



HAL
open science

Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76. Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage. Annexes

Agnès Jullien, Pierre Moneron, Anne Ventura, Michel Legret, Dominique Demare, Chantal de La Roche, Michel Schemid, Céline Lachet, David Gaillard, Jack Oudin, et al.

► **To cite this version:**

Agnès Jullien, Pierre Moneron, Anne Ventura, Michel Legret, Dominique Demare, et al.. Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76. Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage. Annexes. Agnès Jullien. IFSTTAR - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pp.160-232, 2006, Etudes et Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées - série chaussées, 2-7208-2467-4. hal-00932827

HAL Id: hal-00932827

<https://hal.science/hal-00932827>

Submitted on 17 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76

Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage

Décembre 2005



L'esprit de recherche au cœur des réseaux

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre. F 75732 Paris Cedex 15

Auteurs par organisme et par unités :

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouquenais (44)

Unité Technologie du Génie Civil et Environnement – Section Développement Durable
Agnès Jullien
Pierre Monéron
Anne Ventura

Unité Eau et Environnement – Section Caractérisation et Transfert des Polluants
Michel Legret
Dominique Demare

Unité Matériaux et Structures de Chaussées – Section Liants et Matériaux routiers
Chantal de la Roche

Direction Départementale de l'Équipement, Blois (41)

Michel Schemid
Céline Lachet

Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes, Bagneux (92)

David Gaillard

Station d'Étude des Matériels Routiers, Blois (41)

Jack Oudin
Jean-Pierre Jacques

Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées

CETE Normandie Centre - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Saint-Brieuc (29)
Lionel Odie

CETE Normandie Centre - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (41)
Bernard Meriel
Régis Boittin
Hervé Cabannes
Philippe Jumontier
Sophie Seytre

CETE de l'Ouest - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers (49)
Karine Lacoste

CETE de Lyon - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun (71)
Louisette Wendling
Michel Bernard

Avec la contribution par organisme et par unités de :

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouguenais (44)

Unité Technologie du Génie Civil et Environnement – Section Elaboration des Matériaux
Bernard Guieysse
Yvan Baudru

Unité Eau et Environnement – Section Caractérisation et Transfert des Polluants
Laurence Lumière

Unité Matériaux et Structures de Chaussées – Section Liants et Matériaux routiers
Olivier Burban

Direction Départementale de l'Équipement, Blois (41)

Michel Pavie
Claude Sionneau
Patrice Boucher

Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes, Bagneux (92)

Yves Guidoux

Station d'Étude des Matériels Routiers, Blois (41)

Philippe Semelle
Robert Tasky
Gérard Monnière

Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées

CETE Normandie Centre - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (41)
Philippe Breton
François Bigot
Alain Charles
Michel Delaleu
Laëtitia Heurdier

Ce projet s'est déroulé dans le cadre de l'opération de recherche du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées intitulée « Recyclage et matériaux non conventionnels » au cours de la période 2002-2005, opération pilotée par :

Jean-Claude Auriol

Unité Reconnaissance et Mécanique des Sols - Section Conception des Ouvrages en Terre

Enfin, ce type de réalisation collective n'est possible que grâce à la participation de tous les acteurs concernés : les auteurs souhaitent également remercier tout particulièrement les équipes de fabrication et de mise en oeuvre du Parc Routier de Blois ainsi que la subdivision de Romorentin, respectivement pour la réalisation et le suivi du chantier

ANNEXES

ANNEXE 2 : DETAILS DE LA PHASE DE CHANTIER

Chronologie par opération

Les différentes phases du chantier ont été structurées dans les tableaux ci-dessous.

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND (2001)	DOCUMENTS
Connaissances antérieures			RN 76. Etude de réfection de chaussées LR Blois septembre 2000
Caractéristiques du chantier d'origine (archives)			
Structure de la chaussée	LR Blois + Parc		
Composition des différentes couches	"		
Résultats des contrôles d'épaisseurs, compacités	"		
Relevé des dégradations			RN 76. Etude de réfection de la chaussée LR Blois Janvier 2001
Caractéristiques actuelles de la chaussée			
Relevé et repérage des dégradations	LR Blois		
Film sur l'état du chantier avant entretien	LCPC-TGCE-SEM		
Reconnaissance par carottages			Compte rendu des carottages de la chaussée Mars 2001 LR Blois Feuilles d'essais LCPC MSC Août 2001
<i>Dégradation et éléments de vérification des données obtenues par les connaissances antérieures</i>			
Détermination du plan de carottage	LR Blois+Parc+SDD	8-9 février	
Réalisation du carottage	LR Blois	12-13 mars	
Détermination des épaisseurs	"	"	
Récupération du liant sur carottes	Angers ou LCPC	14-15 avril	
Teneur en liant à partir des carottes	"	15-16 avril	
Caractéristiques du liant ancien (péné, TBA)	"	17 avril	
Analyse granulométrique à partir des carottes	"	17 avril	
Disponibilité des matériaux pour les études			Synthèse du suivi technique de chantier LR Blois Septembre 2002
Choix de l'emplacement de la planche de fraisage	LR Blois+Parc + SDD	Avril (14)	

Tableau 1. Chronologie des études préliminaires de l'état de la chaussée

Les données du chantier d'origine sont utiles pour la simplification de la reconnaissance ultérieure (campagne de carottages), pour l'organisation du fraisage et pour le contenu des études préalables à mener pour connaître les caractéristiques des enrobés à recycler.

La connaissance des dégradations conditionne les recommandations en matière d'entretien, effectuées avec le logiciel ERASMUS.

La campagne de carottage permet : de connaître les épaisseurs mises en œuvre et de confirmer ainsi les données du chantier d'origine, d'avoir une idée du liant ancien et ainsi de postuler sur

le taux de recyclage optimal, de définir la zone pour réaliser la planche de fraisage de référence nécessaire pour la récupération des fraisats destinés aux études de formulation.

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND	DOCUMENTS
Exécution de la planche de fraisage de référence			Planification parc routier. Pas de document Photos effectuées lors du chantier LCPC SDD Travaux réalisés sans établissement d'un document particulier Photos effectuées lors du chantier LCPC SDD
Détermination de la période de réalisation	PARC	Avril 01	
Possibilité de déviation pour la durée des travaux	PARC		
Fraisage (environ 40 m)	SOLLOC	Avril 01	
Prélèvements d'agrégats lors du fraisage	SEM	Pendant le fraisage	
Tamisage des agrégats fraisés (> 4 mm)	"	Pendant le fraisage	
Participation aux réglages de la fraiseuse	LR Blois + Parc	Pendant le fraisage	
Prélèvements d'agrégats pour les études de formulation	LR Blois + SEM	Fin de fraisage	
Balayage de la partie fraisée	PARC	Fin de fraisage	
Mise en place d'une couche provisoire en enrobés	PARC	Fin de fraisage	
Essai de mise en place d'un élément de récupération de l'eau d'infiltration.	SDD	Pendant l'enrobage	

Tableau 2. Chronologie études préliminaires du fraisage

La planche de fraisage de référence sert à obtenir les matériaux destinés aux études de formulation et à fixer les paramètres de fonctionnement de la fraiseuse (profondeur de passe, vitesse d'avance..) pour le futur chantier de fraisage.

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND	DOCUMENTS
Stock d'agrégats issus de la déconstruction			- Feuilles d'essais LR Saint Brieuc Caractérisation environnementale de fraisats d'enrobés LR St Brieuc Mai 2002
Caractérisation de la pollution éventuelle			
Echantillonnage sur la quantité d'enrobés fraisés pour la planche de référence	SEM	Avril 01	
Conditionnement de l'échantillon (25 kg)	SEM	"	
Echantillonnage d'enrobés fraisés lors du chantier (couche de surface, couche recyclée) Transmission pour analyses	LCPC/SDD	Octobre 01	
Analyses de l'échantillon d'enrobé à recycler et de surface	LR S ^T Brieuc	Octobre 01	

Tableau 3. Chronologie de la caractérisation des stocks d'agrégats

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND	DOCUMENTS
Identification des constituants			
Agrégats			
Fuseau de fabrication des agrégats fraisés lors de la déconstruction	LR Blois	Mai 01	- Feuilles d'essai LCPC SDD - Procès verbal d'essais LR Blois Juin 2001 - Autun février 2002
Caractéristiques des gravillons des agrégats de la planche de référence (après désenrobage)			
Masse volumique des agrégats			
Granulats			
Masse volumique des constituants (sable, gravillons)	LR Blois	Avril 01	Caractérisation d'une formule de BBSG 0/10 Noubleau à différents taux de recyclage LR Blois Septembre 2001
Caractérisation (granulométrie, propreté, valeur au bleu)			
Caractéristiques de la fraction 6/10mm (LA et MDE)			
<i>Liants</i>			
Récupération de liant pour le stock d'agrégats	LR Blois, Angers	Juin 01	-Feuilles d'essais LCPC MSC Août 2001 -Caractérisation d'une formule de BBSG ... LR Blois Septembre 2001
Caractérisation du liant récupéré (Péné, TBA)			
Caractérisation du liant pour fabrication classique			
Formulation des enrobés (niveau 3)			
Vérification de la formule classique (MVR, PCG)	LR Blois	Août 01	- Caractérisation d'une formule de BBSG ... LR Blois Septembre 2001 - Synthèse du suivi technique LR Blois Septembre 2002
Composition théorique pour la formule avec 10% sans études préalables et vérification (PCG)		Septembre 01	
PCG, Duriez et orniérage pour les fabrications avec les taux de recyclage de 20, 30 %			
Module en traction directe pour les fabrications (classique et avec les agrégats du chantier déconstruit)	LR Autun	Après définition des formules	-Synthèse des essais de module sécant MAER BBSG 0/10 Autun Juillet 2002 -Rapport intermédiaire LR Autun Octobre 2002
Réalisation des plaques MAER			
Mesure au banc gamma			
Sciage des éprouvettes			
Essais de traction directe à la MAER (Module complexe)			

