0,06	0,06	0,06	0,09	0,06	0,06	0,12
2-Pentène phase gazeuse	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08	0,05	0,05	0,05
Acétylène	0,15	0,18	0,15	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,03
cis-2-Butène			0,01						
Éthène	0,44	0,55	0,48				0,12	0,09	
Isoprène									0,06
Propène	0,24	0,25	0,24	0,22	0,18	0,25	0,10	0,11	0,29
trans-2-Butène	0,02					6,89			0,05
1,2,3-Triméthylbenzène	0,03		0,03	0,22	0,18	0,37	0,32	0,22	0,27
1,2,4-Triméthylbenzène				0,30	0,05	0,55	0,60	0,40	0,75
1,3,5-Triméthylbenzène						0,13	0,08		0,08
Benzène	0,20	0,26	0,20	0,07	0,03		0,07	0,13	
Éthylbenzène				0,04		0,04	0,04	0,04	0,04
m + p-Xylène				1,01	0,53	1,23	0,79	0,57	0,66
o-Xylène				0,11	0,11	0,20	0,42	0,11	0,11
Toluène		0,06				0,02	0,02		0,02

Prélèvements sur l'enrobé tiède

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé tiède, après traitement, sont donnés dans le Tableau 12 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Tableau 12 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé tiède lors de la campagne sur le chantier expérimental 2

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	10h41			10h55			11h25		
	S3066	S3051	S3064	S3148	S3054	S3098	S3851	S3847	S3063
Éthane	0,14	0,07	0,07	0,11		0,01	0,46		0,23
i-Hexane			0,55	0,05	0,09	0,02	0,05	0,09	
Isobutane	0,01	0,11	0,01		0,09	0,01	0,13	0,01	0,01
Isooctane	0,10		0,05				0,10		0,05
Isopentane	0,08	0,02	0,02	0,02	0,11	0,02	0,13	0,08	0,11
n-Butane	0,14	0,10	0,14	0,02	0,22	0,05	0,31	0,14	0,22
n-Heptane	0,29	0,38	0,38	0,25	0,21	0,17	0,46	0,42	0,42
n-Hexane	0,20	0,20	0,20	0,13	0,16	0,13	0,45	0,27	0,23
n-Octane	0,47	0,57	0,62	0,28	0,33	0,28	0,81	0,66	0,66
n-Pentane	0,10	0,10	0,07	0,10	0,13	0,02	0,19	0,13	0,13
Propane	0,28	0,10	0,16	0,14	0,25	0,08	0,45	0,16	0,23
1,3-Butadiène	0,02								
1-Butène	0,05	0,05	0,02	0,05	0,07	0,07	0,09	0,07	0,09
1-Pentène									
2-Pentène phase gazeuse		0,01					0,01	0,01	
Acétylène	0,09	0,17	0,13	0,19	0,09	0,18	0,15	0,13	0,08
cis-2-Butène	0,01		0,01				0,01	0,04	
Éthène	0,35	0,55	0,58	0,74	1,06	0,76	0,66	0,37	0,65
Isoprène									
Propène	0,10	0,22	0,29	0,29	0,17	0,24	0,22	0,18	0,18
trans-2-Butène	0,06		0,03				0,03		
1,2,3-Triméthylbenzène	0,07	0,37	0,27	0,12	0,07	0,02	0,22	0,27	0,22
1,2,4-Triméthylbenzène	0,05	0,30	0,40				0,40	0,35	0,35
1,3,5-Triméthylbenzène									
Benzène	0,15	0,15	0,08	0,08	0,11	0,05	0,11	1,05	1,09
Éthylbenzène							0,04		0,04
m+p-Xylène	0,09	0,13	0,26				0,31	0,31	0,31
o-Xylène									
Toluène					0,08		0,04	0,08	0,08

Conditions météorologiques, températures des enrobés et teneur en liant

Les conditions météorologiques sur la journée de mesure ont également été plutôt stables avec une journée ensoleillée et une température moyenne de 23°C sur la période des prélèvements. Durant la matinée, le vent était faible avec des vitesses aux alentours des 5 km/h. En début d'après-midi, le vent s'est levé pour atteindre des vitesses aux alentours des 10 km/h.

Sur 30 minutes, les températures moyennes des enrobés montrent une décroissance linéaire avec une perte d'environ 1,4°C/minute pour le chaud et 1,2°C/minute pour le tiède (Figure 23).

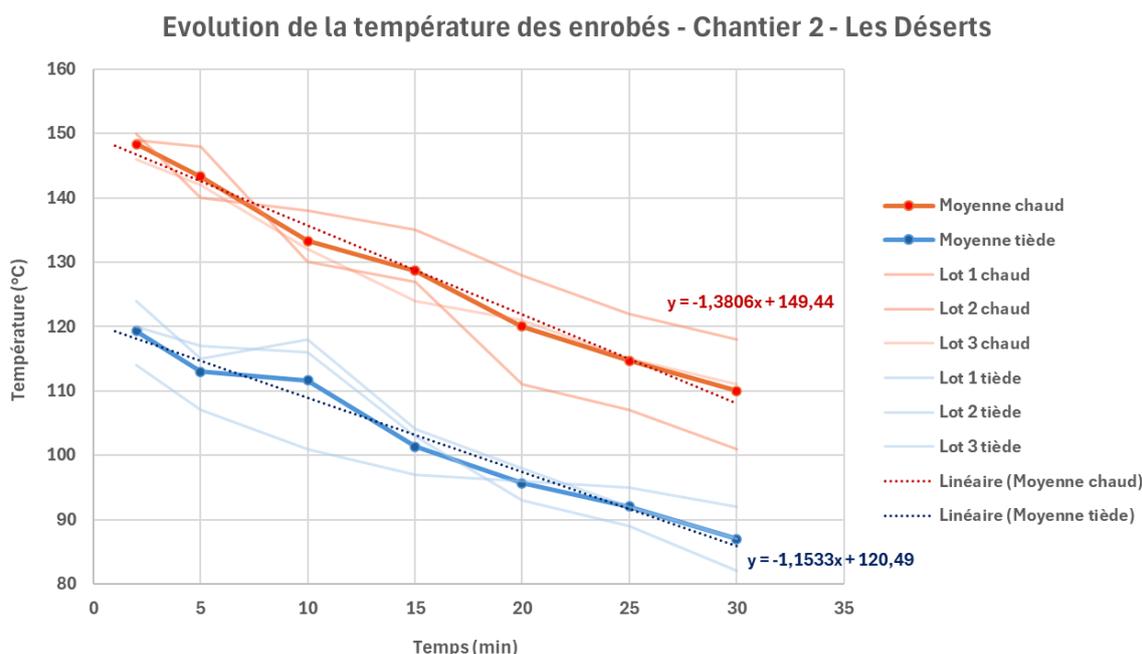


Figure 23 : Évolution des températures des enrobés sur la campagne de mesure du chantier 2 (Source : Cerema)

Les teneurs en liant des enrobés prélevés sont donnés dans le Tableau 8. Le pourcentage est exprimé par rapport à la masse totale d'enrobés (dite interne).

Les valeurs de teneur en liant sont homogènes entre les prélèvements, avec une amplitude de 0.18% entre la valeur minimale et la valeur maximale. Toutes les valeurs sont légèrement supérieures à la teneur totale en liant du rapport d'épreuve de formulation, fixé à 5.21%.

Tableau 13 : Teneurs en liant au droit des points de prélèvement du chantier 2

Taux de bitume (%) Heure de prélèvement	Lot 1 12h22 / 10h41	Lot 2 12h40 / 10h56	Lot 3 13h09 / 11h25
Chaud	5.22	5.25	5.27
Tiède	5.33	5.25	5.40

Analyses des données

La Figure 24 montre les distributions des concentrations des COV, pour les différentes familles définies précédemment, mesurées sur le chantier expérimental 2 pour les enrobés chaud et tiède.

Pour les alcanes prélevés sur l'enrobé chaud, le box-plot est différent des 5 autres avec une boîte plus grande et de nombreuses valeurs atypiques au-dessus de la moustache supérieure, comprises

entre 1,8 et 4,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La médiane est dans la partie inférieure de la boîte (0,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ce qui traduit d'une distribution asymétrique positive, et la moyenne est plus importante (0,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En comparaison, les concentrations des alcanes mesurées sur l'enrobé tiède sont plus faibles, avec une médiane à 0,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une moyenne de 0,19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, et hormis quelques valeurs atypiques, la totalité des concentrations qui sont inférieures à 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cette observation est similaire dans une moindre mesure pour les hydrocarbures aromatiques, car pour les deux box-plots (enrobé chaud et enrobé tiède), leur médiane est similaire (environ 0,13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et leur moyenne quasi identique, aux environs de 0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mais la boîte des prélèvements sur l'enrobé chaud est plus étendue avec plus de concentrations au-dessus des 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Pour les autres composés aliphatiques, l'observation est différente avec des moyennes similaires pour les prélèvements lors de la mise en œuvre de l'enrobé chaud et tiède (environ 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mais avec une médiane (0,06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et une distribution de la boîte autour de concentrations plus faibles pour les prélèvements sur l'enrobé chaud par rapport à celles de l'enrobé tiède (médiane à 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

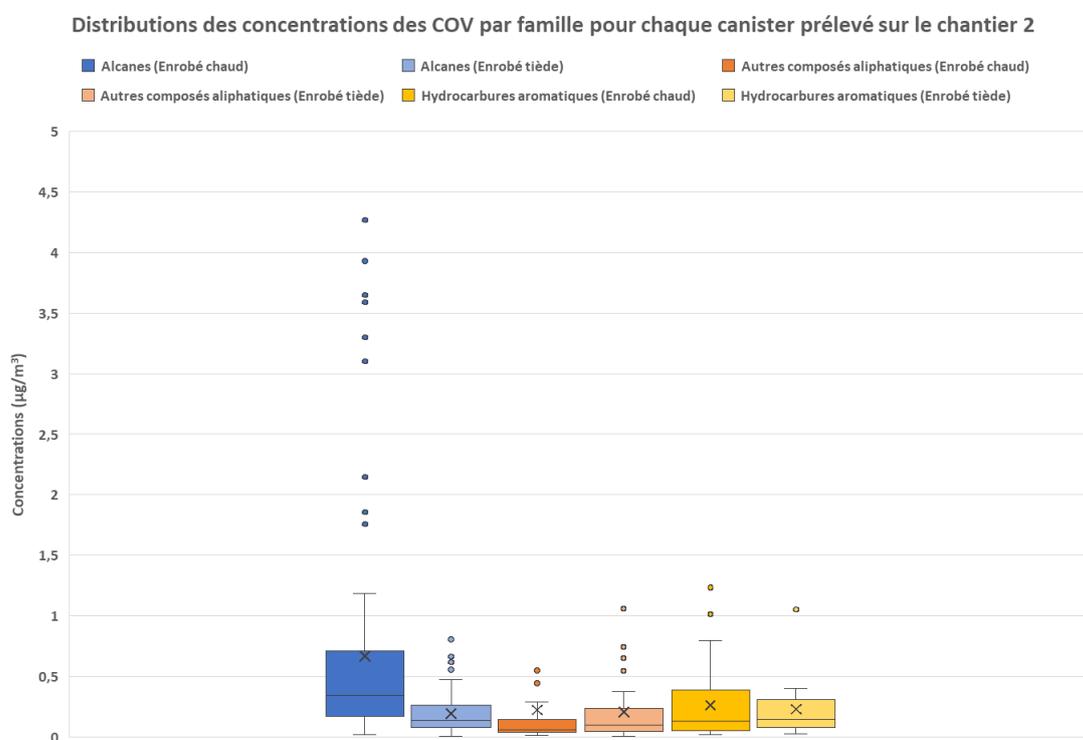


Figure 24 : Distribution des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 2

La Figure 25 montre que la plupart des concentrations moyennes pour les COV prélevés sur l'enrobé chaud sont supérieures à celles mesurées sur l'enrobé tiède.

Moyennes de tous les canisters et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède

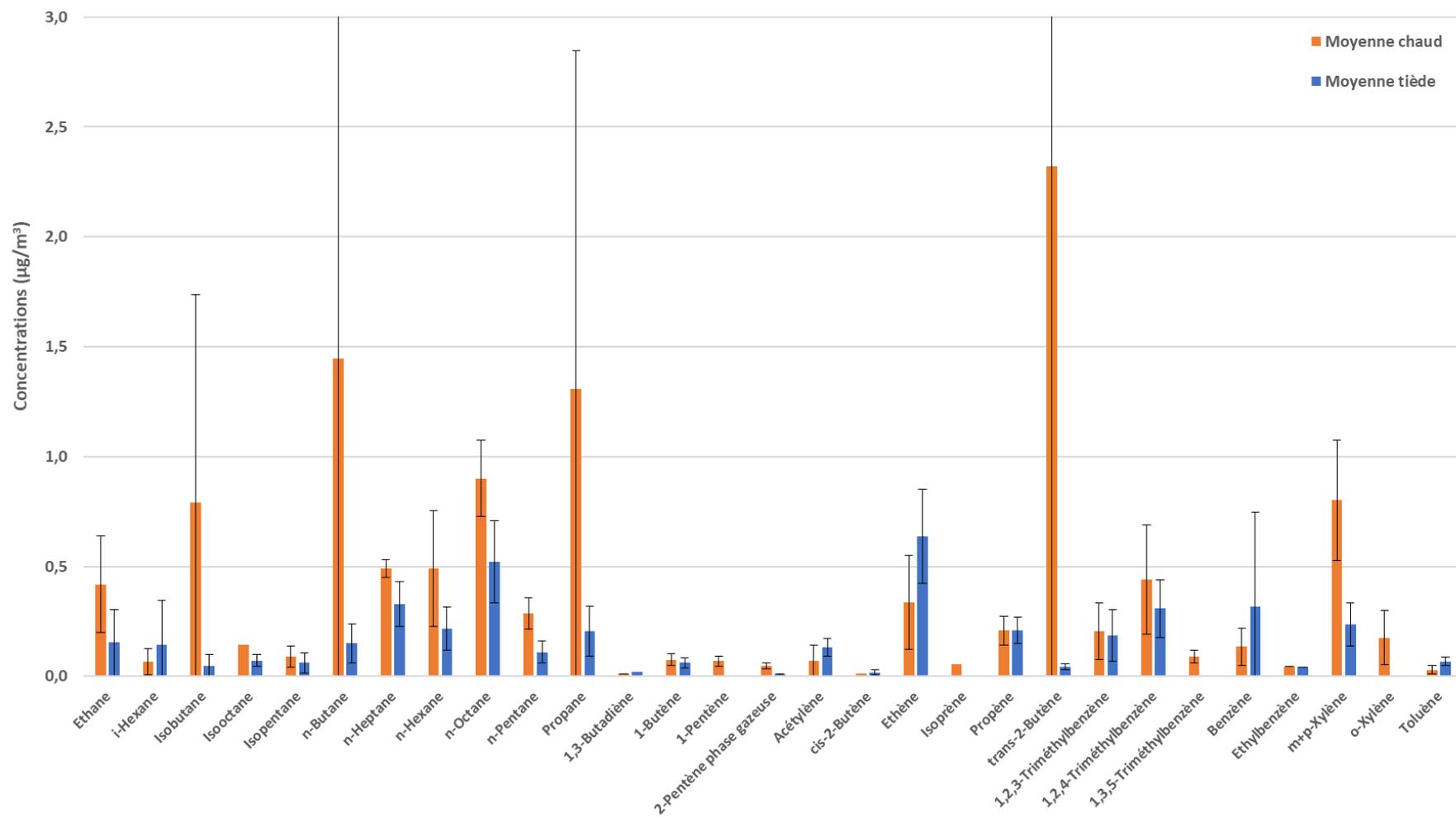


Figure 25 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier expérimental 2 et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède

5.1.2.4. Résultats de la campagne de mesure sur le chantier expérimental 3 – Le Châtelard

Prélèvements sur l'enrobé chaud

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé chaud, après traitement, sont donnés dans le Tableau 14 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Tableau 14 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé chaud lors de la campagne sur le chantier expérimental 3