Tableau 4. Chronologie des études de formulation

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND (+)	DOCUMENTS
Planification, mise en place d'une déviation	PARC	Septembre 01 (S38 ou 39 - J1)	Réalisé. Pas de document spécifique
Fraisage de la chaussée	SOLLOC	Septembre 01 (S39-J1)	
Vérification des paramètres du fraisage	LR Blois+SEM	"	
Balayage de la chaussée fraisée		"	
Repérage des zones pour la récupération de l'eau de percolation	PARC	"	
Etanchéité du fond de couche			
Mise en place de l'étanchéité pour la récupération de l'eau (enduit superficiel)	PARC		Feuilles d'essais LCPC SDD septembre 2001
Balayage avant réalisation de l'enduit	PARC		
<i>Informations pour A.C.V.</i>			
Relevé des informations pour le bilan énergétique de la déconstruction.	SDD	Fin du fraisage	Feuilles d'essais LCPC SDD septembre 2001
Mise en place des récupérateurs d'eau			
Réalisation d'une tranchée en bord de rive	Sous traitance	Septembre 01 S39-J1	Rapport « Déconstruction et reconstruction de la chaussée expérimentale de la RN 76- Résultats bruts de consommation des engins ». LCPC SDD Octobre 2002
Mise en place des ensembles de récupération de l'eau	SDD-SEM	Fin de l'étanchéité S39-J1	
Installation des regards pour le stockage de l'eau récupérée	SDD-SEM	S39-J1	

Tableau 5. Chronologie de la déconstruction

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND (+)	DOCUMENTS
Acquisition des données de la fabrication			
Réalisation des étalonnages de la centrale	SEMR + Parc	Septembre 01, au maximum S 38	Suivi de fabrication SEMR Mars 2002
Suivi des différentes fabrications avec le module	SEMR	Septembre 01 S39-J2	
Caractérisation des paramètres de fabrication			
Teneur en eau et courbe granulométrique (gravillons et sable)	SEM + SEMR	Avant le démarrage des fabrications	- Feuilles d'essais LR Blois Septembre 2001
Relevé des informations pour établir le bilan énergétique des fabrications	SDD+ Parc	Pendant les fabrications	- Feuilles EDF, Février 2002
Prélèvements matière			
Prélèvements d'agrégats pour le suivi des caractéristiques	SDD	Pendant les fabrications	- Feuilles de travail LCPC SDD Septembre 2001 - Essai Duriez, essai d'orniérage sur BBSG 0/10 issu du chantier RN 76.LR Blois, Juin 2002 - Expérimentation de la RN 76. Synthèse du suivi technique de chantier. LR Blois, Octobre 2002
Prélèvements d'enrobés pour essais avec PCG	MSC + SEM	"	
Prélèvements d'enrobés pour essais d'orniérage	LR Blois	"	
Réalisation des plaques pour orniérage	"	"	
Prélèvements d'enrobés pour essais Duriez	"	"	
Réalisation des éprouvettes Duriez	"	"	
Prélèvements d'enrobés pour essais MAER	Blois + Autun	"	
Réalisation des plaques pour MAER	"	"	
Prélèvements d'enrobés pour étude sur liants récupérés.	SEM	"	
Participation aux différents prélèvements	SEMR	"	
Prélèvements des liants d'apport	SDD, PARC	Livraison des liants	
Prélèvements liés au fonctionnement du sécheur			
Prélèvements de particules à la sortie du dépoussiéreur	SDD + SEMR	Pendant fabrications	- Feuilles d'essais LCPC_NANTES Septembre 2001
Prélèvements de particules dans les gaz	SDD	"	- Campagne de mesures de gaz odorants émis lors de la fabrication et du répandage des 4 enrobés. SODAE Février 2002
Prélèvements liés à l'environnement			
Analyses des émissions gazeuses et des odeurs	SODAE	Pendant fabrications	- Rapport « Analyse des mesures d'émissions gazeuses lors de la fabrication, à différents taux de recyclage, des enrobés du chantier RN 76 ». LCPC – SDD, Juillet 2003

Tableau 6. Chronologie de la fabrication des enrobés

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND	DOCUMENTS
Suivi du chantier	LR Blois	Septembre 01 S39-J2	Feuilles d'essais LR Blois Septembre 2001
Suivi de la masse volumique avec un appareil à rétrodiffusion	"	"	-Synthèse du suivi technique de chantier LR Blois Octobre 2002
Prélèvements d'enrobés pour contrôles de la fabrication	SEM	"	Feuilles de travail LCPC septembre 2001
Surveillance de la tenue des récupérateurs d'eau	"	"	Réalisée. Pas de document spécifique
Quantification des rejets polluants à la mise en oeuvre	Sous traitance	"	- Campagne de mesures de gaz odorants émis lors de la fabrication et du répandage des 4 enrobés. SODAE, Février 2002 - Rapport « Mise au point d'un protocole de mesures d'émissions gazeuses et odorantes lors de la mise en œuvre d'un enrobé bitumineux à chaud ». LCPC SDD, Août 2002 - Rapport « Fraisage, balayage et mise en œuvre de la chaussée, transports associés (engins et matériaux), consommations et rejets par unité fonctionnelle et par sous système ». LCPC SDD, Octobre 2002 - Rapport « Analyse des mesures d'émissions gazeuses lors de la mise en œuvre, à différents taux de recyclage, des enrobés du chantier RN 76 ». LCPC SDD Octobre 2003
Quantification de la perméabilité des différentes planches par traçage radioactif	LR Angers	"	Non réalisée
Réalisation des mesures de masse volumique (GMPV)	LR Blois	Fin chantier	Synthèse du suivi technique de chantier LR Blois, Octobre 2002
Carottage (\varnothing 150 mm) pour essais de récupération de l'eau d'infiltration en labo	LR Blois	"	-Feuilles d'essais LR Autun avril 2002 - Rapport « Capteurs de récupération des eaux de pluie percolant dans les enrobés mis en œuvre sur le chantier RN 76 »
Essais de perméabilité en labo	LCPC/SPE,SEM, LR Autun		LCPC SDD, Juillet 2004

Tableau 7. Chronologie de la mise en œuvre des enrobés

OPERATION A REALISER	QUI	QUAND	DOCUMENTS
Relevé du profil en long et du profil en travers avec l'APL et le TUS	LR Blois	à 3 mois à 1 an	- Feuilles d'essais LR Blois Mai 2002
Mesure des déflexions avec le déflectographe	LR Blois	à 3 mois à 1 an	-Feuilles d'essais LCPC Résultats + rapports sur le chantier
Relevé des dégradations de surface	LR Blois	à 3 mois à 1 an	- Synthèse du suivi technique de chantier LR Blois, Octobre 2002
Relevé des eaux de récupération pour les 4 planches d'enrobé (mesure des quantités recueillies et échantillonnage pour analyses chimiques)	LR Blois	2001-2002	-Feuilles de relevé, LR Blois - Rapport « Capteurs de récupération des eaux de pluie percolant dans les enrobés mis en œuvre sur le chantier RN 76 » LCPC SDD, Juillet 2004
Analyse des eaux de récupération et de percolation	LCPC/SPE Sous traitance LR	2001-2002 2001-2002	-Procès verbal d'essai. LCPC division eau

Tableau 8. Chronologie du suivi de la chaussée

Chronologie linéaire

Transports pour la déconstruction de la chaussée

- Transport du matériel sur le site du chantier :
 - o un porte-char pour la fraiseuse
 - o aller-retour de la balayeuse depuis son lieu de garage
- Transport du personnel sur le site du chantier : une camionnette

fraisats non recyclés, transport des fraisats sur leur lieu de dépôt

9h45 : début fraisage en rive-1ère bande à -3 cm (V= 12 m/mn)

10h20: la fraiseuse recule avant la fin des 600 m pour gagner du temps et reprend dans sa trace à -4 cm (V= 7 m/mn)

La vitesse de fraisage n'étant pas importante vis à vis de l'expérimentation du fait que cette bande est considérée comme un déchet les valeurs sont choisies pas le conducteur et le régleur de la fraiseuse

10h50 : arrêt fraiseuse et plein d'eau

11h15 : départ fraiseuse

11h35 : arrêt (attente de camions)