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	13h34			13h46			14h21		
	1416	1022	1399	1726	1021	1409	1417	1023	1405
Éthane	0,04		0,29	0,25	0,57	0,21	0,11		
i-Hexane					0,18	0,07		0,79	0,04
Isobutane			0,07	0,07	0,05	0,05			0,00
Isooctane	0,07	0,21	0,07	0,07	0,31	0,12		0,07	0,02
Isopentane	0,02	0,02		0,13	0,19	0,13	0,02		
n-Butane	0,04	0,01	0,16	0,16	0,13	0,09			
n-Heptane	0,21	0,29	0,33	0,29	0,50	0,25	0,08	0,04	0,04
n-Hexane	0,05	0,09	0,05	0,16	0,30	0,20			0,02
n-Octane	0,28	0,28	0,33	0,52	0,76	0,47	0,14	0,10	0,10
n-Pentane	0,06	0,09	0,15	0,21	0,33	0,21	0,03	0,03	
Propane	0,02	0,16	0,09	0,16	0,42	0,42			
1,3-Butadiène				0,02	0,02	0,02	0,02		
1-Butène	0,01	0,06	0,03	0,08	0,15	0,08		0,03	
1-Pentène	0,03	0,03	0,06	0,09	0,15	0,09	0,06	0,03	0,03
2-Pentène phase gazeuse	0,04	0,04	0,04	0,20	0,15	0,09	0,09	0,04	0,04
Acétylène			0,02						
cis-2-Butène	0,01		0,01	0,06	0,04	0,06		0,01	0,01
Éthène	0,02	0,06		0,06	0,15	0,05			0,03
Isoprène	0,17	0,37	0,28	0,23	0,23	0,20		0,26	0,09
Propène	0,12	0,04	0,04	0,24	0,45	0,19			0,16
trans-2-Butène	0,02	0,07		0,09	0,09	0,05	0,02	0,02	0,02
1,2,3-Triméthylbenzène	0,25	0,40	0,20	0,50	0,50	0,35	0,05		0,10
1,2,4-Triméthylbenzène	0,20	0,40	0,20	0,30	0,50	0,25	0,05		
1,3,5-Triméthylbenzène			0,10	0,10	0,15	0,10	0,10		
Benzène	0,13	0,20	0,10	0,10	0,36	0,20		0,10	0,07
Éthylbenzène	0,31	0,09	0,04	0,09	0,18	0,09	0,09	0,04	0,04
m + p-Xylène	0,49	0,49	0,18	0,44	0,75	0,40	0,31	0,04	0,04
o-Xylène	0,07	0,15	0,11	0,11	0,20	0,11	0,07	0,20	0,02
Toluène		0,23	0,04		0,27		0,15	0,04	

Prélèvements sur l'enrobé tiède

Les résultats des canisters des trois groupes prélevés sur l'enrobé tiède, après traitement, sont donnés dans le Tableau 15 avec les concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les différents COV.

Tableau 15 : Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ des différents COV obtenues après le traitement des données pour les mesures sur l'enrobé tiède lors de la campagne sur le chantier expérimental 3

Concentrations en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	9h57			10h16			10h32		
	1428	1956	1419	1721	1725	2312	2311	1423	2112
Éthane	0,39	0,13	0,33	0,07	0,51	0,26		0,19	0,47
i-Hexane		0,07	0,04	0,04	0,11	0,61	1,61	0,11	0,11
Isobutane	0,05		0,05		0,07		0,02	0,05	
Isooctane	0,02					0,02	0,07		0,07
Isopentane	0,02		0,02	0,02	0,11		0,05	0,05	0,05
n-Butane	0,03	0,05	0,03		0,31		0,15	0,12	0,05
n-Heptane	0,15	0,19	0,19	0,19	0,10	0,10	0,19	0,23	0,23
n-Hexane	0,09	0,09	0,13	0,05	0,02	0,02	0,05	0,09	0,09
n-Octane	0,24	0,28	0,24	0,24	0,24	0,19	0,33	0,33	0,33
n-Pentane				0,03	0,03			0,06	0,09
Propane	0,16		0,05	0,06			0,06	0,06	0,03
1,3-Butadiène	0,02	0,02	0,02			0,02	0,05	0,05	
1-Butène	0,08	0,08	0,01	0,01	0,06	0,04	0,06	0,01	
1-Pentène	0,03	0,03	0,06		0,03	0,06	0,06	0,03	0,06
2-Pentène phase gazeuse	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,04
Acétylène						0,01	0,02		
cis-2-Butène	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04
Éthène	0,28	0,14	0,33	0,18	0,04	0,13	0,01	0,06	0,19
Isoprène									
Propène	0,09	0,05	0,04		0,07	0,05	0,25		0,04
trans-2-Butène		0,01				0,01		0,04	
1,2,3-Triméthylbenzène	0,08	0,08						0,17	0,22
1,2,4-Triméthylbenzène	0,03	0,08		0,47	0,42	0,52	0,23	0,18	0,13
1,3,5-Triméthylbenzène	0,03			0,08	0,08	0,12		0,03	
Benzène	0,16	0,06	0,13			0,03	0,06	0,10	0,13
Éthylbenzène					0,09				
m+p-Xylène	0,07	0,07	0,02		0,38	0,02			
o-Xylène		0,04	0,04		0,13		0,13		
Toluène	0,02		0,13	0,06	0,94	0,02	0,29	0,29	0,25

Conditions météorologiques, températures des enrobés et teneur en liant

Les conditions météorologiques sur la journée de mesure ont également été plutôt stables avec une journée ensoleillée et une température moyenne de 20°C sur la période des prélèvements réalisés dans la matinée et une moyenne de 27°C lors des prélèvements du début d'après-midi. Le matin un léger vent (5km/h) était présent. Le vent s'est levé en début d'après-midi avec des vitesses comprises entre 5 et 10km/h.

Sur 30 minutes, les températures moyennes des enrobés montrent une décroissance linéaire avec une perte d'environ 1,4°C/minute pour le chaud et pour le tiède (Figure 26). Pour ce chantier, la décroissance légèrement plus rapide des températures de l'enrobé tiède est contre-intuitive mais expliquée par les conditions météorologiques : les températures extérieures étaient plus élevées lors de la mise en œuvre des enrobés chauds et le rayonnement solaire était plus intense ce qui a permis aux enrobés chauds de maintenir une température élevée plus longtemps.

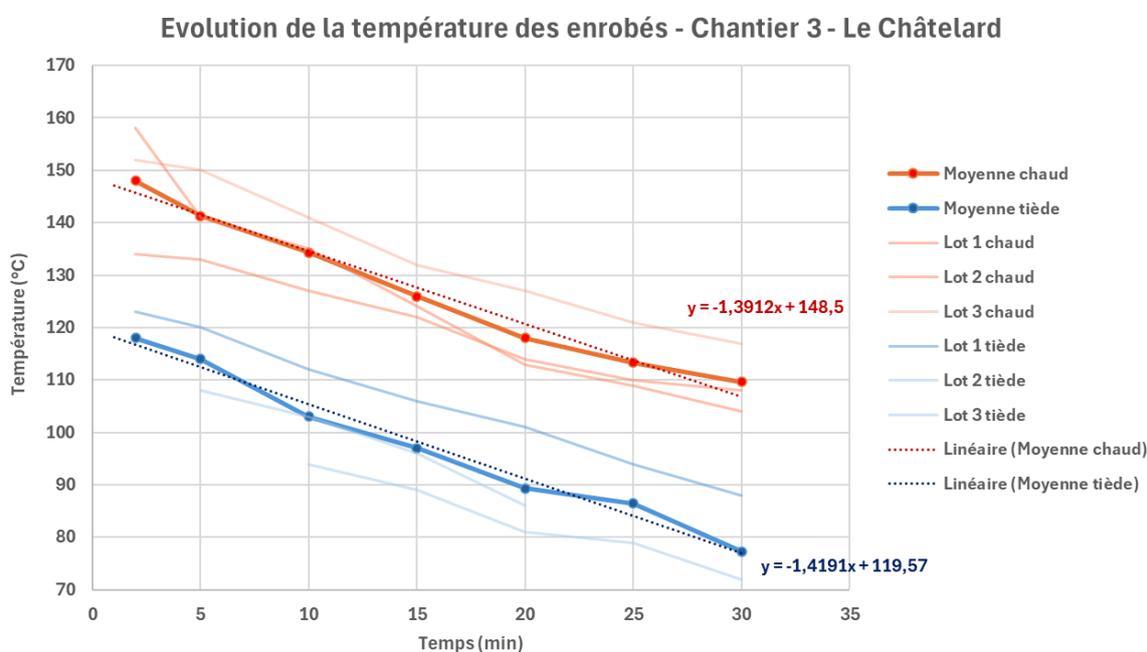


Figure 26 : Évolution des températures des enrobés sur la campagne de mesure du chantier 3 (Source : Cerema)

Les teneurs en liant des enrobés prélevés sont données dans le Tableau 11. Le pourcentage est exprimé par rapport à la masse totale d'enrobés (dite interne).

Les valeurs de teneur en liant sont homogènes entre les prélèvements, mise à part le prélèvement du lot 2 tiède qui a une teneur en liant bien inférieure aux autres. Mis à part pour ce prélèvement, les autres valeurs sont légèrement supérieures à la teneur totale en liant du rapport d'épreuve de formulation, fixé à 5.21%.

Tableau 16 : Teneurs en liant au droit des points de prélèvement du chantier 3

Taux de bitume (%) Heure de prélèvement	Lot 1 13h30 / 9h55	Lot 2 13h45 / 10h20	Lot 3 14h21 / 10h45
Chaud	5.34	5.34	5.42
Tiède	5.25	4.22	5.49

Analyses des données

La Figure 27 montre les distributions des concentrations des COV, pour les trois familles de composés, mesurées sur le chantier expérimental 3 pour les enrobés chaud et tiède.

Pour tous les composés prélevés, hormis quelques valeurs atypiques, toutes les concentrations sont inférieures à $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Les distributions pour chaque famille montrent des asymétries positives avec des médianes dans la partie inférieure de leur boîte, sauf pour les autres composés aliphatiques prélevés sur l'enrobé tiède, où la médiane se trouve dans la partie supérieure et montre une distribution asymétrique négative.

Les distributions pour les prélèvements sur l'enrobé chaud, pour les trois familles de composés, montrent des concentrations supérieures par rapport aux prélèvements sur les enrobés tièdes.

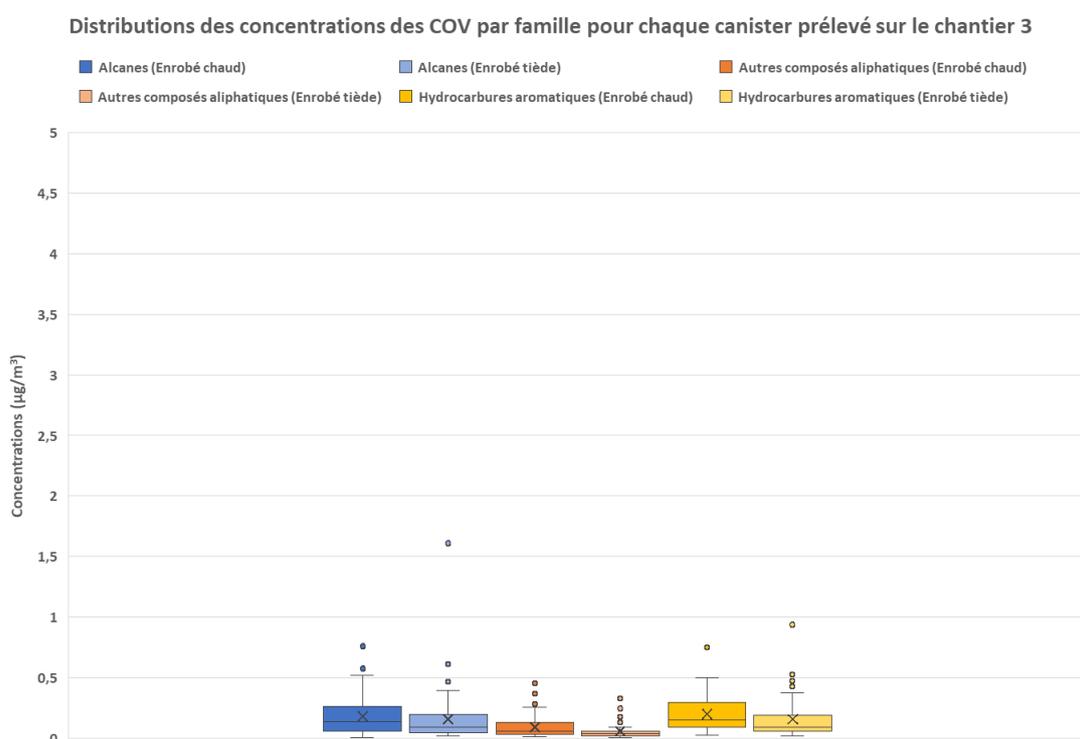


Figure 27 : Distribution des concentrations des COV par famille pour chaque canister prélevé sur le chantier 3

La Figure 28 montre des concentrations moyennes pour les différents COV quasi-similaires, avec quelques fois des concentrations légèrement supérieures pour les prélèvements effectués sur l'enrobé chaud par rapport à ceux de l'enrobé tiède.

Moyennes de tous les canisters et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède

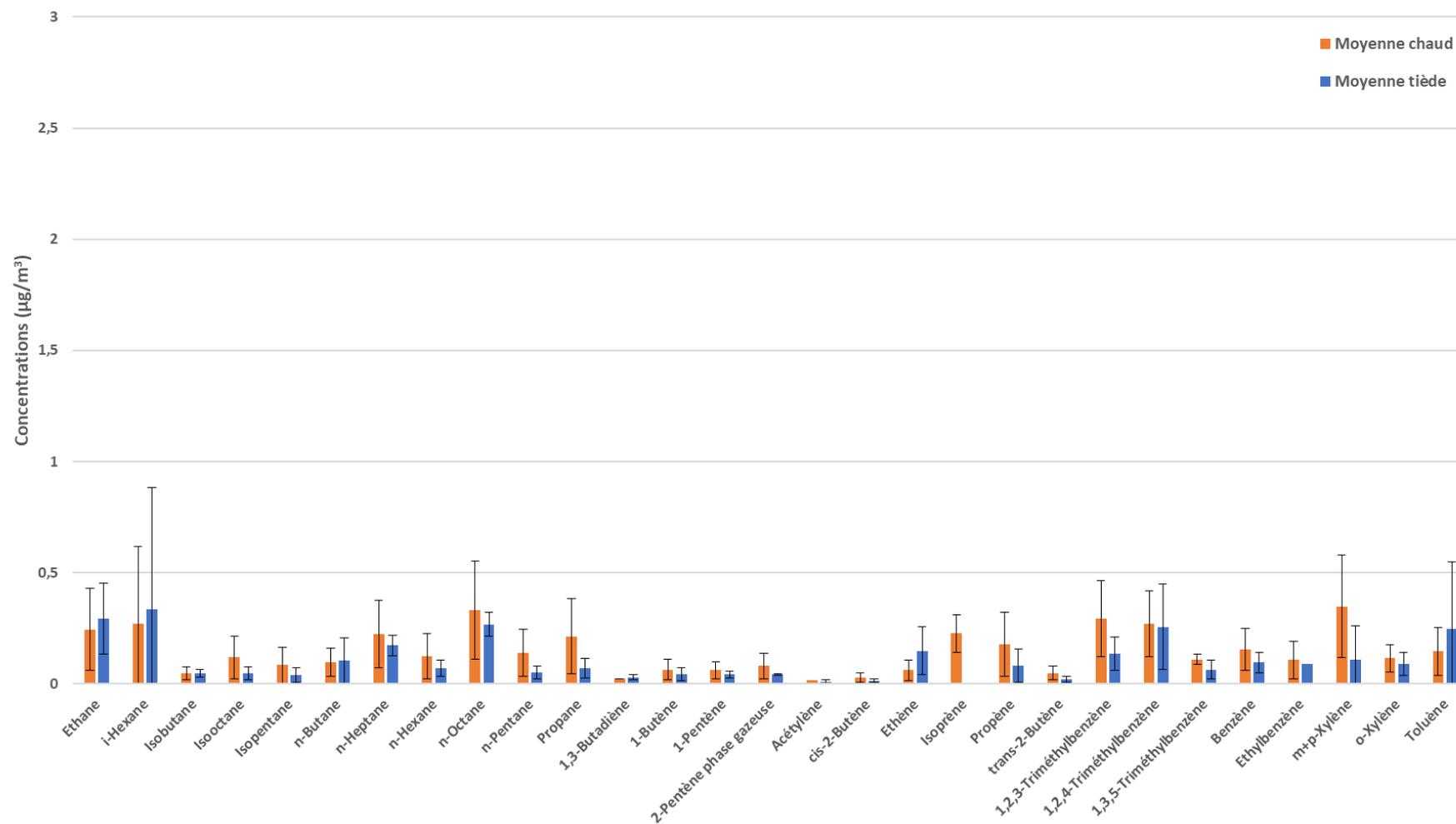


Figure 28 : Moyennes de tous les canisters prélevés pour chaque COV sur le chantier expérimental 3 et comparaison entre les prélèvements sur l'enrobé chaud et tiède

5.2. Synthèse de l'analyse des chantiers

Cette étude vise à étudier l'influence de la température des enrobés sur les émissions des précurseurs de l'ozone lors de la mise en œuvre. L'expérimentation consiste à instrumenter les abords de chantiers de mise en œuvre d'enrobés pour prélever les émissions de ceux-ci via des canisters sur une fenêtre temporelle de 30 minutes.