11h50 : départ pour enlever la bande centrale -2 ème bande- de la demi-chaussée sur 600 mètres de longueur profondeur -3 cm, durée de fraisage 19 mn31

12h15 pause repas

13h55 : plein d'eau fraiseuse

fraisats à recycler, transport des fraisats sur leur lieu de stockage à la centrale du PARC

14h10 : départ fraiseuse dans ses traces sur la 2ème bande profondeur -4cm pour le fraisat à recycler sur 600m

arrêt après 3 mètres pour vérification de la granulométrie du fraisat
réduction de vitesse suite aux résultats

15h15 : fin du fraisage de la bande à recycler

15h15 : plein d'eau fraiseuse

fraisats non recyclés, transport des fraisats sur leur lieu de dépôt

15h35 : départ fraiseuse pour enlever la 3ème bande sur 600 mètres profondeur -7 cm en une passe

16h30 : arrêt fraiseuse

16h55 : plein d'eau fraiseuse

Transport des fraisats

Fraisats non recyclés : le lieu du dépôt a été choisi à proximité du chantier pour permettre d'optimiser la durée des rotations de camions :

distance aller par camion depuis le site RN 76 : 3km100

Fraisats à recycler : le lieu de stockage temporaire était situé sur l'aire de stockage de la centrale du parc routier de Blois.

distance aller depuis le site RN 76 : 57 km

Transports pour la reconstruction de la chaussée

- Transport du matériel sur le site du chantier :
- un porte-char pour le finisseur
- un semi-remorque pour le compacteur à pneu
- un semi-remorque pour le compacteur à cylindre lisse
- Trajet de la répandeuse depuis son lieu de garage au parc routier de Blois
- Transport du personnel sur le site du chantier : une camionnette

modalité à 0% de recyclé début fabrication centrale à 7h30 fin à 8h40

7h55 : départ du premier camion bâché

8h55 : arrivée du premier camion sur RN76

9h10 : départ du finisseur

9h20 : départ du compacteur à pneu

9h25 : arrivée du 2ème camion

10h00 : arrêt du finisseur

10h20 : arrêt du pneu

modalité à 10% de recyclé début fabrication centrale à 9h12 fin à 10h20

10h50 : départ du finisseur

10h58 : départ du compacteur à pneu

11h40 : arrêt du finisseur

11h50 : arrêt du pneu

modalité à 20% début fabrication centrale à 10h50 fin à 11h50

13h55 : départ du finisseur

14h10 : départ du pneu

14h40 : arrêt du finisseur

14h55 : arrêt du pneu

modalité à 30% début fabrication centrale à 14h00 fin à 15h00.

15h32 : départ du finisseur

15h43 : départ du compacteur à pneu

16h26 : arrêt du finisseur

16h38 : arrêt du pneu

ANNEXE 3.A : CONTROLE PAR PRELEVEMENTS MATIERE

Le contrôle par prélèvements matière destiné à obtenir des valeurs moyennes de composition des enrobés fabriqués nécessite de procéder à l'échantillonnage pendant des phases stabilisées de fabrication. Pour cette raison, ces prélèvements sont toujours réalisés en écartant les débuts et les fins de fabrication. Pour le contexte du chantier RN 76, deux types de prélèvements ont été réalisés :

- un prélèvement destiné à être analysé immédiatement, pour donner une idée de la composition de l'enrobé fabriqué et accrédiéter la validation de la modalité fabriquée. Portant principalement sur la teneur en liant, l'écart toléré était au maximum de 0,3% absolu par rapport à la teneur de consigne.
- des prélèvements, analysés ultérieurement, et destinés à déterminer les compositions moyennes des enrobés fabriqués et constituer des facteurs explicatifs des différences potentielles concernant les émissions gazeuses. Compte tenu de la validation précédente et des indications du contrôle intégré, les différences de composition doivent être dans le domaine de variation attendu pour ce type de fabrication (par ex. : écart valeur moyenne et valeur théorique de 0,2 % absolu pour la teneur en liant).

La teneur en liant a été déterminée selon la norme XP T 66-041 de décembre 1995 et l'analyse granulométrique par tamisage selon la norme P 18-560 de septembre 1990.

La procédure suivie pour l'ensemble des prélèvements matière est la suivante :

- compte tenu de la quantité d'enrobés à fabriquer pour chaque modalité (100 tonnes) et du parc de semi remorque disponible, il fallait au minimum 4 camions pour transporter cet enrobé sur le site de mise en œuvre,
- le premier camion est exempt de prélèvement,
- un échantillon d'enrobé est prélevé dans le deuxième camion pour analyses immédiates (analyses effectuées par le parc routier au laboratoire de Blois),
- des prélèvements d'enrobés sont effectués dans le troisième camion pour la confection des corps d'épreuve destinés aux essais de caractérisation mécaniques. L'enrobé est stocké dans des fûts remplis et fermés. Les essais ont été réalisés ultérieurement au LCPC et au LRPC d'Autun. Par ailleurs, un prélèvement d'enrobé destiné à la vérification PCG est aussi réalisé dans le troisième camion. L'essai PCG a été réalisé en continu avec la PCG embarquée du LCPC,
- les prélèvements pour l'analyse des compositions moyennes ont été effectués sur les enrobés contenus dans les deuxième, troisième et quatrième camions. Pour assurer une bonne représentativité de ces prélèvements (4 par camion), ceux-ci ont été réalisés dans les vis du finisseur. Il y a donc eu 12 prélèvements par modalité, ce qui représente environ 1 prélèvement pour 10 tonnes fabriquées. Les analyses ont été effectuées ultérieurement au LCPC, dans la semaine qui a suivi la fabrication,
- par ailleurs, des constituants (granulats neufs, bitume, agrégats d'enrobés, fines) ont été prélevés à titre conservatoire, pour reconstitution et confection des différents mélanges en laboratoire, pour vérifications ultérieures.

ANNEXE 3.B CARACTERISATIONS MECANQUES DES ENROBES

Essais à la Presse à Cisaillement Giratoire

L'étude à la PCG permet de :

- caractériser la compactibilité du mélange,
- prédire le pourcentage de vides in situ,
- évaluer l'effet des facteurs de formulation.

Le résultat se présente sous la forme d'une courbe d'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations. La norme NFP 98-252 prévoit que le résultat d'un essai PCG est la moyenne de trois tests élémentaires.

Ces essais ont été réalisés pendant la fabrication de chacun des quatre enrobés fabriqués, avec la PCG embarquée de la division MSC du LCPC (Figure 1) installée sur le site de la centrale d'enrobage.



Figure 1. PCG embarquée

Les courbes obtenues, donnant l'évolution du pourcentage de vides de l'éprouvette en fonction de l'énergie de compactage caractérisée par le nombre de girations sont présentées sur la Figure 2. Les références normatives pour un BBSG 0/10 pour un nombre de girations fixé et les pourcentages de vides obtenus sur les enrobés fabriqués sont présentés dans le Tableau 9.

Les résultats à 1 tour de giration, non spécifiés dans la norme, ont été indiqués car ils donnent une information sur la maniabilité de l'enrobé fabriqué. Cette information avait une importance particulière pour l'expérimentation dans la mesure où les recommandations en matière de compactage des enrobés des différentes fabrications ne pouvaient être établies à partir de planches de référence.