Les résultats des analyses, sur seulement trois chantiers expérimentaux, ne permettent pas de conclure quant aux bénéfices des procédés d'abaissement de la température de fabrication des enrobés sur les émissions de précurseurs d'ozone. Lors de la 1^{ère} campagne de mesure à Feissons-sur-Isère, les concentrations des composés mesurées lors de la mise en œuvre de l'enrobé tiède sont globalement supérieures à celles mesurées lors de la mise en œuvre de l'enrobé chaud. Pour les deux autres campagnes (Les Déserts et Le Châtelard), les concentrations mesurées sur les enrobés chauds sont globalement plus élevées par rapport à celles sur les enrobés tièdes. Cela confirme l'importance de bien maîtriser les paramètres des chantiers instrumentés, notamment les formules des enrobés, les quantités mises en œuvre, les températures et la temporalité de la mesure.

Une autre différence entre le chantier 1 et les chantiers 2 et 3 réside dans la largeur d'enrobés mis en œuvre. Sur le chantier 1, la mise en œuvre des enrobés chauds et tièdes a été réalisée sur une voie, sur une largeur d'environ 4m. Sur les 2 et 3, les enrobés ont été mis en œuvre sur les deux voies en parallèle, sur une largeur d'environ 8m. Ici aussi, le résultat ne confirme pas cette hypothèse selon laquelle les chantiers où les « surfaces émettrices » sont plus importantes présentent des concentrations de COV plus importantes. Il est également possible que ce paramètre ne soit pas significatif considérant la nature de l'instrumentation ; les canisters étant posés au sol et à proximité du bord de l'enrobé mis en œuvre, il y a de fortes chances qu'ils puissent capter uniquement les émissions de l'enrobé à proximité et que les effets de bord soient négligeables. Cela pourrait être vérifié en expérimentant avec différentes dispositions transversales des canisters sur la chaussée.

En termes de temporalité dans les mesures, pour le chantier 1, les mesures sur enrobé chaud ont été réalisées le matin et l'après-midi pour l'enrobé tiède. Pour les 2 et 3, l'inverse a été réalisé. Bien que les paramètres météorologiques aient été relevés, il est possible que d'autres variables liées à la temporalité aient pu influencer les résultats.

Les mesures réalisées sur les trois chantiers expérimentaux montrent des concentrations pour les différents COV faibles, principalement inférieures à $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, voire à $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, notamment pour les mesures sur les chantiers 2 et 3, qui montrent des températures d'enrobés au global plus faibles par rapport à celles observées sur le chantier 1.

En plus des différences de températures entre les enrobés pour le chantier 1 et ceux des chantiers 2 et 3, les formules d'enrobés mis en œuvre sont également différentes. Le chantier 1 a employé une Grave-Bitume tandis que les chantiers 2 et 3 ont employé la même formule de Béton Bitumineux Semi-Grenu. Les 2 formules diffèrent selon plusieurs paramètres, notamment par leur épaisseur – plus importante pour la GB – et par leur teneur en liant – moins importante pour la GB. Intuitivement, on pourrait dire qu'une teneur en bitume plus importante augmenterait les concentrations de COV émis, mais les données ne confirment pas cette hypothèse.

Il est également observé une dispersion intra-lot non-négligeable (i.e. entre chaque canister posé au même point de prélèvement). Ces observations peuvent pointer vers une difficulté à canaliser les émissions ou une dilution élevée des concentrations liées à la nature de l'expérimentation en plein air.

Concentrations des COVt selon la teneur en liant sur les 3 chantiers expérimentaux

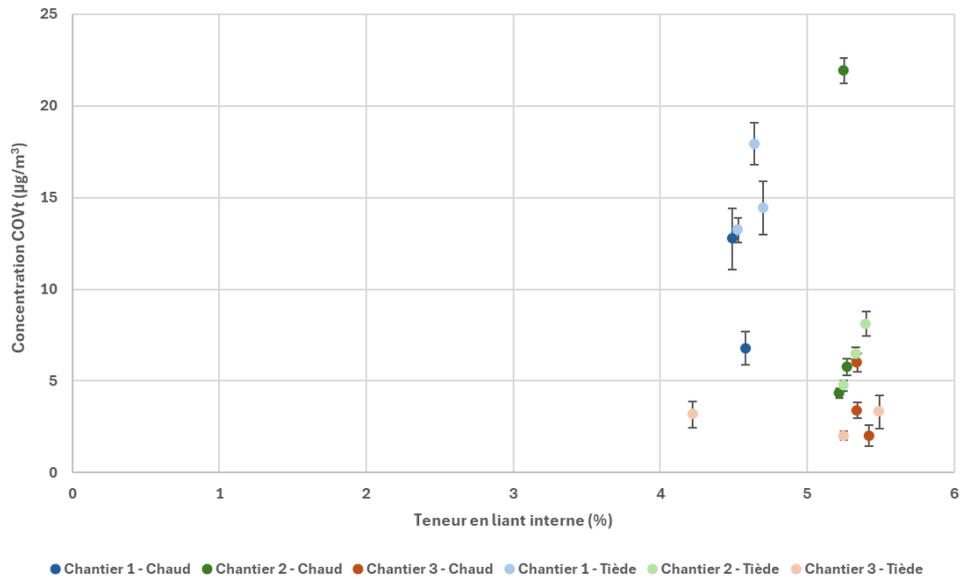


Figure 29 : Concentrations des COVt pour les trois chantiers expérimentaux selon la teneur en liant

Concentrations des COVt selon la température des enrobés sur les 3 chantiers expérimentaux

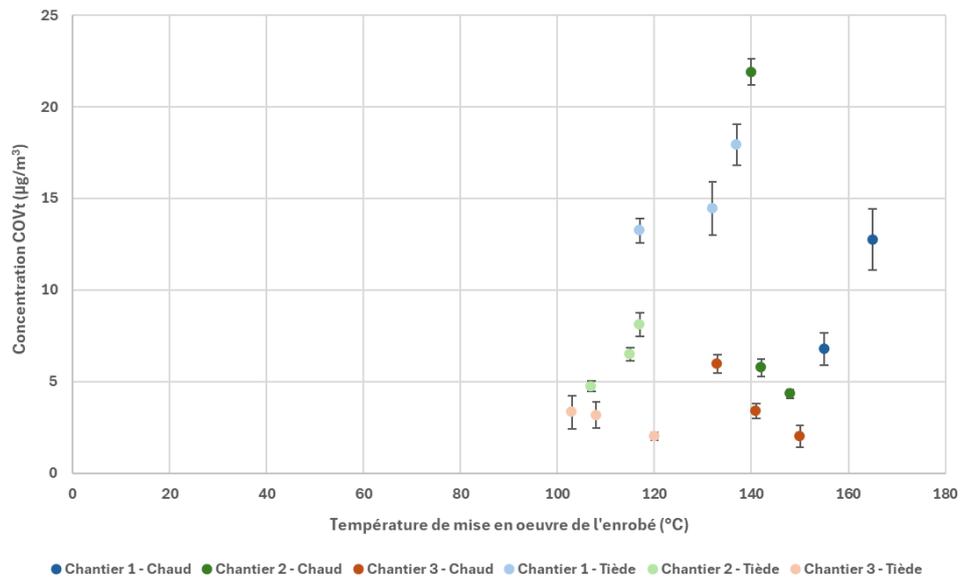


Figure 30 : Concentrations des COVt pour les trois chantiers expérimentaux selon la température de mise en oeuvre

5.3. Limites et perspectives de l'étude

La limite principale de cette étude réside dans les ordres de grandeur de concentrations mesurées de COV particulièrement faibles, qui peut être dus à la nature de l'expérimentation en plein air, rendant difficile la mise en évidence de tendance claire, mais également à la possibilité que les émissions de COV pendant la mise en œuvre soient tout simplement trop faibles pour pouvoir être caractérisées en milieu ouvert. Cela pourrait expliquer les dépendances importantes aux facteurs extérieurs, comme il a pu être constaté notamment sur le chantier 1 avec un lot de canister contaminé par une source extérieure non identifiée. Pour améliorer la canalisation des émissions et les concentrations mesurées, des adaptations du protocole de mesure sont à envisager. Par exemple, les temps de prélèvements pourraient être moins longs ce qui permettrait de mesurer des concentrations moyennes sur une plage plus restreinte et plus élevée de températures des enrobés. Dans cette étude, les temps de prélèvements étaient de 30 minutes et la plage de température des enrobés étaient d'en moyenne de [155°C ; 115°C] pour les enrobés chauds et de [125°C ; 85°C] pour les enrobés tièdes. En restreignant le temps de prélèvement à 5min, les plages de température seraient d'environ [155°C ; 145°C] pour les enrobés chauds et de [125°C ; 115°C] pour les enrobés tièdes, ce qui permettrait de moyenniser des concentrations plus élevées. D'autre part, il peut être envisagé de modifier l'emplacement des points de prélèvement, par exemple au milieu de la largeur d'enrobés mis en œuvre pour capter plus d'émissions.

Une autre limite est liée à la quantité de chantier testés. L'étude repose uniquement sur l'analyse de trois chantiers expérimentaux, ce qui constitue un échantillon limité pour tirer des conclusions généralisables. Un élargissement du nombre de sites étudiés ainsi qu'à d'autres formules d'enrobé serait à envisager dans une éventuelle poursuite de cette étude, ce qui permettrait de mieux caractériser les tendances observées et de s'assurer de leur robustesse statistique.

De plus, cette étude s'intéresse spécifiquement aux émissions issues de la mise en œuvre des enrobés, étape pendant laquelle la température des enrobés décroît rapidement. Sur cette phase, nous avons vu que les courbes de décroissance de température des enrobés chauds et tièdes suivent une dynamique similaire, à la seule différence que celle des enrobés chauds est translatée dans le temps d'environ 20 minutes pendant lesquelles les températures sont plus élevées. Cela signifie que, si on considère que la température est le paramètre le plus influent sur les émissions (hypothèse non vérifiée), sur l'ensemble du processus de refroidissement, les émissions d'un enrobé chaud seraient globalement celles d'un enrobé tiède, auxquelles s'ajouteraient les émissions générées durant ces 20 minutes supplémentaires où la température reste plus élevée (Figure 32). En d'autres termes, l'influence des enrobés tièdes en termes de réduction des émissions pendant l'étape de mise en œuvre repose principalement sur la limitation des émissions durant cette courte phase initiale, où la température est critique dans le phénomène de volatilisation des composés organiques. Ainsi, pour réellement apprécier l'impact des procédés d'abaissement de température sur les émissions de COV, il est également nécessaire de quantifier les émissions issues des étapes précédentes comme la fabrication en centrale ou le transport, étapes où la différence entre enrobé chaud et tiède est importante sur un temps long.

Enfin, pour cette expérimentation, un seul procédé d'abaissement de la température a été testé : le moussage du bitume. Or, dans la littérature, beaucoup d'études ont été réalisées sur des enrobés dont le procédé d'abaissement de la température était l'additivation. Il serait intéressant de mesurer l'impact de ce procédé et de comparer les résultats avec les études existantes.

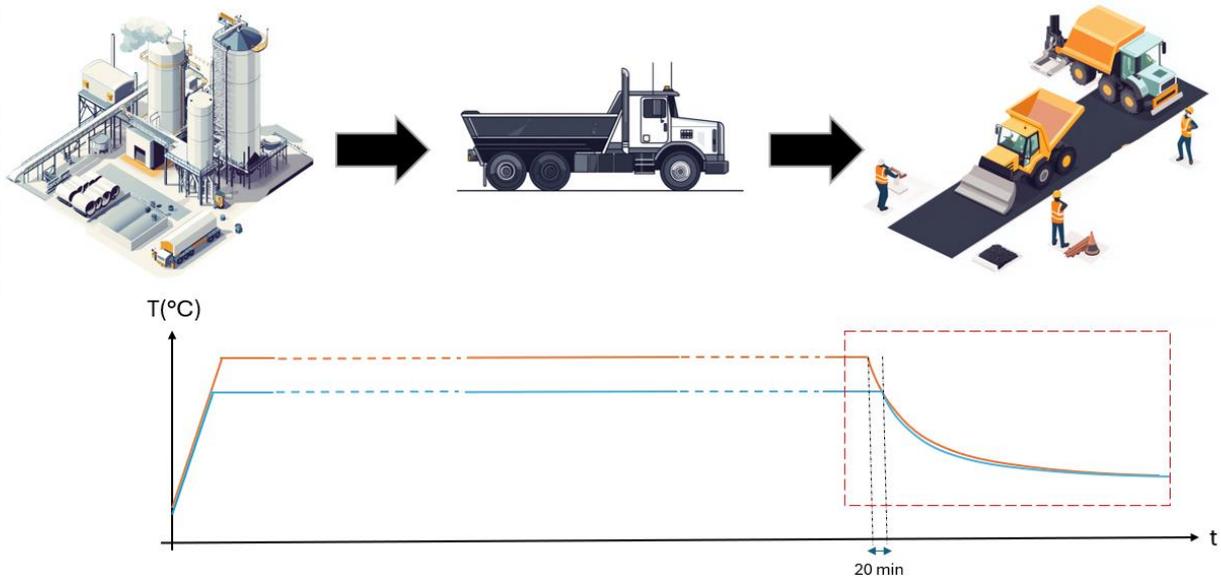


Figure 31 : Schéma de principe de la fabrication à la mise en œuvre des enrobés et courbes de température théoriques associées (orange : enrobé chaud, bleu : enrobé tiède)

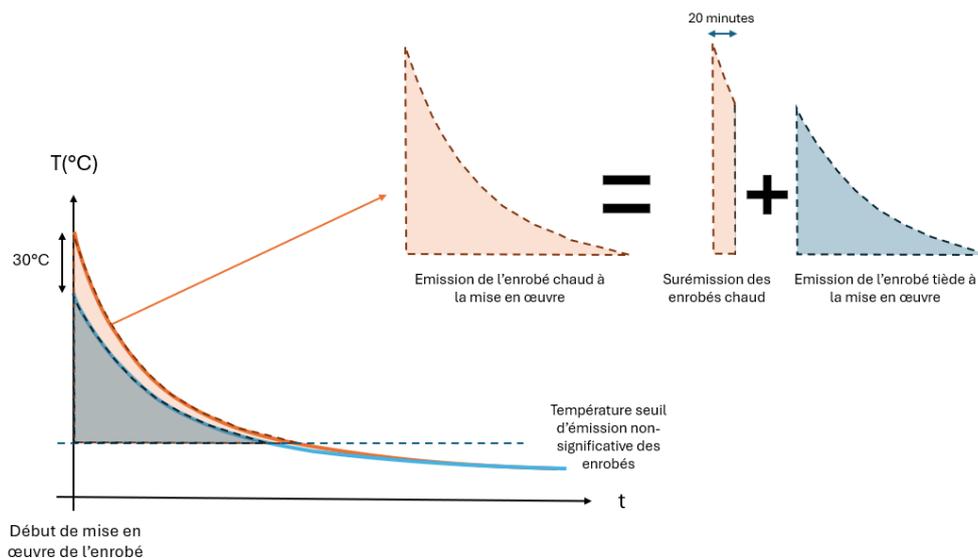


Figure 32 : Courbes d'évolution de la température dans le temps et émissions associées dans l'hypothèse où les émissions sont proportionnelles à l'aire sous la courbe

Les travaux menés dans cette étude ont permis d'apporter des connaissances intéressantes sur les émissions de composés organiques volatils lors de la mise en œuvre des enrobés, en mettant en évidence des facteurs influents et les difficultés méthodologiques associées à ce type de mesure en milieu ouvert. Toutefois, considérant les limites observées, la poursuite de cette étude ne semble pas justifiée au regard des moyens déjà investis. L'échantillon limité de chantiers expérimentaux, la variabilité des conditions extérieures et les contraintes techniques de mesure rendent les perspectives d'approfondissement complexes et coûteuses pour un bénéfice scientifique relativement restreint. Ainsi, bien que cette étude ait permis d'éclairer certains aspects de la problématique, il a été décidé de ne pas la prolonger davantage.

6. Annexes

Annexe 1. Les méthodes d'analyse quantitative et qualitative

- Analyse des échantillons issus des tubes adsorbant

Les méthodes d'analyses vont dépendre de l'objet de la recherche. Pour caractériser la matière particulaire totale et les polyaromatiques solubles dans le benzène, il existe la méthode 5042 du NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). La méthode 5042 nécessite des filtres en PTFE fixés à des pompes qui peuvent contrôler le débit d'air. Les pompes fonctionnent pendant une durée déterminée afin de normaliser le volume qui les traverse. Une fois que le volume d'air défini a traversé les filtres, ceux-ci sont pesés pour mesurer la matière particulaire totale (TOM), puis extraits avec des solvants pour mesurer la teneur en HAP par gravimétrie sous forme de matière soluble dans le benzène (BSM) ou de matière soluble dans le solvant (SSM) si l'on utilise autre chose que du benzène. Cette mesure est convertie en masse/volume permettant une estimation de la concentration de particules et d'aromatiques dans l'air sur les chantiers ou à partir d'échantillons de laboratoire. L'analyse gravimétrique est une méthode quantitative simple, et la simplicité de cette technique permet de réaliser des tests rapides qui ne nécessitent pas d'instruments coûteux (Calzavara et al., 2003 ; Deygout et al., 2009 ; Sargand et al., 2012). Cependant, cette méthode ne permet pas d'avoir une caractérisation précise des éléments mais seulement une concentration totale.

- Autres méthodes d'analyse :

Une fois les émissions collectées par tube adsorbant, les filtres peuvent être extraits avec des quantités minimales de solvant pour produire une extraction concentrée de l'échantillon. Cet extrait peut ensuite être séparé à l'aide d'un chromatographe en phase gazeuse ou liquide (GC ou LC). Étant donné la nature complexe des fumées d'enrobés, les méthodes GC et LC sont souvent utilisées pour séparer les produits chimiques recueillis dans les échantillons avant de pouvoir les identifier. Entre ces deux instruments, la GC est le plus couramment utilisée dans les recherches sur les fumées d'enrobés. La matrice complexe des fumées d'enrobés ainsi que la haute volatilité et la nature non polaire des constituants chimiques conviennent à l'instrumentation GC.

Qu'est-ce que la chromatographie en phase gazeuse :

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est, comme toutes les techniques de chromatographie, une technique qui permet de séparer des molécules d'un mélange éventuellement très complexe de nature très diverses. Elle s'applique principalement aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Elle est de plus en plus utilisée dans les principaux domaines de la chimie.

Le mélange à analyser est vaporisé à l'entrée d'une colonne, qui renferme une substance active solide ou liquide appelée phase stationnaire, puis il est transporté à travers celle-ci à l'aide d'un gaz porteur (ou gaz vecteur). Les différentes molécules du mélange vont se séparer et sortir de la colonne les unes après les autres après un certain laps de temps qui est fonction de l'affinité de la phase stationnaire avec ces molécules.

Ces molécules sont ensuite identifiées par des méthodes telles que la spectrométrie de masse (MS) ou le détecteur à ionisation de flamme (FID) qui sont les méthodes les plus utilisées (Deygout et al., 2009 ; Chong et al., 2013 ; Bolliet et al., 2015 ; Yang et al., 2018 ; Borinelli et al., 2020)

D'autres méthodes d'identification de composés peuvent être couplée à la chromatographie en phase gazeuse comme la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (GC-FTIR) (Yang et al., 2018)

- **Analyse des échantillons issus des canisters**

L'article scientifique Chong et al. (2014), utilisant des canisters comme moyen de prélèvements, analyse les échantillons grâce à une chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectrophotomètre de masse (méthode d'analyse explicitée ci-dessus). Pass-Dülmer et al. (2006) présentent des comparaisons entre différents laboratoires sur les méthodes de prélèvements et d'analyses des canisters.

Annexe 2. Tableau des références bibliographiques sur les méthodes de mesure

Tableau 17 : Références bibliographiques étudiées avec la description de leur méthode de mesure, de leur moyen de prélèvement, des composés analysés et des types d'enrobés utilisés

Article/ Revue/ Rapport/Thèse	Méthode de mesure	Moyen de prélèvement	Composés analysés	Type d'enrobés
Farshidi F., D. Jones, et J.T. Harvey. « Warm-mix asphalt study: Evaluation of rubberized hot-and warm-mix asphalt with respect to emissions », 2013.	Chambre de flux portable, utilisée in-situ lors des 4 étapes de la production et des opérations de pose	Tubes d'échantillonnage et filtres	HAP, Alcanes	Enrobés à chaud et tièdes conventionnels Enrobés à chaud et tièdes caoutchoutés Enrobés à chaud avec 15% de chaussée en asphalte recyclée
Zanetti M.C., S. Fiore, B. Ruffino, E. Santagata, M. Lanotte, et D. Dalmazzo. « Development of a laboratory test procedure for the evaluation of potential gaseous emissions of asphalt rubber bituminous mixtures ». Sustainability, Eco-Efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management, 2014, 119-28.	Laboratoire + Comparaison avec des résultats sur sites	Cartouches de charbon actif	COV, HAP	Enrobés à chaud et tièdes caoutchoutés
Prowell B., B. Frank, L. Osborne, T. Kriech, et R. West. « Effects of WMA on plant energy and emissions and worker exposures to respirable fumes ». National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, USA, NCHRP, 2014.	Mesures à la sortie des cheminées des centrales d'enrobés + mesures de l'exposition des travailleurs	Tubes absorbants XAD2/charbon de bois pour l'exposition des travailleurs	COV	Différents mélanges d'enrobés à chaud et tièdes
Farshidi F., D. Jones, A. Kumar, P.-G. Green, et J.T. Harvey. « Direct measurements of volatile and semivolatile organic compounds from hot-and warm-mix asphalt ». Transportation research record 2207, n° 1 (2011) : 1-10.	Chambre de flux portable, utilisée sur site après la pose des enrobés	Cartouches de charbon actif	Alcanes,	Enrobés à chaud et tièdes caoutchoutés

Lin S., W. Hung, et Z. Leng. « Air pollutant emissions and acoustic performance of hot mix asphalts ». Construction and Building Materials 129 (2016) : 1-10.	Laboratoire et in-situ	Canister (COV) et Capteur d'aérosol photoélectrique (HAP)	COV, HAP	Différents mélanges d'enrobés à chaud
Zanetti M.C., S. Fiore, B. Ruffino, E. Santagata, et M. Lanotte. « Assessment of gaseous emissions produced on site by bituminous mixtures containing crumb rubber ». Construction and Building Materials 67 (2014) : 291-96.	Mesures in-situ sur le finisseur	Cartouches de charbon actif	COV, HAP	Enrobés à chaud caoutchoutés
Chong D., Y. Wang, H. Guo, et Y. Lu. « Volatile organic compounds generated in asphalt pavement construction and their health effects on workers ». Journal of Construction Engineering and Management 140, n° 2 (2014): 04013051.	Mesures in-situ lors des opérations de pose et de compactage	Canister	COV	Différents mélanges d'enrobés à chaud
Borinelli J.-B., J. Blom, M. Portillo-Estrada, P. Kara De Maeijer, W. Van den Bergh, et C. Vuye. « VOC Emission analysis of bitumen using proton-transfer reaction time-of-flight mass spectrometry ». Materials 13, n° 17 (2020) : 3659.	Laboratoire	Spectromètre de masse à temps de vol par réaction de transfert de protons (PTR-TOF-MS)	COV	Enrobés conventionnels et caoutchoutés à différentes températures, entre 120 et 180°C
Khare P., J. Machesky, R. Soto, M. He, A.-A. Presto, et D.R. Gentner. « Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors ». Science advances 6, n° 36 (2020) : eabb9785.	Laboratoire	Tubes adsorbants sur mesure	COV, HAP	Enrobés conventionnels à différentes températures
Jullien A., C. Ropert, Y. Baudru, N. Grignard, V. Cerezo, P. Braja, J.M. Mourier, et D. Camisuli. « Eco-évaluation d'enrobés chauds et tièdes, neufs et recyclés à 30% : étude de la RD 93N ». Revue Générale des routes et de l'aménagement, n° 910 (2013).	Mesures sur une centrale d'enrobage	Méthodologie ACV	COV (POCP)	Chaud avec et sans recyclés Tiède avec 30% de recyclés

Brandt, H. C. A., et P. C. De Groot. « A laboratory rig for studying aspects of worker exposure to bitumen fumes ». American Industrial Hygiene Association Journal 60, n° 2 (1999) : 182-90.	Laboratoire		HAP	Enrobés à chaud
Sutter B., E. Pelletier, M. Blaskowitz, C. Ravera, C. Stolze, C. Reim, E. Langlois, et D. Breuer. « Sampling and analysis of bitumen fumes : comparison of German and French methods to determine a conversion formula ». Annals of Work Exposures and Health 62, n° 6 (2018) : 721-32.	Mesures in-situ et laboratoire	Prélèvement de particules sur filtres et de gaz sur tubes adsorbants XAD-2	Analyse complète des fumées d'enrobé	Enrobés à chaud
Calzavara T. S., C. M. Carter, et C. Axten. « Air sampling methodology for asphalt fume in asphalt production and asphalt roofing manufacturing facilities: Total particulate sampler versus inhalable particulate sampler ». Applied occupational and environmental hygiene 18, n° 5 (2003) : 358-67.	Mesures in-situ	Filtre de 37 mm avec un orifice de 4 mm (NIOSH 5042) + un échantillonneur de particules inhalables conçu par l'IOM avec un orifice de 15 mm	Particules totales et particules inhalables	
Raulf-Heimsoth M., B. Marczynski, A. Spickenheuer, B. Pesch, P. Welge, R. Rühl, R. Bramer, B. Kendzia, E. Heinze, et J. Angerer. « Bitumen workers handling mastic versus rolled asphalt in a tunnel: assessment of exposure and biomarkers of irritation and genotoxicity ». Archives of toxicology 85 (2011) : 81-87.	Mesures in-situ	L'échantillonnage des vapeurs et des aérosols a été réalisé selon la méthode BGIA n° 6305 (Breuer 2008 ¹⁹)	HAP	Enrobés à chaud
Breuer D., J.-U. Hahn, D. Höber, C. Emmel, U. Musanke, R. Rühl, A. Spickenheuer, M. Raulf-Heimsoth, R. Bramer, et A. Seidel. « Air sampling and determination of vapours and aerosols of bitumen and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Human Bitumen Study ». Archives of toxicology 85 (2011) : 11-20.	Mesures in-situ	L'échantillonnage des vapeurs et des aérosols a été réalisé selon la méthode BGIA n° 6305 (Breuer 2008 ¹⁹)	HAP	Enrobés à chaud

¹⁹ Breuer D. (2008) Bitumen (Dämpfe und Aerosole, Mineralöl-Standard). BGIA Arbeitsmappe numérique 6305/1

Cui P., G. Schito, et Q. Cui. « VOC emissions from asphalt pavement and health risks to construction workers ». Journal of Cleaner Production 244 (2020) : 118757.	Mesures in-situ	Dispositif de détection par photo-ionisation (PID)	COV totaux	Enrobés à chaud
Yang, X., Z. You, D. Perram, D. Hand, Z. Ahmed, W. Wei, et S. Luo. « Emission analysis of recycled tire rubber modified asphalt in hot and warm mix conditions ». Journal of hazardous materials 365 (2019) : 942-51.	Laboratoire et mesures sur site de production (cheminée)	Tubes de désorption thermique (TDT) + Couplage de la chromatographie en phase gazeuse et de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (GC-FTIR)	COV	Enrobés à chaud Enrobés à chaud et tièdes caoutchoutés
Sargand S., M. D. Nazzal, A. Al-Rawashdeh, et D. Powers. « Field evaluation of warm-mix asphalt technologies ». Journal of Materials in Civil Engineering 24, n° 11 (2012) : 1343-49.	Laboratoire et mesures in-situ sur cheminée	Filtres	Particules totales	Enrobés à chaud et tièdes avec chaussée en asphalte recyclée
Bolliet C., A. J. Kriech, C. Juery, M. Vaissiere, M. A. Brinton, et L. V. Osborn. « Effect of temperature and process on quantity and composition of laboratory-generated bitumen emissions ». Journal of Occupational and Environmental Hygiene 12, n° 7 (2015) : 438-49.	Laboratoire	Deux tubes sorbant XAD-2 suivis d'un tube sorbant XAD-2 + charbon de bois	Matière organique totale et composés aromatiques polycycliques	Enrobés à chaud et tièdes
Deygout F., et P. Le Coutaller. « Field sampling investigations within the road paving industry ». Journal of Occupational and Environmental Hygiene 7, n° 2 (2009) : 103-8.	Mesures in-situ	Echantillonneur IOM équipé d'une membrane en fibre de verre et d'un filtre de 37 mm en PTFE + Tubes XAD-2	Particules totales + Traces de HAP + Fractions gazeuses	Enrobés à chaud
Kriech, A. J., C. Emmel, L. V. Osborn, D. Breuer, A. P. Redman, D. Hoerber, F. Bochmann, et R. Ruehl. « Side-by-side comparison of field monitoring methods for hot bitumen emission exposures: the German IFA Method 6305, US NIOSH Method 5042, and the Total Organic Matter Method ». Journal of occupational and environmental hygiene 7, n° 12 (2010) : 712-25.	Mesures in-situ	Filtres + Tubes XAD-2 et XAS-2	Particules totales + Particules organiques totales + Partie gazeuse	

« ENROBES A L'ASPHAMIN - ENROBES TIEDES ». S. Bakowski, Eurovia.	Mesures sur une centrale d'enrobage		COV	Enrobés à chaud et tièdes avec ajout d'additif (Asphamin)
--	-------------------------------------	--	-----	---

Annexe 3. Tableau des références bibliographiques sur l’ozone, les COV, les techniques d’enrobés

Tableau 18 : Description des références bibliographiques sur les techniques d’enrobés, les émissions liées aux enrobés, leurs impacts sur la santé et la définition des composés organiques volatils (COV) et de l’ozone

Article/ Revue/ Rapport/Thèse	Techniques d’enrobés	Emissions	COV/Ozone
Abaissement de températures des mélanges bitumineux. Cerema, Etat de l’art et recommandations, Octobre 2015	×	×	-
Y. Brosseaud, LCPC. Ecologiques, sécuritaires, confortables, les enrobés de demain se feront autrement : Présentation des enrobés tièdes.	×	×	-
ADEME, SETEC Energie Environnement, BIO by Deloitte – Marion THILL, Arianna de TONI. Qualité de l’air et émissions polluantes des chantiers du BTP : Etat des connaissances et mesures d’atténuation dans le bâtiment et les travaux publics en faveur de la qualité de l’air - Rapport- 142 pages.	-	×	-
Bueche, N., A.-G. Dumont, et C. Angst, éd. Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques. Mandat de recherche VSS sur demande de l’OFROU - Rapport N° 1299, 2009.	×	×	-
Philippot, Glen. « Conséquences énergétiques et environnementales de l’utilisation des enrobés tièdes lors de la construction des routes ». Masters, École de technologie supérieure, 2010.	×	×	-
Bitume et développement durable. Bitume info numéro spécial 2, Octobre 2009	×	×	-
A. Jullien, Y. Baudru, P. Tamagny, F. Olard, D. Zavan, Routes 2011, N°350. Une comparaison des impacts environnementaux d’enrobés à chaud et tièdes	×	×	-

Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. « AVIS et rapport de l'Anses relatif à l'«Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs » », 3 septembre 2013.	X	X	-
« Surveillance des COV précurseurs de l'ozone dans la vallée de l'Arve (74) et à Oyonnax (01) Atmo Auvergne-Rhône-Alpes ». Air Rhône-Alpes, 2014.	-	-	X
La librairie ADEME. « Ozone: formation et taux dans l'air ». 2014.	-	-	X
« N°2 - Août 2018, Bulletin de l'OMM sur les gaz réactifs : faits saillants du Programme de la Veille de l'atmosphère globale E-Library ».	-	-	X
« N°1 - Mai 2017, Bulletin de l'OMM sur les gaz réactifs : faits saillants du Programme de la Veille de l'atmosphère globale E-Library ».	-	-	X

Annexe 4. Entretiens

Tableau 19 : Réponses des questionnaires sur les retours d'expérience des enrobés tièdes

Questions	DIR Massif Central	Métropole de Lyon
<p>Pourquoi vous intéressez-vous aux enrobés tièdes ? (contexte, problématique, innovation, ...)</p>	<p>Au niveau de l'État, une circulaire portant sur la décarbonation des travaux de chaussées est en cours de préparation.</p> <p>D'ores et déjà, les Directions Interdépartementales des Routes, en charge du réseau routier de l'État non concédé, ont été invitées, en 2023, à identifier des opérations décarbonées.</p> <p>La décarbonation porte essentiellement sur la reprise d'agrégats dans les enrobés, et sur les enrobés tièdes, au côté des techniques à froid ou du retraitement en place.</p> <p>Il est à noter que certaines DIR avaient déjà recours depuis plusieurs années à l'une ou l'autre de ces solutions décarbonées.</p> <p>Le projet de circulaire vise à généraliser ces pratiques dans le cadre de programmation plus ambitieuses en la matière.</p> <p>La DIR Massif Central va se mettre en situation de réaliser des enrobés tièdes dès 2024 puis d'augmenter le nombre et/ ou d'augmenter les opérations avec reprises d'agrégats à des taux plus élevés.</p>	<p>Réduction de l'empreinte écologique de nos chantiers routiers, plan climat, amélioration des conditions de travail sur chantier, réduction des nuisances chantier.</p>
<p>Quels sont vos retours d'expériences / actions déjà réalisées sur le sujet ? (chantiers, pourcentages avec enrobés tièdes, mesures, durabilité des enrobés, bibliographie, ...)</p>	<p>La DIR Massif Central n'a réalisé que peu d'enrobés tièdes.</p> <p>En fait, au début des années 2010, la DIR MC s'était lancée dans deux opérations aux objectifs environnementaux forts et qui combinaient la reprise d'agrégats à fort taux (30%) avec des enrobés tièdes en couche de roulement BBSG.</p> <p>De fait, vouloir cumuler les deux approches, s'est avéré néfaste en cours de chantier et à la réception.</p> <p>Les techniques ont pu évoluer depuis ces années-là, mais le fort taux d'agrégats dans des enrobés tièdes a abouti à une perte de malléabilité du matériau entraînant des défauts d'uni à la mise en œuvre, et de mauvaises compacités.</p> <p>Le cumul des deux ambitions est désormais fortement déconseillé par les assistants à Maîtrise d'Ouvrage (AMO) de la DIR MC, qu'il s'agisse du CEREMA ou de son AMO privé.</p> <p>Un enrobé tiède mis en œuvre en couche de liaison a semble-t-il donné satisfaction.</p> <p>Il est vrai qu'il faut des années avant de juger de la durabilité réelle d'un produit.</p>	<p>Premiers tests enrobés tièdes réalisés en 2007.</p> <p>Montée en puissance progressive dans nos marchés. Depuis 8 ans, le recours aux enrobés tièdes est la règle si les conditions de mise en œuvre sont compatibles (temp > 10°C, vent faible, distance centrale-chantier < 1h, mise en œuvre manuelle réduite)</p> <p>Récemment, face au constat que la production d'enrobés tièdes reste minoritaire, beaucoup d'entreprise ont engagé une démarche plus volontariste. Depuis 1 an, nous demandons un bilan contractuel aux entreprises sur le taux d'enrobés tièdes appliqués sur nos chantiers</p> <p>Participation au Projet MURE (multirecyclage et enrobés tièdes) entre 2014-2018 dont les conclusions sur la pérennité des enrobés tièdes et recyclés sont rassurantes.</p>

<p>Quels sont vos freins, difficultés, questionnements sur les enrobés tièdes ?</p>	<p>Les freins comme évoqués dans le retour d'expérience, sont culturels, les premières expériences ne s'étant pas très bien passées. Ceci dit, ces expériences n'étaient pas que dédiées aux enrobés tièdes, et la DIR MC s'apprête à relancer des chantiers de ce type (2024).</p> <p>A noter :</p> <ul style="list-style-type: none"> - quelques questionnements sur l'adaptation potentielle du suivi de chantier aux spécificités des enrobés tièdes. - la DIR va établir une carte des entreprises capables de répondre aux appels d'offre sur le tiède pour évaluer la concurrence selon les différents lots. <p>((De façon indirecte, parmi les freins : Un frein (pour partie lié aux enrobés tièdes) serait le recours à un éco-comparateur pris en compte pour l'attribution de l'opération. En effet :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l'éco-comparateur reste une « boîte noire » pour le maître d'ouvrage - Sans éco-comparateur, le suivi d'enrobés tièdes sera fait de façon relativement simple sur le chantier. En présence d'éco-comparateur, c'est tout un jeu de données qui devront être vérifiées (température en centrale, qualité de la flotte des camions, et autres engins de chantiers..., provenance des matériaux...) - Enfin par expérience les chantiers se déroulent rarement comme prévu. C'est un problème gérable de donner une pénalité à une entreprise qui ne respecte pas les clauses d'un marché, mais c'est un tout autre problème quand l'entreprise s'est vu attribuer le chantier au regard de clauses qu'elle ne respecte pas. <p>La DIR MC souhaite prescrire directement des enrobés tièdes (sans passer par des variantes, par trop aléatoires), et sans recruter grâce à un éco-comparateur, outil dont elle réserverait l'usage à une aide préalable au choix de la technique.))</p>	<p>Massifier la fabrication d'enrobés tièdes nécessite un engagement conjoint Maitrises d'ouvrage/entreprises. Une des difficultés est qu'une centrale ne peut pas produire en alternance des formules à chaud et tièdes dans la même journée, il faut donc que les principes de fabrication à température abaissée soient partagés par tous lorsque les conditions extérieures sont réunies.</p> <p><i>(Notes des auteurs : pour recontextualiser, les usines préfèrent ne pas alterner à court terme entre chaud & tiède pour une question de sobriété énergétique)</i></p>
<p>Quels sont vos leviers, opportunités sur les enrobés tièdes ?</p>	<p>La DIR MC est libre (et fera le choix) de prescrire sur ses chantiers des reprises d'agrégats ou des enrobés tièdes.</p> <p>S'agissant des enrobés tièdes, 2024 sera une année modeste pour approfondir notre expérience, puis le déploiement sera significatif les années ultérieures</p>	<p>Clauses contractuelles, plan climat, augmentation du coût des énergies, santé des travailleurs</p>
<p>Avez-vous des questions ou attentes particulières sur les enrobés tièdes ?</p>	<p>Nous avons repéré les questions sur les éventuelles spécificités sur le suivi de chantier, évoqué en 4</p> <p>La sensibilisation de la communauté de travail évoquée au point 3</p>	

Annexe 6. Schéma de prélèvement pour la campagne de mesure du chantier test

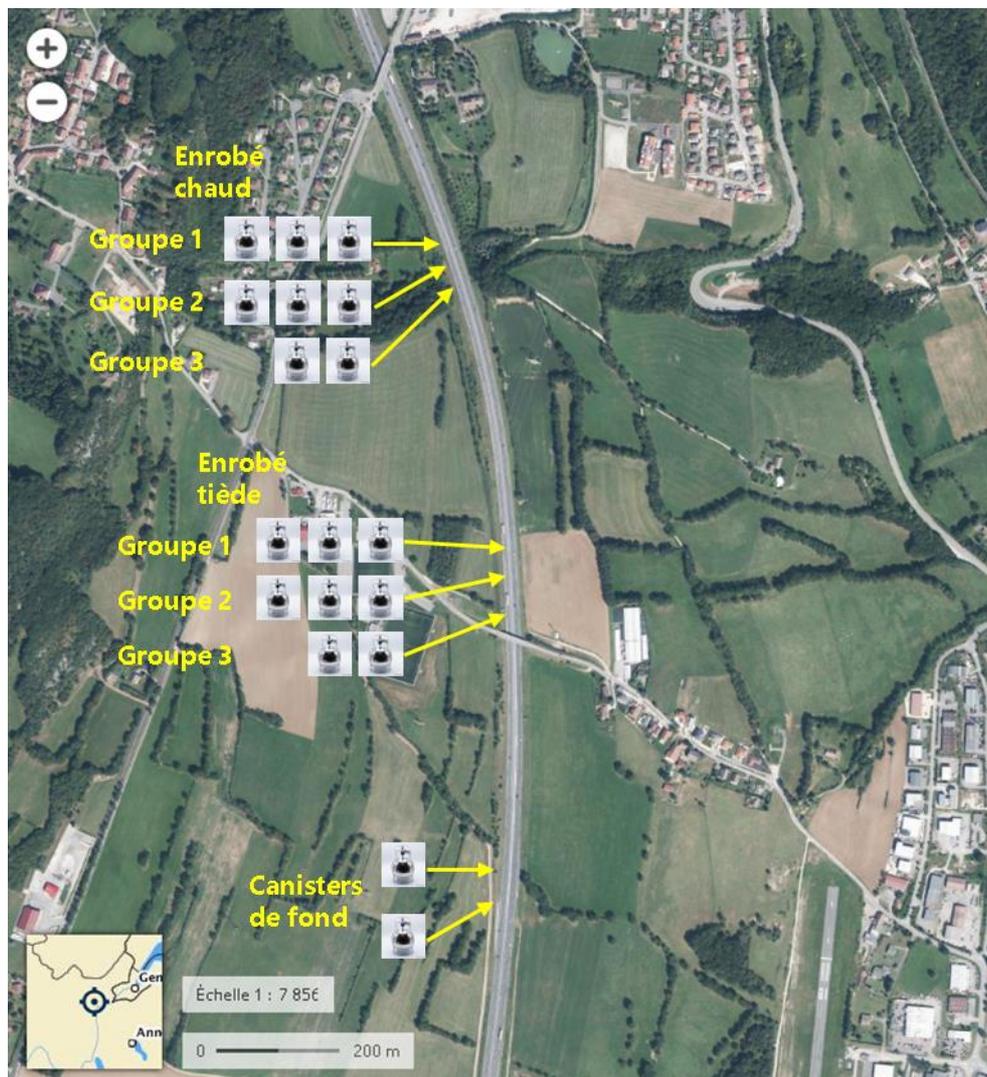


Figure 34 : Plan de prélèvement des 20 canisters pour la campagne de mesure sur le chantier test en juillet 2023

Annexe 7. Fiche récapitulative d'une journée de mesure

Date de la journée de mesure :
Durée des mesures : Journée / Demi-journée
Nombre de prélèvements : Nombre de prélèvements de fond : Nombre de prélèvements sur les enrobés :
Adresse du chantier : Coordonnées GPS : Indications sur les alentours du chantier (grands axes de circulations, industriels, ...) :
Type de chantier : Manuel / Mécanique Ouvert / Semi-fermé Autre :
Nombres et types d'engins (finisseurs avec ou sans aspiration, compacteurs, camions bennes, autres, ...) :
Type de bitume (modifié ou non) : Fournisseur : Lot : BL d'approvisionnement en bitume :

Composition de la formule d'enrobés :

Taux de recyclés :

Quantités et épaisseurs d'enrobés appliquées :

Type d'enrobé : Chaud Tiède

Si enrobés tièdes, types d'enrobés (mousse de bitume, additif, autre) :

Type de couche d'accrochage, méthode d'application, rupteur et quantité au m² :

Type de produit débitumant et leurs quantités :

Plan de mesurage de température sur l'enrobé mis en œuvre :

Observations complémentaires pouvant avoir un impact sur les mesures :

Données météorologiques sur le site (température, humidité, vitesse et direction du vent, ensoleillé, nuageux, éclaircie, ...) :

Canister N°...

Type de prélèvement : Fond / Enrobés

Heure de début de prélèvement :

Heure de fin de prélèvement :

Pression à la mise en place :

Pression finale :

Température de l'enrobé :

Vis du finisseur :

Début du prélèvement du canister :

Fin de prélèvement du canister :

Distance de l'enrobé (approximativement) :

Type de travaux (mise en œuvre à la main ou au finisseur, compactage, autres, ...) :

Annexe 8. Horaires de prélèvement des canisters pour chaque campagne

Tableau 20 : Horaires de prélèvement des canisters

Campagne	Fond	Enrobé chaud			Fond	Enrobé tiède		
		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3		Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
Chantier test Bellegarde	9h24 – 10h02 9h26 – 10h03	9h08 – 9h44	9h22 – 9h53	9h42 – 10h13	12h48 – 13h18 12h50 – 13h20	12h38 – 13h08	13h01 – 13h31	13h18 – 13h48
Chantier 1 Feissons-sur-Isère	8h27 – 8h28 8h29 – 8h30	8h39 – 9h09	8h52 – 9h22	9h12 – 9h42	10h17 – 10h46 10h18 – 10h47	11h12 – 11h42	11h30 – 12h00	11h51 – 12h21
Chantier 2 Les Déserts	12h05 – 12h35 12h08 – 12h39	12h22 – 12h52	12h41 – 13h11	13h09 – 13h39	9h55 – 10h25 10h10 – 10h35	10h41 – 11h11	10h55 – 11h24	11h25 – 11h55
Chantier 3 Le Châtelard	12h42 – 13h12 12h43 – 13h12	13h34 – 14h04	13h46 – 14h15	14h21 – 14h51	9h35 – 10h03 9h36 – 10h04	9h57 – 10h27	10h16 – 10h45	10h32 – 11h02

Annexe 9. Tableau des températures des enrobés relevées lors de la campagne sur le chantier test

MESURE DE TEMPERATURE ENROBE Pendant la campagne test in-situ des COV émis par la mise en œuvre des enrobés Chantier Test

Date : 26/07/2023

Préleveur :

Type d'appareil utilisé : Ecoliart - n°60603 -

Phase de prélèvement	Heure de prise de Température	Point de mesures	°C	Numéro Carister
Chaud n°1 Pk 104.050	0h18	1°C canister	145	
	0h23	1°C canister	145	
	0h23	1°C canister	145	
	0h40	1°C vis de répartition n°1	156	
	0h44	1°C vis de répartition n°2	155	
	0h30	1°C fin de cycle au niveau des canisters	110	
	0h35	1°C fin de cycle au niveau des canisters	109	
Chaud n°2 Pk 10.050	0h27	1°C canister	145	
	0h28	1°C canister	145	
	0h29	1°C canister	145	
	0h25	1°C vis de répartition n°1	156	
	0h26	1°C vis de répartition n°2	155	
	0h52	1°C fin de cycle au niveau des canisters	112	
	0h52	1°C fin de cycle au niveau des canisters	109	
Chaud n°3 niveau Aire Seminé	0h44	1°C canister	141	
	0h45	1°C canister	140	
	0h45	1°C vis de répartition n°1	153	
	0h45	1°C vis de répartition n°2	154	
	10h03	1°C fin de cycle au niveau des canisters	113	
	10h03	1°C fin de cycle au niveau des canisters	112	
3ème camion Tiède n°1	12h43	1°C canister	124	
	12h43	1°C canister	123	
	12h44	1°C canister	124	
	12h39	1°C vis de répartition n°1	138	
	12h39	1°C vis de répartition n°2	135	
	13h07	1°C fin de cycle au niveau des canisters	94	
	13h07	1°C fin de cycle au niveau des canisters	95	
Tiède n°2	13h05	1°C canister	122	
	13h07	1°C canister	123	
	13h05	1°C canister	122	
	13h01	1°C vis de répartition n°1	138	
	13h01	1°C vis de répartition n°2	130	
	13h31	1°C fin de cycle au niveau des canisters	104	
13h31	1°C fin de cycle au niveau des canisters	103		
Tiède n°3	13h20	1°C canister	122	
	13h22	1°C canister	122	
	13h18	1°C vis de répartition n°1	136	
	13h18	1°C vis de répartition n°2	138	
	13h38	1°C fin de cycle au niveau des canisters	104	
	13h40	1°C fin de cycle au niveau des canisters	105	
Commentaires :				
Plus de soleil sur le cycle Tiède. Rythme 3,5 m/min - Râtelier oscillant assez vite des canisters positionnés à l'intérieur 2 et 2,5 m de l'application réelle. T°C au sol sans enrobe de 26°C.				