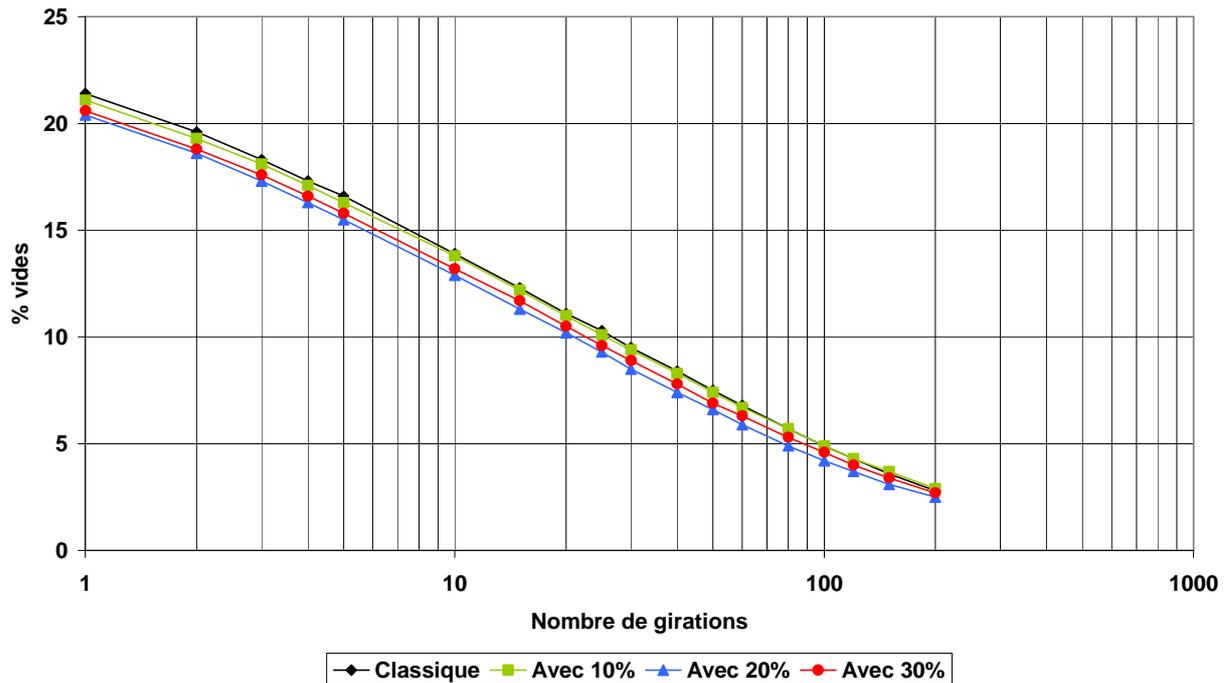


Figure 2 : Courbes PCG pour les quatre enrobés

Modalité \ Nombre de girations	Nombre de girations			
	1	10	60	80
Norme BBSG 0/10 NF P 98 130	/	Minimum : 11	Minimum : 5	Maximum : 10
Modalité classique	21,4	13,9	6,8	5,7
Modalité avec 10% de fraisats	21,1	13,8	6,7	5,7
Modalité avec 20% de fraisats	20,4	12,9	5,9	4,9
Modalité avec 30% de fraisats	20,6	13,2	6,3	5,3

Tableau 9 : Pourcentages de vides à l'essai PCG

Dans un contexte où la durée de fabrication de chaque modalité était courte (1h), les consignes de fabrication figées pour respecter les conditions de représentativité des analyses des rejets gazeux et la mise en œuvre effectuée sans planche de référence, ces essais ont permis de vérifier la compactibilité des enrobés. En prenant pour l'essai PCG une résolution de 1 point pour la teneur en vides, les valeurs obtenues montrent que :

- en association avec les analyses en cours de fabrication, les enrobés fabriqués présentaient la même composition et donc une absence d'effet dû à une variation de; courbe granulométrique, teneur en fines, teneur en liant,
- les pourcentages de vide obtenus à 1 giration ne montraient pas un comportement différent des enrobés fabriqués pouvant se traduire par une différence en matière de mise en place sur chantier,
- pour le même nombre de giration, les enrobés fabriqués conduisaient à un pourcentage de vides identiques.

Les valeurs moyennes des fabrications permettent de conclure à l'équivalence de l'ensemble des fabrications et au respect des contraintes normatives. Les pourcentages de vides obtenus à 60 girations conduisent aux teneurs en vides spécifiées sur chantier pour ce type de béton bitumineux.

Essais de tenue à l'eau. Essais Duriez

L'objectif de l'essai Duriez est de déterminer la tenue à l'eau du mélange hydrocarboné. Les références normatives, les résultats obtenus sur les enrobés fabriqués au labo pour les études de formulation et les résultats obtenus sur les enrobés fabriqués en centrale sont présentés dans le Tableau 10.

Béton Bitumineux	Norme r/R	Duriez Etudes Labo			Duriez enrobés RN 76		
		R	r/R	% vides	R	r/R	% vides
Modalité classique	≥ 0,75	13,2	0,90	7	13,5	0,95	8
Modalité avec 10% de fraisats	≥ 0,75	*	*	*	13,4	0,98	7,8
Modalité avec 20% de fraisats	≥ 0,75	12,9	0,96	7,1	14,3	0,94	7,9
Modalité avec 30% de fraisats	≥ 0,75	12,8	0,90	5,5	14,2	0,96	7,2

Tableau 10 : Résultats Duriez

Conformément aux dispositions prises pour le recyclage à faible taux, l'essai en laboratoire n'a pas été effectué pour la modalité à 10%, car le résultat PCG était conforme à la référence.

Le déroulement des essais n'a pas donné lieu à des observations particulières. Les enrobés fabriqués possèdent des résistances en compression sans immersion (R) comparables. Les valeurs de r/R sont supérieures à celle prescrite dans la norme, et supérieures à celles des études de formulation, malgré des pourcentages de vides plus élevés.

Les teneurs en vide des éprouvettes Duriez confirment les résultats PCG en matière de respect potentiel des teneurs en vide sur chantier.

Contrôle du pourcentage de vides in situ avec le GDF

Les pourcentages de vides de la couche de BBSG de liaison, calculés à partir d'une masse volumique réelle des enrobés fabriqués de 2,62 t/m³ sont répertoriés dans le Tableau 11. L'évolution de ces pourcentages de vides, pour les 600m de la chaussée reconstruite, est présentée sur la Figure 3. Cette présentation est effectuée conformément à la disposition réelle des planches pour le sens de circulation sur le chantier (Figure 3.4).

Position de la mesure	Modalité classique		Modalité avec 10%		Modalité avec 20%		Modalité avec 30%	
	γ	% vides	γ	% vides	γ	% vides	γ	% vides
Début planche + 10m	2,48	5	2,44	6,9	2,45	6,5	2,46	6,1
Début planche + 25m	2,44	6,5	2,49	5	2,42	7,6	2,46	6,1
Début planche + 401m	2,5	4,2	2,40	8,4	2,39	8,8	2,43	7,3
Début planche + 55m	2,48	5	2,46	6,1	2,45	6,5	2,48	5,3
Début planche + 65m	2,43	6,9	2,44	6,9	2,48	5,3	2,44	6,9
Début planche + 75m	2,42	7,3	2,45	6,5	2,44	6,9	2,48	5,3
Début planche + 85m	2,40	8	2,48	5,3	2,45	6,5	2,45	6,5
Début planche + 95m	2,42	7,3	2,44	6,9	2,47	5,7	2,45	6,5
Début planche + 110m	2,44	6,5	2,46	6,1	2,49	5	2,49	5
Début planche + 125m	2,40	8	2,46	6,1	2,43	7,3	2,48	5,3

Tableau 11 : Contrôle de compactage

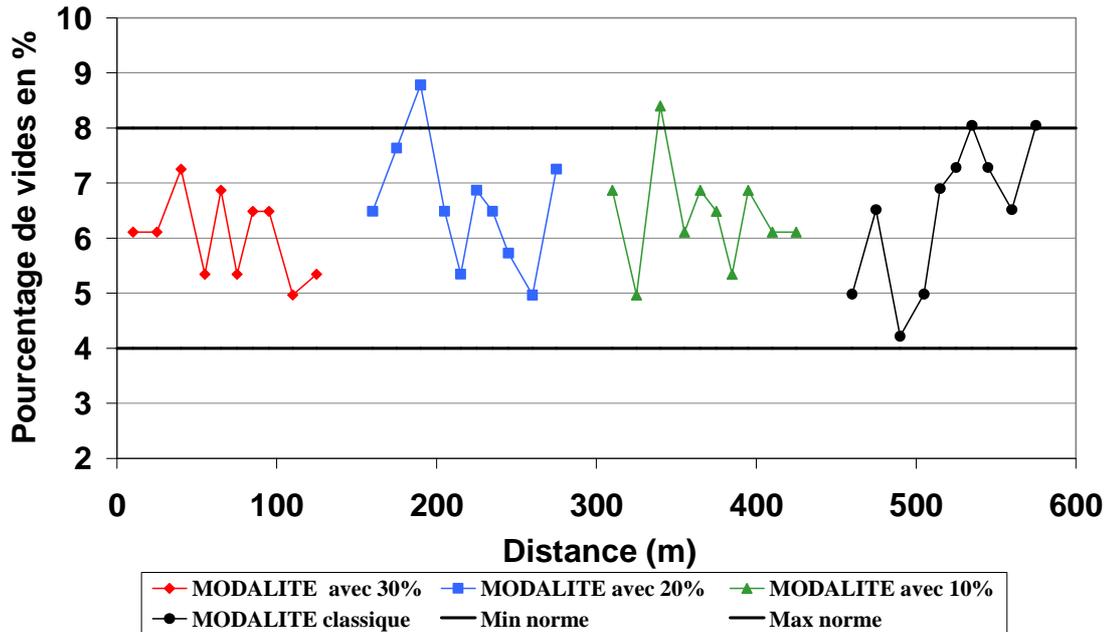


Figure 3 : Evolution des pourcentages de vides mesurés au GDF

A l'exception de la fabrication classique, les mises en œuvre des enrobés fabriqués avec le recyclage des fraisats ne faisaient pas l'objet d'expériences préalables en matière de maniabilité. Dans ce contexte, les mesures de pourcentages de vides effectuées montrent un respect des tolérances normatives (Normes NFP 98-130 et NFP 98-150) pour l'ensemble des fabrications (seuls 2 points sur 40 se trouvent avec un pourcentage de vides supérieur à 8%). Nous retiendrons que la modalité avec le taux de recyclage de 30% présente les densités en place les plus élevées. Cette constatation confirme l'hypothèse que, à formulation équivalente, les enrobés fabriqués avec un taux de recyclage $\geq 30\%$ semblent posséder une meilleure maniabilité que les autres enrobés.