Figure 35 : Tableau des températures des enrobés relevées lors de la campagne sur le chantier test

Annexe 10. Graphique en boîte à moustaches (box-plot)

Un graphique en boîte à moustaches ou box-plot est une représentation graphique de la distribution des données à l'aide de quartiles²⁰.

Ce graphique comprend plusieurs éléments dont la boîte qui comprend 50% des données autour de la médiane, qui est représentée par une ligne dans la boîte. L'extrémité inférieure de la boîte correspond au premier quartile (Q1) et l'extrémité supérieure au 3^{ème} quartile (Q3). 25% des données restantes se trouvent en dessous de Q1 et les autres 25% au-dessus de Q3. Les moustaches en forme de T correspondent soit à la valeur maximale, soit à la valeur minimale des données, mais leur taille est au maximum de 1,5 fois l'écart interquartile. Par conséquent, il peut y avoir des valeurs atypiques ou atypiques qui se retrouvent en dehors des moustaches et qui sont représentées par des points. La moustache supérieure correspond donc soit à la valeur maximale, soit à 1,5 fois l'écart interquartile. De même pour la moustache inférieure, qui correspond soit à la valeur minimale, soit à 1,5 fois l'écart interquartile.

La moyenne peut également être représentée sur les box-plots. Dans la Figure 36, elle est représentée par une ligne en pointillée mais dans les graphiques de ce rapport elle est représentée par une croix.

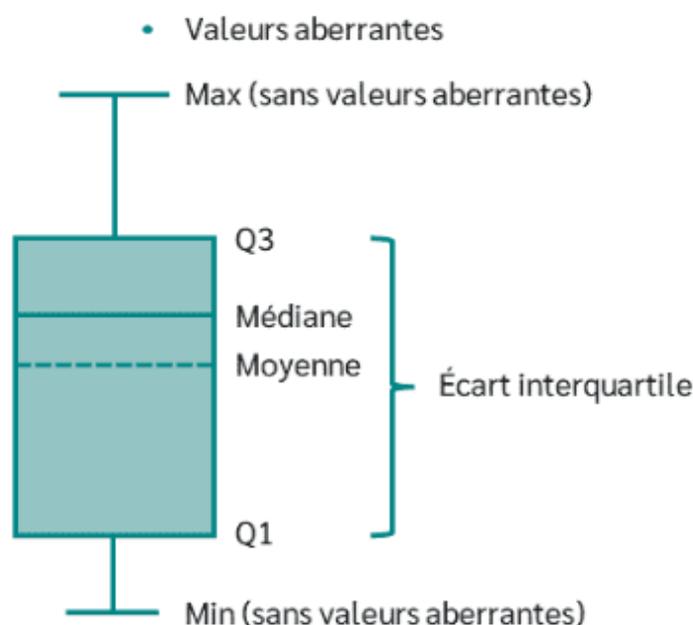


Figure 36 : Exemple de graphique en boîte à moustaches ou box-plot (Source : datatab.fr/tutorial/box-plot)

Lorsque la médiane est au milieu de la boîte et que les moustaches sont à peu près les mêmes des deux côtés de la boîte, alors la distribution est symétrique.

Lorsque la médiane est plus proche du bas de la boîte et si la moustache est plus courte à l'extrémité inférieure de la boîte, alors la distribution est positivement asymétrique (asymétrique à droite).

Lorsque la médiane est plus proche du haut de la boîte et si la moustache est plus courte à l'extrémité supérieure de la boîte, alors la distribution est négativement asymétrique (asymétrique à gauche)²¹.

²⁰ <https://chartexpo.com/blog/box-and-whisker-plot#tb1>

²¹ <https://www.simplypsychology.org/boxplots.html>

Annexe 11. Résultats des mesures de fond pour les différents chantiers

Chantier test – Bellegarde-sur-Valserine – 25 juillet 2023

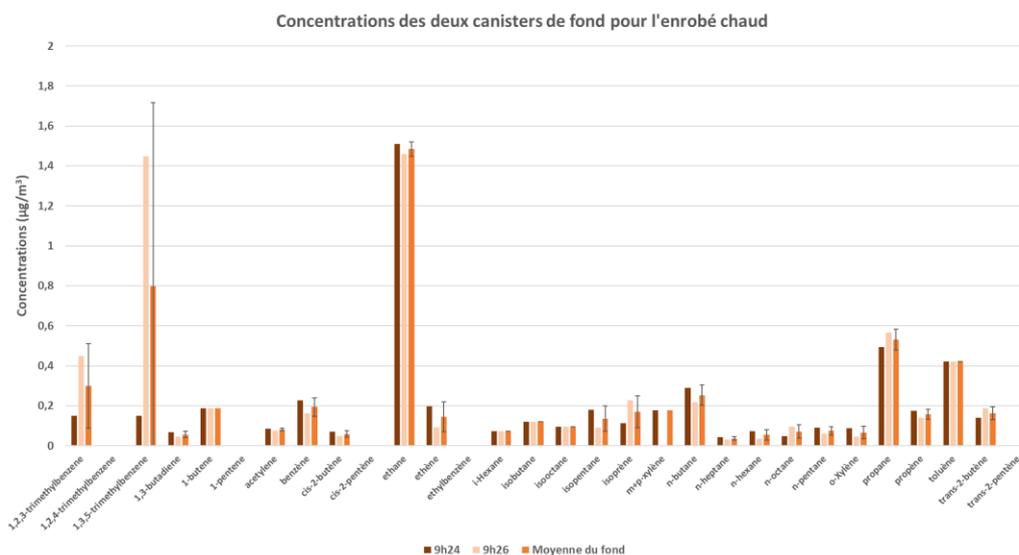


Figure 37 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier test sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud

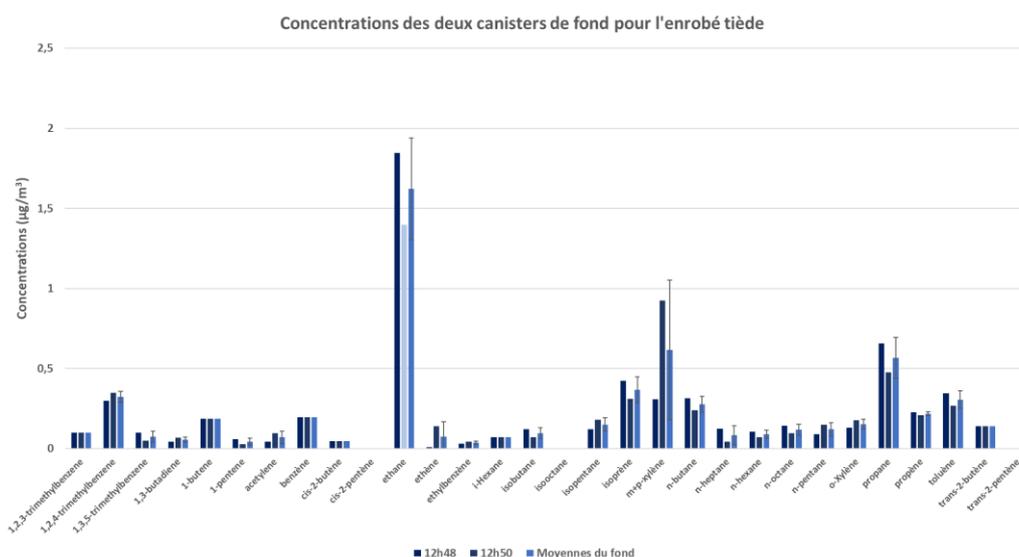


Figure 38 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier test sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède

Chantier expérimental 1 – Feissons-sur-Isère – 7 juin 2024

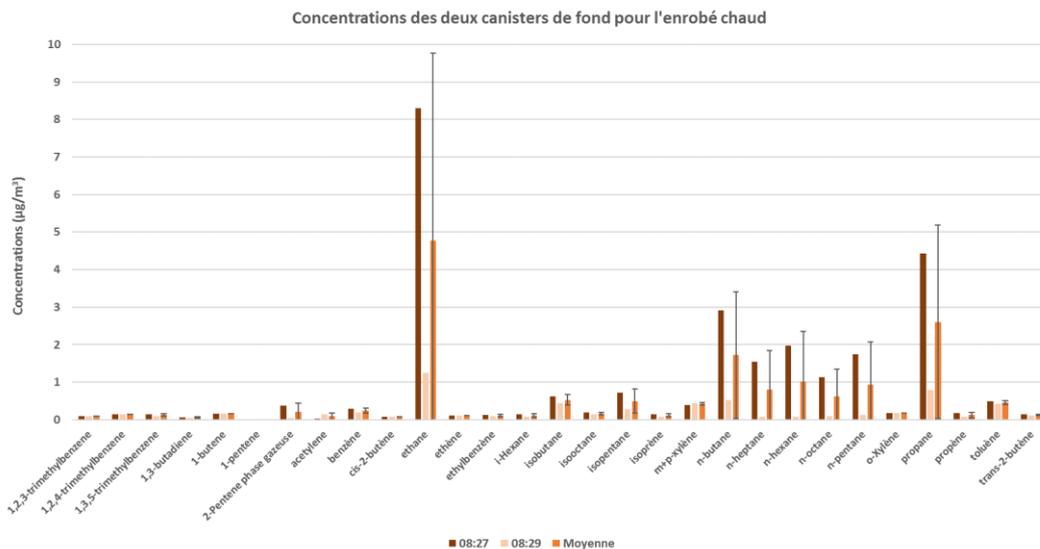


Figure 39 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 1 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud

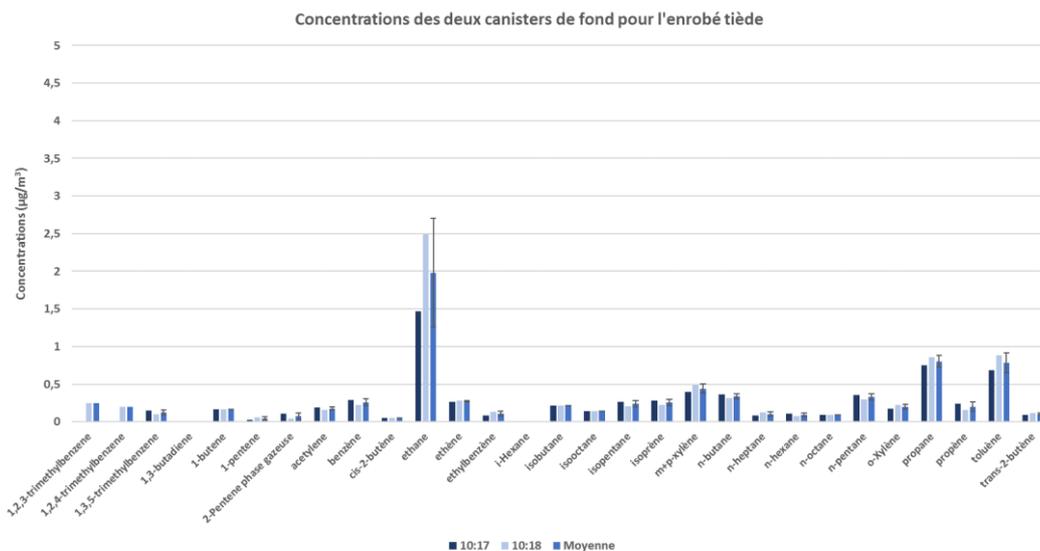


Figure 40 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 1 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède

Suite à une mauvaise manipulation lors des prélèvements des deux canisters de fond sur l'enrobé chaud, le choix a été fait de ne pas prendre en compte ces données (Figure 39) et d'utiliser uniquement les données de fond prélevées pour l'enrobé tiède.

Chantier expérimental 2 – Les Déserts – 4 juillet 2024

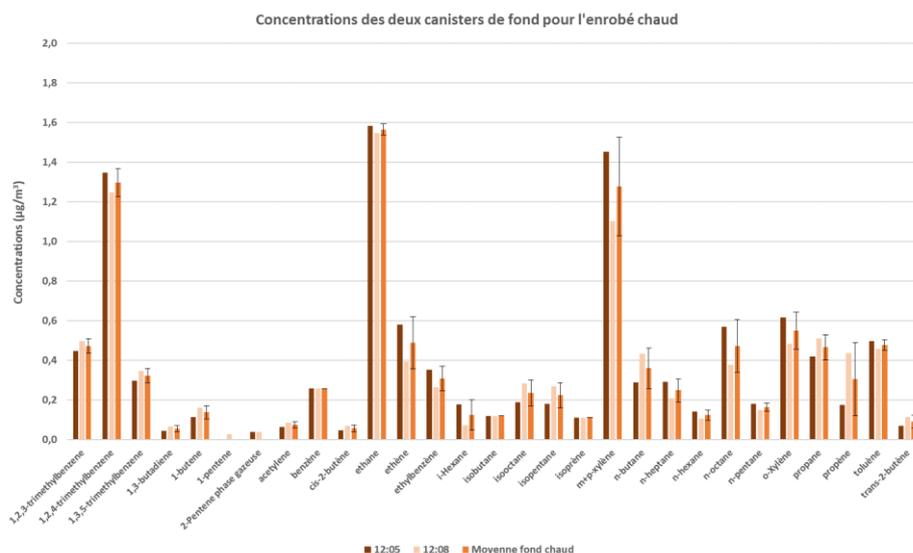


Figure 41 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 2 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud

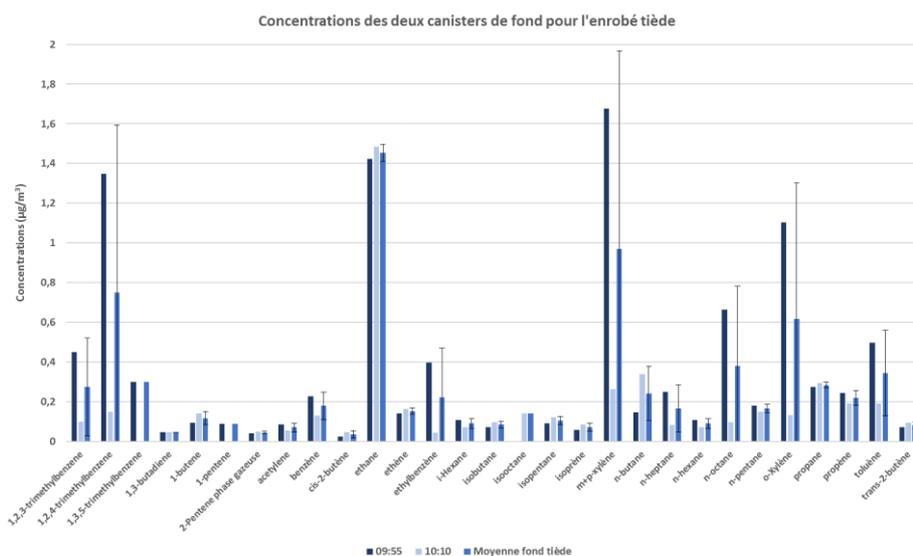


Figure 42 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 2 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède

Chantier expérimental 3 – Le Châtelard – 15 juillet 2024

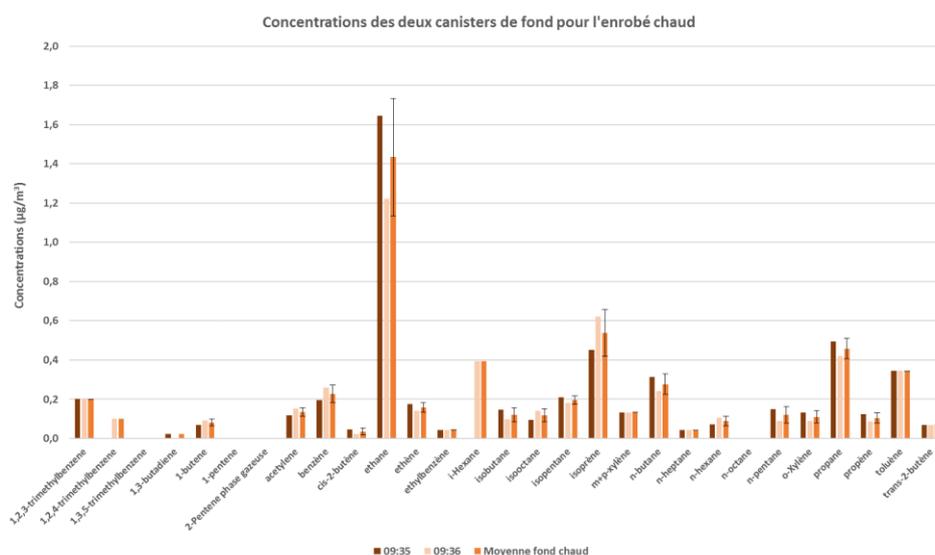


Figure 43 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 3 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé chaud

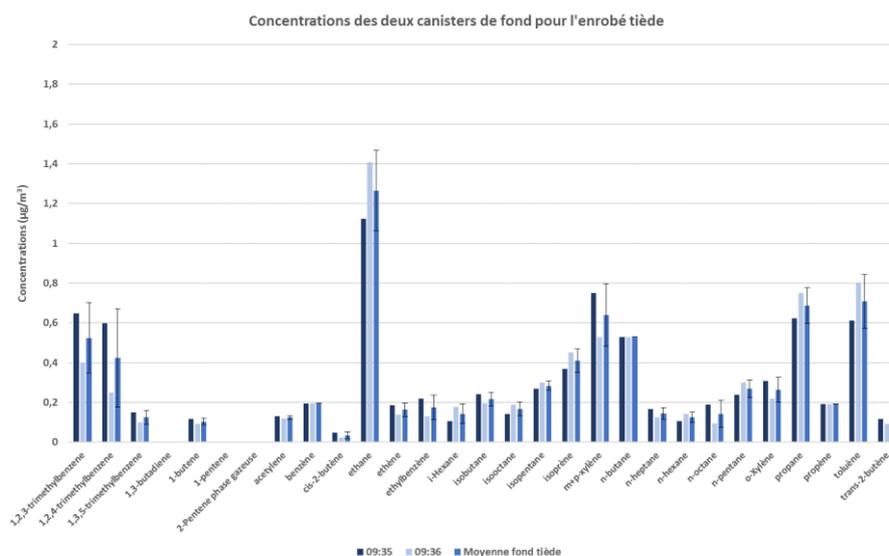


Figure 44 : Concentrations des composés prélevés sur le chantier expérimental 3 sur les deux canisters de fond et leur moyenne pour l'enrobé tiède

Annexe 12. Courbes des concentrations des composés organiques volatils totaux (COVt) selon les paramètres de température et de teneur en liant pour les différents chantiers

Chantier expérimental 1 – Feissons-sur-Isère – 7 juin 2024

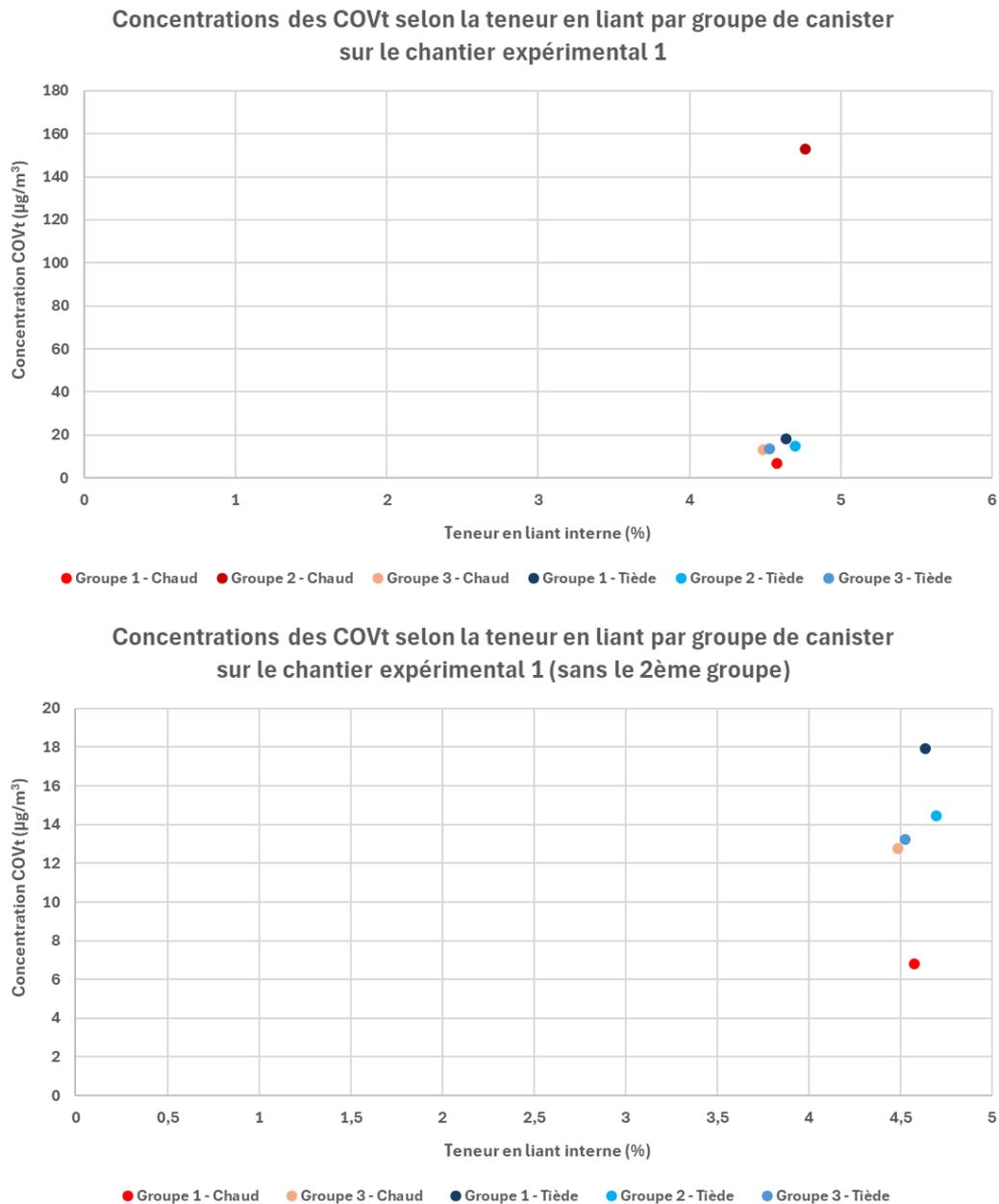
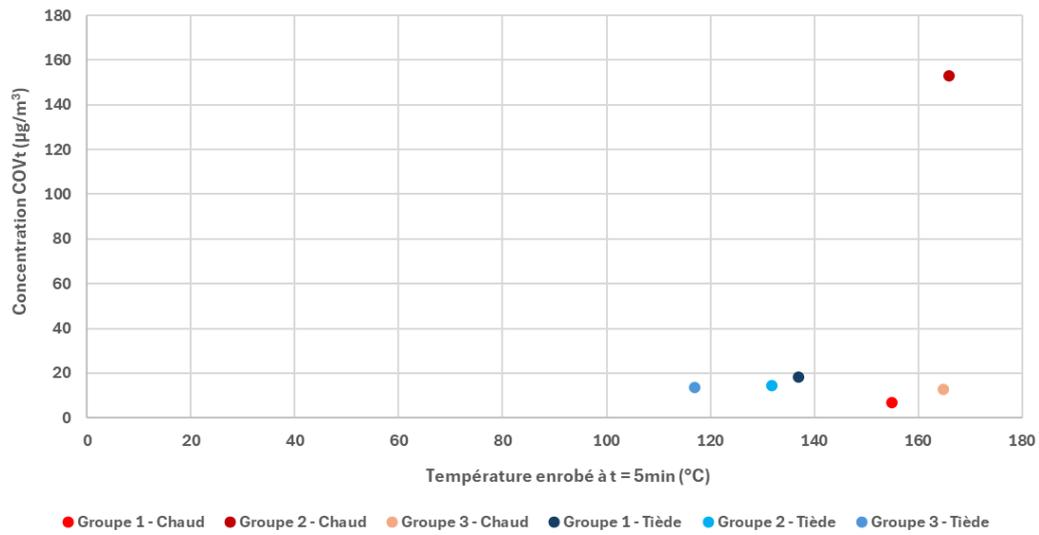


Figure 45 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 1 selon la teneur en liant

Concentrations des COVt selon la température des enrobés par groupe de canister sur le chantier expérimental 1



Concentrations des COVt selon la température des enrobés par groupe de canister sur le chantier expérimental 1 (sans le 2ème groupe)

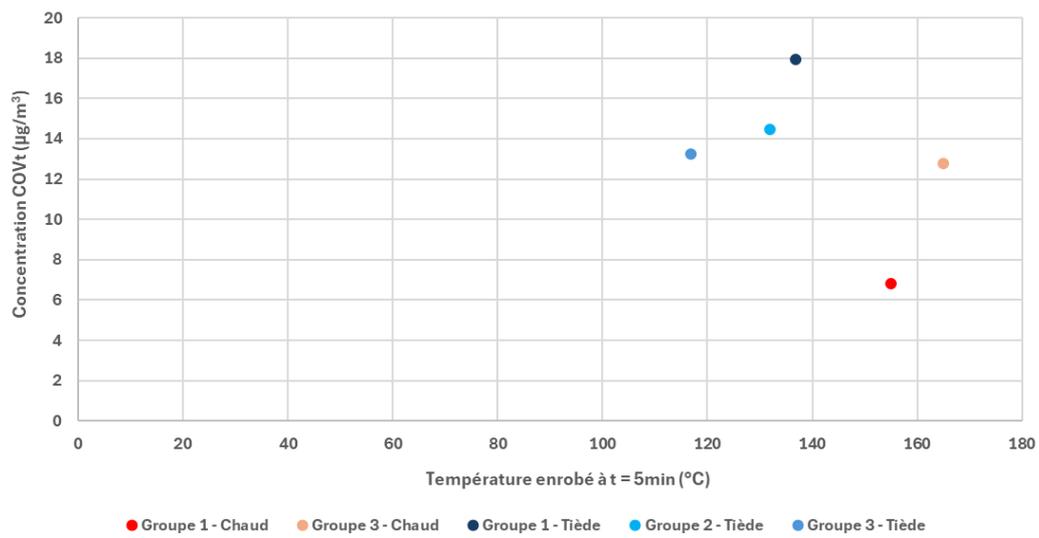


Figure 46 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 1 selon la température de mise en œuvre

Chantier expérimental 2 – Les Déserts – 4 juillet 2024

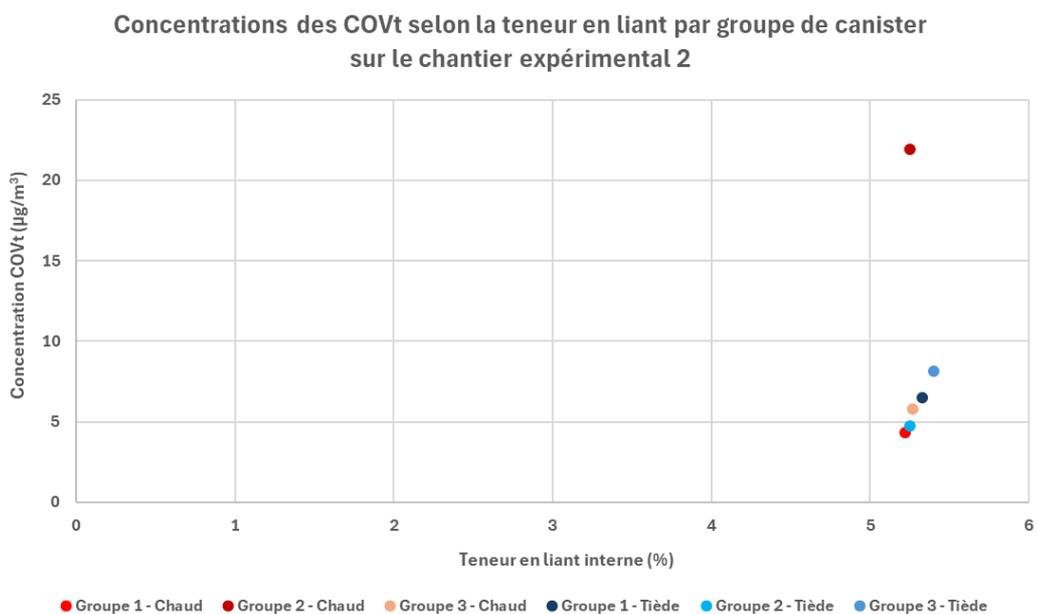


Figure 47 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 2 selon la teneur en liant

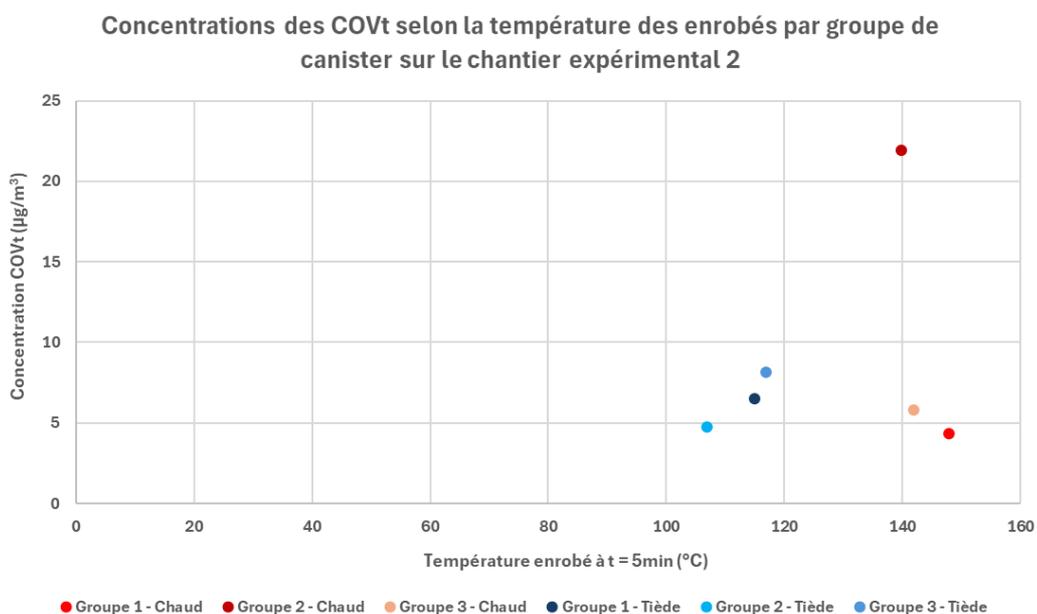


Figure 48 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 2 selon la température de mise en œuvre

Chantier expérimental 3 – Le Châtelard – 15 juillet 2024

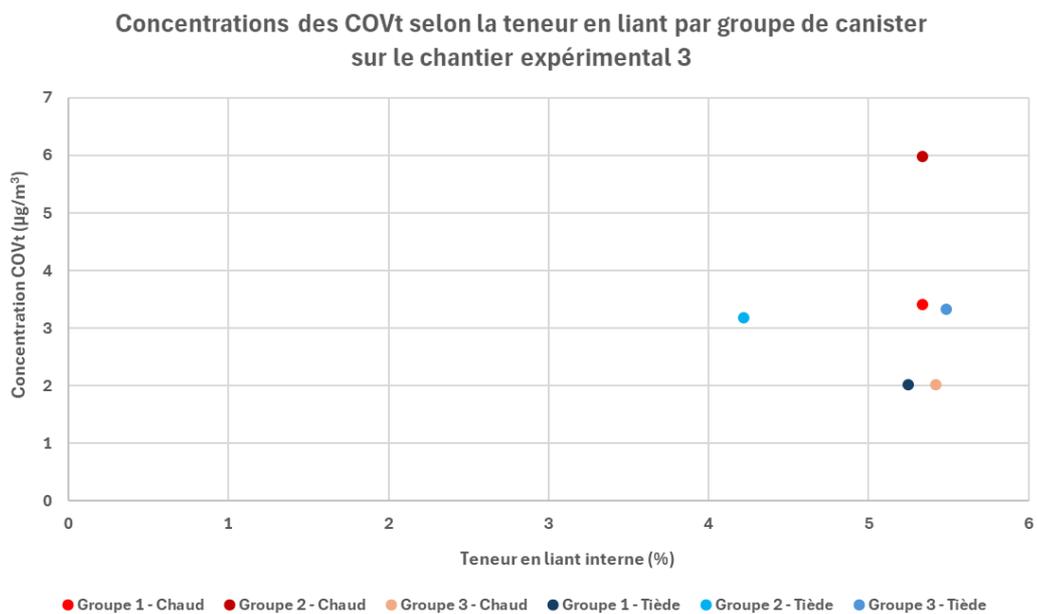


Figure 49 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 3 selon la teneur en liant