Résistance à l'orniérage

Les références normatives, les résultats obtenus sur les enrobés fabriqués en labo pour les études de formulation et les résultats obtenus sur les enrobés fabriqués en centrale sont présentés, pour sollicitation de 30 000 cycles, dans le Tableau 12.

Béton Bitumineux	Norme BBSG classe 2		Orniérage Etudes labo		Essais d'orniérage enrobés RN 76	
	% ornière	% vides	% d'ornière	% vides	% d'ornière	% vides
Modalité classique	$\leq 7,5$	$5 < \% < 8$	7,4	8,1	5,4	7,6
Modalité avec 10% de fraisats	$\leq 7,5$	$5 < \% < 8$	*	*	5,8	6,1
Modalité avec 20% de fraisats	$\leq 7,5$	$5 < \% < 8$	5,4	7,3	6,5	6,3
Modalité avec 30% de fraisats	$\leq 7,5$	$5 < \% < 8$	7	6,1	5,2	5,7

Tableau 12 : Résultats des résistances à l'orniérage

Conformément aux dispositions prises pour le recyclage à faible taux, l'essai en laboratoire n'a pas été effectué pour la modalité à 10%, car le résultat PCG était conforme à la référence. Hormis pour la modalité avec 20% de fraisats, il apparaît qu'à pourcentage de vides

équivalent, la résistance à l'orniérage des enrobés fabriqués en centrale est supérieure à celle obtenue dans le cadre des épreuves de formulation. Tous les enrobés fabriqués ont une résistance à l'orniérage conforme à celle d'un BBSG de classe 2 (Norme NFP 98-130).

Caractérisation des propriétés mécaniques

Lors de la mise en œuvre des matériaux, deux types de prélèvements ont été réalisés pour confectionner des plaques (400 par 560 mm) destinées à la préparation des corps d'épreuve pour les essais mécaniques ultérieurs :

- des matériaux chauds foisonnés prélevés à la sortie de la centrale et conservés en fûts fermés pour détermination des caractéristiques des enrobés fabriqués en centrale,
- des constituants (granulats naturels, bitume, fines et agrégats d'enrobés) pour détermination des caractéristiques des enrobés fabriqués en labo, selon des compositions identiques à celles des enrobés fabriqués en centrale. Les prélèvements sortie centrale ont donné lieu à des contrôles de composition. Les valeurs moyennes ainsi obtenues (tableau 3.18) ont été utilisées comme valeurs de référence pour la reconstitution des mélanges en laboratoire.

Chacune des formules du plan d'expérience a fait l'objet de deux caractérisations correspondant aux deux modes de fabrication, centrale et laboratoire. Pour l'ensemble des plaques, la compacité labo visée (92 %) a été calée sur une valeur proche des compacités moyennes relevées sur le chantier RN 76 (94%). Cependant, l'objectif du chantier RN 76 concernait essentiellement les enrobés fabriqués en centrale. Ainsi, seules sont présentées ici les valeurs moyennes relatives à ces enrobés fabriqués en centrale obtenues, pour différents taux de recyclage, à partir de quatre corps d'épreuve par taux de recyclage. Le moulage des plaques (400 × 560 mm) a été réalisé avec des prélèvements d'enrobés foisonnés provenant de la fabrication en centrale et contenus dans des fûts hermétiquement fermés et préalablement réchauffés. La compacité labo visée était de 92 %. Cette compacité a été calée sur une valeur proche des compacités moyennes relevées sur le chantier RN 76, qui était de 94%.

Sur chacune de ces formules, les essais suivants ont été réalisés :

- Module en traction directe à la MAER sur éprouvettes cylindriques selon la norme NFP 98-260-1,
- Températures -5, 0 °C, temps de charge 1,5 ; 5 ; 15 ; 50 ; 150 s,
- Températures 10, 15 °C, temps de charge 1 ; 3 ; 10 ; 30 ; 100, 300s
- Essai de non linéarité en traction directe à la MAER sur éprouvettes cylindriques selon la norme NFP 98-260-1
- Température 0°C, temps de charges 30s, niveaux de déformations 50, 100, 200 et 500 10⁻⁶
- Module complexe en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales selon la norme NFP 98-260-2
- Températures -10, 0, 10, 15, 20, 30 et 40 °C, fréquences 1, 3, 10, 25, 30 et 40 Hz
- Essais de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales selon la norme NFP 98-261-1 (déc. 93)
- Température 10°C, fréquence 25 Hz
- Niveaux de déformation testés 110 10⁻⁶ pour l'ensemble des formules et 135 10⁻⁶ pour les formules 0% de recyclés chantier et labo et 30% recyclés chantier.

Essais sur les bitumes

Le bitume neuf prélevé au moment du chantier ainsi que le liant des agrégats d'enrobés sont des bitumes purs. Ces deux liants ont fait l'objet d'une caractérisation classique dont les résultats sont regroupés dans le Tableau 13.

	Liant neuf 35/50 Shell		Liant récupéré *
	Avant RTFOT	Après RTFOT	
Pénétrabilité (1/10 mm)	43	30	45
Température bille et anneau (°C)	51,6	56,6	54

* Les valeurs indiquées sont les valeurs moyennes obtenues sur différents prélèvements présentant une dispersion importante (pénétrabilité de 32 à 52 (1/10mm), TBA de 51,2 à 56,2 °C.

Tableau 13 : Caractérisation du liant neuf et du liant ancien

Dans le cas de ce chantier, le liant ancien contenu dans les agrégats d'enrobés est identifié comme un liant 35/40.

Valeurs de rigidité

Essai de traction directe et de module complexe

Pour comparer les différentes formules, les valeurs normatives obtenues avec chacun des essais de module de rigidité normalisés ont été utilisées :

- module en traction directe à 15 °C, 0,02s obtenu par tracé de la courbe maîtresse des matériaux, donnant, pour une température donnée, le module en fonction du temps de chargement,
- module complexe à 15 °C, 10 Hz . L'essai de module complexe permet d'identifier les propriétés viscoélastiques linéaires des matériaux bitumineux dans leur gamme de fréquence et de température d'utilisation.

Les teneurs en vides des échantillons testés et les valeurs obtenues en traction directe et en modules complexes sont regroupées respectivement dans le Tableau 14 et le Tableau 15.

Traction directe	0% recyclés	10% recyclés	20% recyclés	30% recyclés
% vides (géom.)	2,8	2,0	2,1	1,4
E (15 °C, 0,02s) Mpa	14362	15165	14321	15875
Pente isotherme 15 °C MPa/s	-13,05	-13,27	-14,1	-15,13

Tableau 14 : Pourcentages de vides et Modules sécants

Module complexe	0% recyclés	10% recyclés	20% recyclés	30% recyclés
% vides (géom.)	2,6	1,9	1,5	2,1
E* (15 °C, 10 Hz) Mpa	14585	14096	14858	14987
Angle de phase (°)	13.6	14.4	13.2	13.3

Tableau 15 : Pourcentages de vides et Modules complexes

Comparaison du module sécant et du module complexe

La comparaison a été établie sur des éprouvettes normées au pourcentage de vide géométrique de 2,5% en appliquant la relation suivante, basée sur une relation prédictive de la valeur de

module à 15°C 10Hz en fonction de la teneur en liant des mélanges et de leur compacité (Moutiers F., 1991) :

$$\Delta E_{10Hz}^{15^\circ C} = \Delta C \times \left(-0,078 + \frac{0,63}{TL} \right) \times 10000$$

Avec ΔE l'écart de module en MPA

ΔC l'écart de compacité par rapport à la référence de 2,5% pour le % de vides,

TL la teneur en liant des enrobés.

Cette correction permet d'estimer la part de variabilité de module pouvant être attribuée au taux de recyclage. Les valeurs de module ainsi corrigées et les écarts E et E* sont donnés dans le Tableau 16.

	0% recyclés	10% recyclés	20% recyclés	30% recyclés
E (15°C ; 0,02s) MPa	14 469	14 987	14 179	15 484
E* (15°C, 10Hz) MPa	14 621	13 883	14 503	14 845
Écart E-E* MPa	-152	1105	-324	639

Tableau 16 : Modules sécants E et modules complexes E* normés au % de vides de 2,5%

Compte tenu des valeurs de répétabilité, $r = 1360$ Mpa spécifié pour l'essai MAER, $r = 335$ Mpa spécifié pour l'essai de module complexe, nous retiendrons que les valeurs obtenues ne sont pas statistiquement différentes. Par ailleurs, les modules obtenus à partir des deux essais sont largement supérieurs (rapport d'environ 2) aux exigences normatives spécifiées dans la norme NFP 98-130 en matière d'essais de traction directe et de module complexe.

Comportement à la fatigue

Durée de vie à 110 μ defs

Le Tableau 17 récapitule les résultats des durées de vie (en nombre de cycles) obtenues pour une déformation de 110 10⁻⁶, avec les teneurs en vides moyennes des échantillons testés.