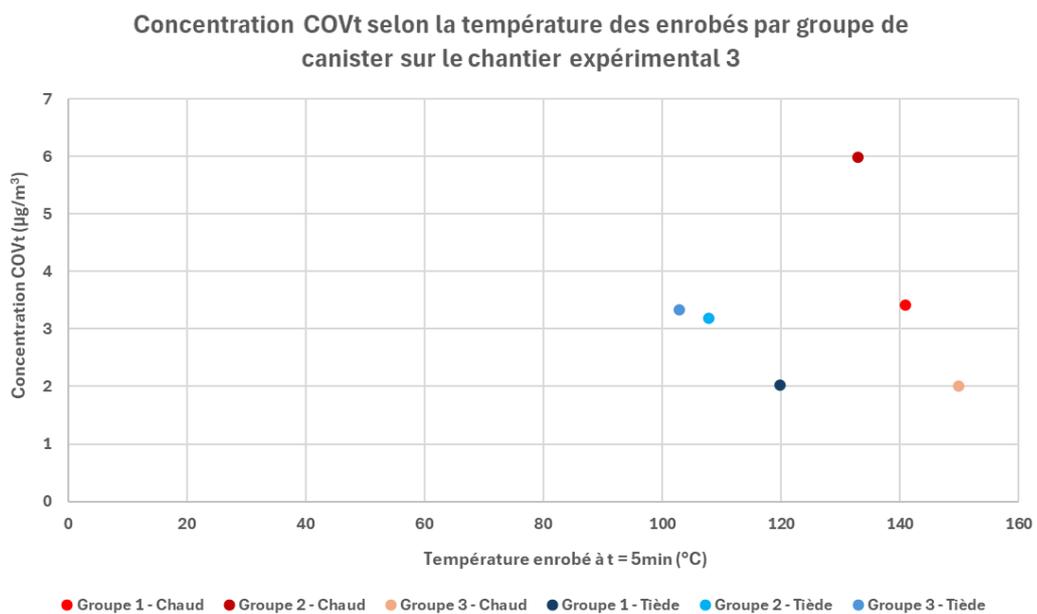


Figure 50 : Concentrations des COVt prélevés sur le chantier expérimental 3 selon la température de mise en œuvre



Bibliographie

Air Rhône-Alpes, « Surveillance des COV précurseurs de l'ozone dans la vallée de l'Arve et à Oyonnax », 2014.

Autelitano, Federico, Federica Bianchi, et Felice Giuliani. « Airborne Emissions of Asphalt/Wax Blends for Warm Mix Asphalt Production ». *Journal of Cleaner Production* 164 (octobre 2017): 749-56.

Boczka G., Przyjazny A., Kaminski M. « Characteristics of volatile organic compounds emission profiles from hot road bitumens ». *Chemosphere*, n°107 (2014) : 23–30.

Bolliet C., A. J. Kriech, C. Juery, M. Vaissiere, M. A. Brinton, et L. V. Osborn. « Effect of temperature and process on quantity and composition of laboratory-generated bitumen emissions ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 12, n° 7 (2015) : 438-49.

Borinelli J.-B., J. Blom, M. Portillo-Estrada, P. Kara De Maeijer, W. Van den Bergh, et C. Vuye. « VOC Emission analysis of bitumen using proton-transfer reaction time-of-flight mass spectrometry ». *Materials* 13, n° 17 (2020) : 3659.

Brandt, H. C. A., et P. C. De Groot. « A laboratory rig for studying aspects of worker exposure to bitumen fumes ». *American Industrial Hygiene Association Journal* 60, n° 2 (1999) : 182-90.

Breuer D., J.-U. Hahn, D. Höber, C. Emmel, U. Musanke, R. Rühl, A. Spickenheuer, M. Raulf-Heimsoth, R. Bramer, et A. Seidel. « Air sampling and determination of vapours and aerosols of bitumen and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Human Bitumen Study ». *Archives of toxicology* 85 (2011) : 11-20.

Bueche, N., A.-G. Dumont, et C. Angst, éd. *Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques. Mandat de recherche VSS sur demande de l'OFROU - Rapport N° 1299, 2009.*

Bueche, Nicolas. « Evaluation des performances et des impacts des enrobés bitumineux tièdes ». 2011.

Calzavara T. S., C. M. Carter, et C. Axten. « Air sampling methodology for asphalt fume in asphalt production and asphalt roofing manufacturing facilities: Total particulate sampler versus inhalable particulate sampler ». *Applied occupational and environmental hygiene* 18, n° 5 (2003) : 358-67.

Cavallari, Jennifer, Leonard Zwack, Clifford Lange, Robert Herrick, et Michael McClean. « Temperature-Dependent Emission Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Paving and Built-Up Roofing Asphalts ». *The Annals of Occupational Hygiene*, 20 janvier 2012.

Chang, Xiwen, Yue Xiao, Yongshuang Long, Feng Wang, et Zhanping You. « Temperature Dependency of VOCs Release Characteristics of Asphalt Materials under Varying Test Conditions ». *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* 9, no 2 (avril 2022): 280-92.

Chen, Shuoqiu, Jiaqing Wang, Qiang Li, Wenxuan Zhang, et Chaojie Yan. « The Investigation of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emissions in Environmentally Friendly Modified Asphalt ». *Polymers* 14, no 17 (24 août 2022): 3459.

Chong D., Y. Wang, H. Guo, et Y. Lu. « Volatile organic compounds generated in asphalt pavement construction and their health effects on workers ». *Journal of Construction Engineering and Management* 140, n° 2 (2014) : 04013051.

Croteau J-M., Tessier B. « Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective ». *Annual Conference of the Transportation Association of Canada* (2008).

Cui P., G. Schito, et Q. Cui. « VOC emissions from asphalt pavement and health risks to construction workers ». *Journal of Cleaner Production* 244 (2020) : 118757.

Davidson J., Pedlow R. « Reducing Paving Emissions Using Warm Mix Technology ». *Canadian Technical Asphalt Association* 2007.

Diab A., C. Sangiorgi, R. Ghabchi, M. Zaman, et A. M. Wahaballa. « Warm mix asphalt (WMA) technologies : Benefits and drawbacks—A literature review ». *Functional Pavement Design*, 2016, 1145-54.

Deller, Z., S. Maniam, et F. Giustozzi. « Sample Preparation and Analytical Methods for Identifying Organic Compounds in Bituminous Emissions ». *Molecules* 27, n° 16 (2022) : 5068.

Deygout F., et P. Le Coutaller. « Field sampling investigations within the road paving industry ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 7, n° 2 (2009) : 103-8.

Dumont, André-Gilles. « Projet initial – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques », 2009.

EPA. 1999a. Compendium method TO-15: Determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially prepared canisters and analysed by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS). In *Compendium of methods 533 for the determination of toxic organic compounds in ambient air*, 2nd ed., 534 EPA/625/R-96/010b.

Espinoza, J., Medina, C., Calabi-Floody, A., Sánchez-Alonso, E., Valdés, G., Quiroz, A. « Evaluation of Reductions in Fume Emissions (VOCs and SVOCs) from Warm Mix Asphalt Incorporating Natural Zeolite and Reclaimed Asphalt Pavement for Sustainable Pavements ». *Sustainability* n°12 (2020).

Farshidi F., D. Jones, A. Kumar, P.-G. Green, et J.T. Harvey. « Direct measurements of volatile and semivolatile organic compounds from hot-and warm-mix asphalt ». *Transportation research record* 2207, n° 1 (2011) : 1-10.

Farshidi F., D. Jones, et J.T. Harvey. « Warm-mix asphalt study: Evaluation of rubberized hot-and warm-mix asphalt with respect to emissions », 2013.

Guo H., T. Wang, I. J. Simpson, D. R. Blake, X. M. Yu, Y. H. Kwok, et Y. S. Li. « Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural site in eastern China ». *Atmospheric environment* 38, n° 27 (2004) : 4551-60.

Hugener M., Zeyer K., Mohn J. « Reduced emissions of warm mix asphalt during construction ». *Road Materials and Pavement Design*, Volume 20 (2019).

INERIS. Prélèvement et analyse de Composés Organiques Volatils (COV) dans l'air. (2011).

Jiang, Qi, Na Li, Fei Yang, Yanfei Ren, Shaopeng Wu, Fusong Wang, et Jun Xie. « Rheology and Volatile Organic Compounds Characteristics of Warm-Mix Flame Retardant Asphalt ». *Construction and Building Materials* 298 (septembre 2021): 123691.

Jullien A., P. M., G. Quaranta, et D. Gaillard. « Air Emissions from Pavement Layers Composed of Varying Rates of Reclaimed Asphalt ». *Resources, Conservation and Recycling* 47, n° 4 (2006) : 356-74.

Jullien A., C. Ropert, Y. Baudru, N. Grignard, V. Cerezo, P. Braja, J.M. Mourier, et D. Camisuli. « Eco-évaluation d'enrobés chauds et tièdes, neufs et recyclés à 30% : étude de la RD 93N ». *Revue Générale des routes et de l'aménagement*, n° 910 (2013).

Khare P., J. Machesky, R. Soto, M. He, A.-A. Presto, et D.R. Gentner. « Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors ». *Science advances* 6, n° 36 (2020) : eabb9785.

Kriech, A. J., C. Emmel, L. V. Osborn, D. Breuer, A. P. Redman, D. Hoerber, F. Bochmann, et R. Ruehl. « Side-by-side comparison of field monitoring methods for hot bitumen emission exposures: the German IFA Method 6305, US NIOSH Method 5042, and the Total Organic Matter Method ». *Journal of occupational and environmental hygiene* 7, n° 12 (2010) : 712-25.

Lasne, J., A. Lostier, M. N. Romanias, S. Vassaux, D. Lesueur, V. Gaudion, M. Jamar, R. G. Derwent, S. Dusanter, et T. Salameh. « VOC Emissions by Fresh and Old Asphalt Pavements at Service Temperatures: Impacts on Urban Air Quality ». *Environmental Science: Atmospheres* 3, no 11 (2023): 1601-19.

Li, Na, Qi Jiang, Fusong Wang, Peide Cui, Jun Xie, Jiashuo Li, Shaopeng Wu, et Diego Maria Barbieri. « Comparative Assessment of Asphalt Volatile Organic Compounds Emission from Field to Laboratory ». *Journal of Cleaner Production* 278 (janvier 2021): 123479.

Lin S., W. Hung, et Z. Leng. « Air pollutant emissions and acoustic performance of hot mix asphalts ». *Construction and Building Materials* 129 (2016) : 1-10.

Oliveira, Joel, Hugo Silva, Paulo Fonseca, Yongjoo Kim, Sungdo Hwang, et Joonbum Pyun. « Laboratory and Field Study of a WMA Mixture Produced with a New Temperature Reduction Additive », 2011.

Olsen R., Graff P., Line Daae H., Bryngelsson I.-L., Molander P., Ellingsen D. G. « Occupational Exposure during Asphalt Paving — Comparison of Hot and Warm Mix Asphalt in Field Experiments ». *Annals of Work Exposures and Health*, Vol. 65 (2021) : 446-457.

Philippot, Glen. « Conséquences énergétiques et environnementales de l'utilisation des enrobés tièdes lors de la construction des routes ». PhD Thesis, École de technologie supérieure, 2010.

Plass-Dülmer, C., N. Schmidbauer, J. Slemr, F. Slemr, and H. D'Souza (2006), European hydrocarbon intercomparison experiment AMOHA part 4: Canister sampling of ambient air, *J. Geophys. Res.*, 111, D04306, doi: 10.1029/2005JD006351.

experiment AMOHA part 4: Canister sampling of ambient air, *J. Geophys. Res.*, 111, D04306, doi: 10.1029/2005JD006351.

Prowell B., B. Frank, L. Osborne, T. Kriech, et R. West. « Effects of WMA on plant energy and emissions and worker exposures to respirable fumes ». National Cooperative Highway Research Program, Washington, DC, USA, NCHRP, 2014.

Raulf-Heimsoth M., B. Marczyński, A. Spickenheuer, B. Pesch, P. Welge, R. Rühl, R. Bramer, B. Kendzia, E. Heinze, et J. Angerer. « Bitumen workers handling mastic versus rolled asphalt in a tunnel : assessment of exposure and biomarkers of irritation and genotoxicity ». Archives of toxicology 85 (2011) : 81-87.

Rubio M., Moreno F. « Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt ». Journal of Cleaner Production 41, 2012

Sargand S., M. D. Nazzal, A. Al-Rawashdeh, et D. Powers. « Field evaluation of warm-mix asphalt technologies ». Journal of Materials in Civil Engineering 24, n° 11 (2012) : 1343-49.

Sutter B., E. Pelletier, M. Blaskowitz, C. Ravera, C. Stolze, C. Reim, E. Langlois, et D. Breuer. « Sampling and analysis of bitumen fumes : comparison of German and French methods to determine a conversion formula ». Annals of Work Exposures and Health 62, n° 6 (2018) : 721-32.

Tang, Ning, Kai-kai Yang, Yazan Alrefaei, Jian-Guo Dai, Li-Mei Wu, et Qing Wang. « Reduce VOCs and PM Emissions of Warm-Mix Asphalt Using Geopolymer Additives ». Construction and Building Materials 244 (mai 2020): 118338.

Tutu, Kenneth A., et Yaw A. Tuffour. « Warm-Mix Asphalt and Pavement Sustainability: A Review ». Open Journal of Civil Engineering 06, no 02 (2016): 84-93.

Vaitkus A., D. Čygas, A. Laurinavičius, et Z. Perveneckas. « Analysis and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania ». The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 4, n° 2 (2009) : 80-86.

Wang, Fusong, Na Li, Inge Hoff, Shaopeng Wu, Jiashuo Li, Diego Maria Barbieri, et Lei Zhang. « Characteristics of VOCs generated during production and construction of an asphalt pavement ». Transportation Research Part D: Transport and Environment 87 (1 octobre 2020): 102517.

Wang, Meng, Ping Li, Tengfei Nian, et Yu Mao. « An Overview of Studies on the Hazards, Component Analysis and Suppression of Fumes in Asphalt and Asphalt Mixtures ». Construction and Building Materials 289 (juin 2021): 123185.

Wang, Menghao, Chaohui Wang, Shuai Huang, et Huazhi Yuan. « Study on asphalt volatile organic compounds emission reduction: A state-of-the-art review ». Journal of Cleaner Production 318 (2021): 128596.

Xiu M., Wang X., Morawska L. « Emissions of particulate matters, volatile organic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons from warm and hot asphalt mixes ». Journal of Cleaner Production – Volume 275 (2020).

Yang, X., Z. You, D. Perram, D. Hand, Z. Ahmed, W. Wei, et S. Luo. « Emission analysis of recycled tire rubber modified asphalt in hot and warm mix conditions ». Journal of hazardous materials 365 (2019) : 942-51.

Zanetti M.C., S. Fiore, B. Ruffino, E. Santagata, et M. Lanotte. « Assessment of gaseous emissions produced on site by bituminous mixtures containing crumb rubber ». *Construction and Building Materials* 67 (2014) : 291-96.

Zanetti, M., S. Fiore, B. Ruffino, E. Santagata, M. Lanotte, et D. Dalmazzo. « Development of a laboratory test procedure for the evaluation of potential gaseous emissions of asphalt rubber bituminous mixtures ». *Sustainability, Eco-Efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management*, 2014, 119-28.

Zhou, Xinxing, Taher Baghaee Moghaddam, Meizhu Chen, Shaopeng Wu, et Sanjeev Adhikari. « Biochar Removes Volatile Organic Compounds Generated from Asphalt ». *Science of The Total Environment* 745 (novembre 2020): 141096.