	0% recyclés		10% recyclés		20% recyclés		30% recyclés	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
% vides (géom.)	2,6	0,3	1,8	0,2	1,5	0,2	2,3	0,2
Durée de vie en s	2 221 500	296 150	2 120 400	986 912	3 791 000	2 105 462	4 050 750	1 665 140

Tableau 17 : Durées de vie pour 110 μ defs

Les mélanges présentent:

- des durées de vie équivalentes pour les mélanges à 0 et à 10 % d'agrégats,
- en ajoutant 20 ou 30 % de recyclé dans un mélange, sa durée de vie en fatigue double,
- avec des coefficients de variation de 12 à 26%, les durées vie des échantillons de laboratoire et du mélange chantier à 0 % de recyclé présentent des dispersions équivalentes.
- l'ajout de recyclé dans les mélanges chantiers induit une forte dispersion des durées de vie: CV de 50% !

Nous attribuons cette dispersion à un défaut d'homogénéité des mélanges chantiers contenant des recyclés.

Influence du niveau de chargement

Les valeurs moyennes des durées de vie obtenues pour des déformations imposées de 110 μ def et 135 μ def sont regroupées dans le Tableau 18, avec les teneurs en vides moyennes des échantillons testés.

	0% recyclés 110 μ def		0% recyclés 135 μ def		30% recyclés 110 μ def		30% recyclés 135 μ def	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
% vides (géom.)	2,6	0,3	2,9	0,6	2,3	0,2	2	0,2
Durée de vie en s	2 221 500	296 150	816 000	329 099	4 050 750	1 665 1008	510 000	93 338

Tableau 18 : Durée de Vie et % de vide des mélanges à $\square = 110$ et 135 μ def

Le passage de 110 à 135 μ def induit des coefficients réducteurs sur les durées de vie des mélanges de:

- 2,7 pour le taux de recyclage de 0 %
- 8 pour le taux de recyclage de 30 %

Evaluation de la déformation admissible à partir des essais de non-linéarité à la MAER

La résistance en fatigue est calculée à partir de la relation proposée par Francis Moutier (note de 4 Juillet 1988) concernant la correspondance entre une estimation de ε_6 et la perte de linéarité déterminée avec l'essai MAER. Celle-ci s'établit pour un liant quelconque en :

$$\varepsilon_6 = 239 - 330 (1 - \Gamma)$$

valeurs données avec un intervalle de confiance de + ou - 26 μ def. Les résultats sont présentés dans le Tableau 19.

	0% recyclés	10% recyclés	20% recyclés	30% recyclés
S 0°C et 300 s en MPa				
1- Γ	0,224	0,257	0,235	0,247
Estimation ε_6	165	154	161	157

Tableau 19 : Valeurs estimées de ε_6 à partir des valeurs de Non Linéarité

Les valeurs de non linéarité apparaissent dispersées et sont difficilement exploitables. Ainsi, le manque de données ne permet pas de juger de l'évolution des estimations de ε_6 en fonction du taux de recyclés.

ANNEXE 3.C COUCHE DE ROULEMENT EN BBMa 0/10

Caractéristiques du BBMa 0/10

Les caractéristiques et les performances en laboratoire du BBMa utilisé en couche de roulement sont présentées dans le Tableau 20.

Passant à 10 mm	Passant à 6.3 mm	Passant à 2 mm	Passant 0.08 mm	TL%	K
91	37	31	8	5.20	3.42

Essai PCG	Pourcentage de vides à 40 g	9.8 %
Essai Duriez	Rapport r/R	0.89
Essai d'orniérage	% d'ornière à 10 000 cycles pour un % vides de 8.3%	11 %

Tableau 20 : Courbe granulométrique et performances théoriques du BBM

Du point de vue de la norme NF P98-132 de Juin 2000, le BBM se situe en classe 2.

Composition du BBMa mis en oeuvre

Les résultats moyens du contrôle externe de la fabrication sont reportés dans le Tableau 21.

Passant à 10 mm	Passant à 6.3 mm	Passant à 2 mm	Passant 0.08 mm	TL%
91.2	45	33.2	8.7	5.33

Tableau 21 : Composition du BBM

On note à la fabrication un écart significatif sur le passant à 6.3 mm. Cet écart tend à restreindre la discontinuité de la courbe granulométrique du BBM.

Mesure en continu de la masse volumique avec le Gammadensimètre Mobile à Profondeur Variable (GMPV)

Pour intégrer les deux couches de la chaussée (BBMa + BBSG), la mesure de la masse volumique en continu avec le GMPV sur la chaussée terminée a été intégrée au plan d'expérimentation initial. Les mesures ont concerné 3 axes de la chaussée, l'axe de la voie (noté Axe) ainsi que les bandes de rives gauche (noté BRG) et droite (noté BRD). Nous avons ainsi une image de la chaussée au droit des bandes de roulement ainsi que dans la partie médiane. Le suivi ultérieur (suivi pluriannuel) sera réalisé selon les mêmes dispositions. L'évolution de la masse volumique apparente en continu (environ 1 mesure tous les 4 m) selon la longueur de la chaussée et pour les 3 axes cités est représentée sur la Figure 4.

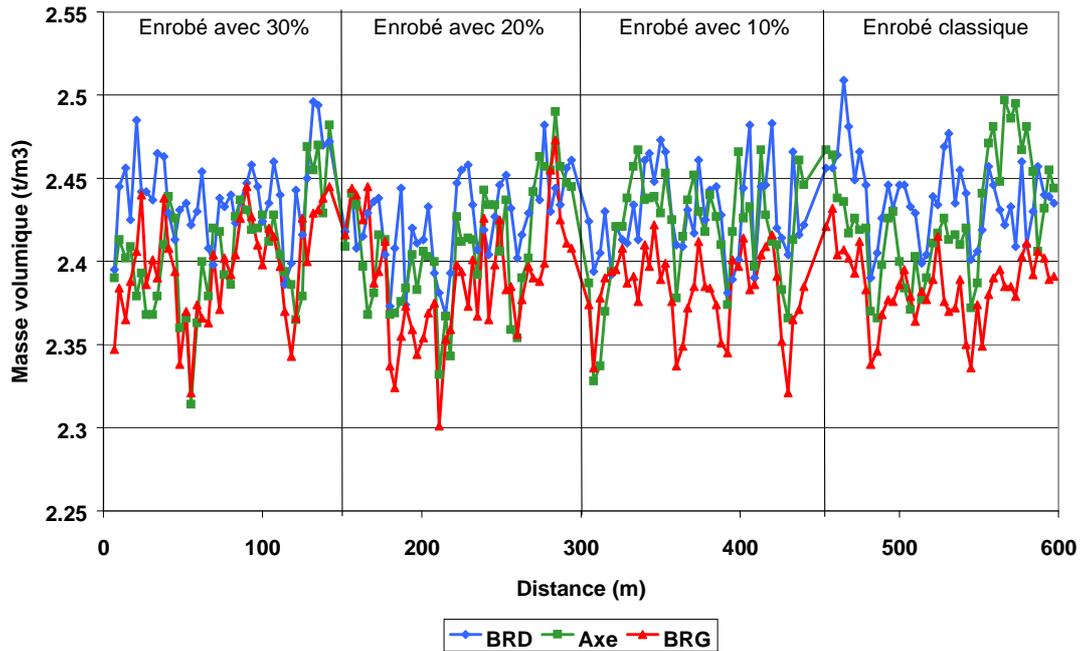


Figure 4 : Evolution de la masse volumique pour l'ensemble des 4 planches d'enrobé

Le Tableau 22 regroupe les paramètres statistiques (valeur moyenne, valeur minimale, valeur maximale et intervalle à 90%) obtenus en matière de pourcentages de vide pour chaque modalité d'enrobé et chaque axe de la chaussée. Ces pourcentages de vides sont déterminés à partir des valeurs moyennes des masses volumiques apparentes mesurées et de la valeur calculée en fonction des constituants de l'enrobé pour la masse volumique réelle (2,62 t/m³) de cet enrobé.

		Pourcentages de vides				
		Moyen	Min	Max	Intervalle à 90 %	
MODALITE classique	Rive gauche	8.6	6.8	10.5	7.3	10.0
	Axe de voie	7.0	4.3	9.3	4.8	9.3
	Rive droite	6.6	3.9	8.4	5.0	8.1
MODALITE avec 10 % d'agrégats)	Rive gauche	9.1	7.6	11.4	7.6	10.6
	Axe de voie	7.7	5.8	11.1	5.6	9.8
	Rive droite	7.3	5.2	9.1	5.6	9.0
MODALITE avec 20 % d'agrégats	Rive gauche	8.8	5.6	12.2	6.5	11.1
	Axe de voie	8.1	5.0	11.0	5.8	10.3
	Rive droite	7.5	5.3	9.6	5.9	9.1
MODALITE avec 30 % d'agrégats	Rive gauche	8.6	6.7	11.4	6.6	10.5
	Axe de voie	8.2	5.3	11.7	6.1	10.3
	Rive droite	6.9	4.7	8.9	5.3	8.5

(intervalle à 90 % = moyenne ± 1,65 écarts-type)

Tableau 22 : Résultats des pourcentages de vides selon l'axe de la chaussée

Les teneurs en vides mesurées concernent en majeure partie la couche de roulement en BBMa. Comme la référence normative en teneur en vides d'un BBMa (5 à 10%) est légèrement supérieure à celle d'un BBSG (4 à 8%), les résultats obtenus pour les 4 planches sont logiquement légèrement supérieurs aux résultats obtenus avec le GDF. Les résultats des 4 planches sont par ailleurs identiques en valeurs moyennes et en dispersion et ne traduisent

donc pas de différence susceptible d'intervenir de façon notable dans la problématique d'infiltration de l'eau de pluie.

Résultat de contrôle de la macrotexture du 6 décembre 2001

La synthèse des valeurs concernant la macrotexture du revêtement, caractérisée par des mesures de hauteur au sable effectuées sur la voie de gauche pour les 600m du chantier expérimental, est présentée dans le Tableau 23.

	Modalité classique		Modalité avec 10%		Modalité avec 20%		Modalité avec 30%	
	Hors traces	Trace gauche	Hors traces	Trace gauche	Hors traces	Trace gauche	Hors traces	Trace gauche
Moyenne	0,94	1,14	0,89	1,05	0,91	0,98	0,95	0,97
Ecart type	0,10	0,12	0,14	0,09	0,10	0,10	0,07	0,07
Mini	0,80	0,95	0,72	0,95	0,75	0,85	0,85	0,85
Maxi	1,10	1,30	1,10	1,20	1,10	1,10	1,05	1,05

Tableau 23 : Mesures des hauteurs au sable (mm)

Les quatre planches présentent des résultats homogènes et conformes à la référence normative pour un BBMa 0/10 (90% des points contrôlés supérieurs à 0,7mm).

ANNEXE 3.D : ESSAIS DE PERMEABILITE SUR CAROTTES

Prélèvement des carottes

Les carottes utilisées pour les essais de perméabilité, ont été prélevées le 4 octobre 2001 selon la distribution de la Figure 5. Elles sont composées de la **couche de liaison** et de la **couche de roulement**.

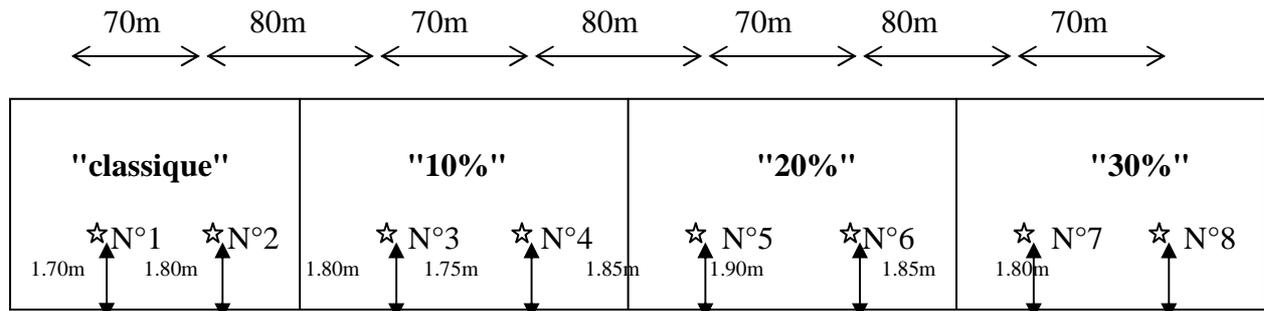


Figure 5: Schématisation de l'emplacement des carottes sur la chaussée

Ces carottes ont une géométrie cylindrique de diamètre 150 mm. Elles sont composées de BBMa (béton bitumineux mince), BBSG neuf ou recyclé (béton bitumineux semi-grenu), BB (béton bitumineux) et matériaux enrobés (Tableau 24).

<i>n° carotte</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
<i>taux de recyclage</i>	0%	0%	10%	10%	20%	20%	30%	30%
<i>Point de Repère</i>	18-110	18-040	18+040	18+110	18+190	18+260	18+340	18+410
<i>épaisseur</i>	BBMa	4.0	5.0	5.0	5.0	4.5	4.0	4.0
	BBSG	7.5	6.0	6.5	7.5	6.5	6.0	7.0
	BB+mat enrobés	8.0	8.5	9.5	10.5	11.5	11.0	11.5

Tableau 24: Caractéristiques des carottes de chaussée

Essais et mesures réalisés

Dans le cadre de notre étude, (réf. BL N°19 (1966), BL N°87 (1977), BL N°30 (1968)) la structure poreuse de la couche de surface de la chaussée a été étudiée en particulier sous l'angle de la perméabilité k . Les autres paramètres mesurés ou calculés sont: la masse volumique réelle MVr et apparente MVa , la compacité C , l'indice des vides n et la porosité e , le pourcentage de vides communicants VC .

Les mécanismes des mouvements d'eau dans les chaussées sont difficilement prévisibles et particulièrement complexes. Une perméabilité anormale d'une couche de chaussée peut engendrer des transports de l'eau en des lieux éloignés de l'origine et quelquefois particulièrement inattendus. (BL n°87, 1977).

Banc gamma

Appareil destiné à l'auscultation de matériaux de nature diverse par mesure de leur masse volumique en utilisant l'absorption de rayons gamma, il permet le contrôle de l'homogénéité de l'éprouvette, de suivre l'évolution de la densité après compactage.

Il permet l'auscultation automatique d'éprouvettes cylindriques en continu suivant une génératrice ou une hélice. Un PC gère les automatismes et stocke les paramètres; un programme de prétraitement permet la constitution d'un fichier des masses volumiques apparentes et des compacités. (matériel LPC, 1997)

Ainsi, à partir des données de la masse volumique réelle MV_{re} , du coefficient d'absorption μ' et de la hauteur de l'éprouvette h , l'appareil permet d'obtenir le pourcentage de vides n par tranche de carotte. Il est ensuite facile d'en déduire la compacité C , et la masse volumique apparente MV_a , l'indice des vides e , définis par les relations suivantes:

$$\text{masse volumique solide } \rho_s: \frac{\text{masse des grains}}{\text{volume des grains}} \text{ dite } \textit{masse volumique réelle } M.V.re$$

$$\text{masse volumique sèche } \rho_d: \frac{\text{masse des grains}}{\text{volume total}} \text{ dite } \textit{masse volumique apparente } M.V.a$$

$$\text{indice des vides: } e = \frac{n}{1-n} = \rho_s / \rho_d - 1$$

$$\text{compacité: } c=1-n = \frac{1}{1+e} = \rho_d / \rho_s$$

$$\text{porosité: } n = \frac{e}{1+e} = 1 - \rho_d / \rho_s$$

Perméamètre

La perméabilité est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par l'eau, sous l'action d'un gradient hydraulique. Elle exprime la résistance du milieu à l'écoulement de l'eau qui le traverse. Le coefficient de perméabilité permet la mesure de la perméabilité. Il est défini par la loi de Darcy: le débit par unité d'aire est proportionnel à la perte de charge et inversement proportionnel à la longueur de la conduite. Ce qui se traduit par:

$$\mathbf{v = k i} \quad (7)$$

$\mathbf{v = Q/S}$, Q débit d'écoulement au travers de la conduite de section S

$\mathbf{i = -dh/dl}$ gradient hydraulique qui correspond à la variation de charge hydraulique dh pour une variation dl de l'abscisse sur le filet liquide

\mathbf{k} coefficient de perméabilité, unité m/s.

Cette loi suppose que l'écoulement est laminaire et que le milieu poreux saturé est isotrope, homogène.

Ainsi deux systèmes sont couramment utilisés pour exprimer cette loi:

$$k_i = \frac{V\eta L}{tS\Delta P} \quad (8)$$

avec:

η = viscosité dynamique de l'eau

V = volume d'eau infiltré

S = section de la carotte à travers s'écoule l'eau

t = temps d'infiltration du volume V

L = distances entre les sections extrêmes de la carotte

ΔP = différence de pression appliquée à la carotte

Dans l'essai au perméamètre et dans le cas d'un essai à une dimension:

$$K = \frac{VL}{tS\Delta H} \quad (9)$$

avec:

$V = m / \rho$

$S = \pi d^2 / 4$

ΔH = pression en équivalent mètre d'eau

Les essais de perméabilité ont été réalisés au LRPC d'Autun.



Figure 6: Perméamètre

Dans un premier temps, la perméabilité de la couche de surface étant totalement inconnue - en tout cas, supposée faible-, il était nécessaire de prévoir une gamme de pressions d'injection d'eau assez hautes. Un essai de perméabilité préliminaire a donc été réalisé avec la carotte n°1 (classique) sur le dispositif "haute pression" 0.2 MPa, alimenté à l'eau du robinet. L'essai ayant montré que la carotte se laissait facilement traverser par l'eau et que quelques minutes seulement ont suffi à faire passer 4 litres d'eau, c'est-à-dire la quantité nécessaire pour l'ensemble des analyses chimiques, nous avons décidé de changer de dispositif pour appliquer des pressions plus basses ainsi qu'utiliser un circuit hydraulique chimiquement inerte avec de l'eau distillée.

Un second essai a été réalisé sur la carotte n°1 (classique) afin d'évaluer la nouvelle durée de l'essai (plusieurs heures) et comparer les valeurs de perméabilité. L'essai étant cette fois trop long, les carottes n° 4, 6, 8 ont été testées sur le premier dispositif, avec de l'eau distillée.

La durée du stage étant assez courte, et le nombre de carotte très limité, nous avons décidé que dans une première étape, un seul essai de perméabilité serait réalisé par carotte.

Déroulement de l'essai

Une fois les carottes sciées en face inférieure pour n'étudier que les couches de surface (BBMa +BBSG) et après avoir réalisé l'essai au banc gamma, les éprouvettes sont saturées en eau. Les différentes pesées avant et après immersion dans l'eau, permettent d'en déduire le **pourcentage de vides communicants -VC**.

$$\text{VC} = \text{volume de vides de l'éprouvette rempli par l'eau} / \text{volume de l'éprouvette}$$

Pour ne pas fausser les résultats des analyses chimiques ultérieures, l'installation est préalablement rincée à l'eau distillée. En outre, l'eau distillée de la mise en saturation est réemployée dans le perméamètre pour récupérer les particules éventuellement dissoutes lors de la saturation.

La détermination de la **perméabilité** pour chaque pression appliquée (3 à 4 mesures pour chacune des trois pressions comprises entre 0 et 2 bars), se fait en relevant la masse d'eau percolée, en fonction du temps. L'eau traverse de bas en haut la couche de roulement BBMa puis la couche de liaison BBSG.

On reporte les valeurs de perméabilité en fonction de la pression sur un graphe logarithmique; la courbe obtenue est théoriquement une droite: la perméabilité évaluée à l'aide de la loi de Darcy, décroît linéairement en coordonnées logarithmiques lorsque la pression augmente. La pente de la droite est variable suivant le réseau poreux étudié.

L'exploitation finale des mesures est une estimation de la perméabilité ramenée par interpolation à une pression commune 0.1MPa; en effet la perméabilité de l'éprouvette testée est une caractéristique intrinsèque du réseau poreux qu'elle représente; elle devrait donc être une constante indépendante de la différence de pression appliquée aux extrémités de la carotte, mais cette condition est difficile à obtenir lors de l'expérience.

ANNEXE 4.A : LISTE DES MESURES EFFECTUEES

L'ensemble des étapes de préparation, suivi du chantier et suivi de la RN76 en service, pour les besoins de l'expérimentation, est listé ci-dessous.

Préparation du chantier

Recherche chantier

Mesures des dégradations de surface

Mesures des déformations verticales

Mesures des épaisseurs des couches de l'ancienne chaussée

Mesure de la pénétrabilité du liant de l'ancien BBSG, à partir de carottes prélevées sur l'ancienne chaussée

Mesure de la température bille et anneau de l'ancien BBSG, à partir de carottes prélevées sur l'ancienne chaussée

Planche de fraisage de référence

Mesures des épaisseurs moyennes et des dispersions, à partir du carottage de l'ancienne chaussée

Mesure de la vitesse d'avancement de la fraiseuse

Mesure des épaisseurs fraisées

Mesure de la granularité (tamis de 20 et 25 mm) des fraisats obtenus dans la phase sélective

Mesure des longueurs de chaque modalité pour implanter les capteurs de récupération d'eau

Caractérisation environnementale des fraisats

Mesures de la teneur en polluants des fraisats obtenus à partir de la planche de référence

Etudes de formulation

Mesure de la granularité des granulats naturels 0/2, 2/6 et 6/10

Mesures de masses volumiques réelles du sable et des gravillons

Mesures de la granularité des fraisats

Mesure de la teneur en liant des fraisats

Mesure de la masse volumique réelle des fraisats

Mesures des caractéristiques du liant ancien des fraisats (pénétrabilité, TBA)

Mesure des caractéristiques du liant d'apport prévu (pénétrabilité, TBA)

Mesure du pourcentage de vides de la formule de référence

Mesure du pourcentage de vides de la formule avec 10 % de fraisats

Mesures, sur la formule avec 20% de fraisats des :

- pourcentages de vides
- tenue à l'eau
- performances mécaniques : orniérage et traction directe

Mesures, sur la formule avec 30% de fraisats des :

- pourcentages de vides
- tenue à l'eau

- performances mécaniques : orniérage et traction directe

Calibrage de la centrale de fabrication

Mesures des masses débitées et des temps de fonctionnement pour les éléments suivants :

- Doseur à sable
- Doseur à gravillons 2/6
- Doseur à gravillons 6/10
- Table de pesée
- Compteur à bitume

Suivi du chantier

Fraisage de la chaussée

Mesure de la vitesse d'avancement de la fraiseuse

Mesure de la profondeur de passe de la fraiseuse

Mesure de la granularité des fraisats pour les réglages du fraisage sélectif

Mesure du bruit de la fraiseuse en fonction des conditions de fonctionnement

Mesure de la consommation totale de la fraiseuse (plein en début de l'expérimentation et complément en fin)

Mesure de l'usure des dents de fraisage (pesée des dents entre le début et la fin du fraisage)

Mesure du temps de fonctionnement de la fraiseuse, pour chaque condition de fonctionnement

Balayage de la chaussée

Mesure du temps de fonctionnement total de la balayeuse (pour les quatre fabrications)

Mesure de la consommation totale de la balayeuse (plein en début de l'expérimentation et complément en fin)

Estimation de la charge de la balayeuse avant évacuation des déchets dans un stock temporaire

Mesure du bruit de fonctionnement de la balayeuse

Répandeuse pour couche d'accrochage

Mesure du temps de fonctionnement total de la répandeuse (pour les quatre fabrications)

Estimation de la consommation totale en carburant de la répandeuse (pour les quatre fabrications)

Estimation de la consommation totale en gaz de la répandeuse (pour les quatre fabrications)

Mesure du bruit de fonctionnement de la répandeuse

Fabrication des enrobés : pour chaque fabrication

Mesure des temps de fabrication

Mesure des teneurs en eau des constituants, sable, 2/6, 6/10 et fraisats

Mesure de la granularité de chaque constituant : sable, 2/6, 6/10 et fraisats

Mesures des caractéristiques du liant d'apport (pénétrabilité et TBA)

Mesures, avec le module Adline des paramètres suivants :

- débit sable
- débit 2/6
- débit 6/10
- débit fines d'apport

- débit granulats sur table de pesée
- débit fraisats
- débit bitume d'apport
- température des enrobés
- température du bitume d'apport
- cadence horaire

Mesure de la consommation en gaz naturel (relevé compteur à gaz centrale)

Mesure de la pression d'alimentation du gaz naturel

Mesure de la température ambiante

Mesure de la consommation électrique (relevé compteurs électriques centrale)

Mesure des quantités d'enrobés livrés sur le site RN 76 (Bascule de pesée)

Mesures des conditions météorologiques (température ambiante, degré hygrométrique, pression atmosphérique, vent)

Mesures dans les gaz à la sortie de la cheminée de :

- la teneur en oxygène
- la teneur en CO₂
- la teneur en NO_x
- la teneur en COT
- la vitesse des gaz (tube de Pitot)
- la température
- la teneur en eau (piégeage par condensation)
- la teneur en particules solides (opacimètre)
- la teneur en HAP (analyses en laboratoire sur prélèvements dans les gaz)

Mesure de la dépression au nez du brûleur (automate centrale)

Mesure de la position de la vanne d'injection du gaz naturel (automate centrale)

Mesure de la position du registre (automate centrale)

Mesure de la composition des enrobés fabriqués (courbe granulométrique et teneur en liant)

Mesure des caractéristiques du liant récupéré à partir des enrobés fabriqués

Mesure sur l'enrobé fabriqué de :

- pourcentages de vides
- tenue à l'eau
- résistance à l'orniérage
- caractérisation des performances mécaniques par essai de traction directe
- caractérisation des performances mécaniques par essai de module complexe
- essai de fatigue

Mesure du temps de transfert des enrobés de la centrale au site de mise en œuvre (disque camion)

Estimation de la consommation des camions

Estimation du temps de travail du chargeur de la centrale

Estimation de la consommation du chargeur de la centrale

Mise en œuvre des enrobés

Mesure de la longueur de chaque modalité pour respecter les 150 m prévus

Mesure du temps de fonctionnement du finisseur

Mesure de la consommation totale en carburant du finisseur (plein en début d'expérimentation et complément en fin)

Estimation de la consommation en gaz propane du finisseur

Mesure du bruit de fonctionnement du finisseur

Mesure de la température de l'enrobé à la mise en œuvre

Mesure des émissions diffuses dues à l'enrobé chaud :

- teneur en COT
- teneur en HAP (analyses en laboratoire sur prélèvements dans les gaz)
- odeur (analyses en laboratoire sur prélèvements dans les gaz)
- température des plaques d'enrobés utilisées avec la chambre à flux
- du temps de préparation de la chambre à flux avant analyses

Compactage des enrobés

Mesure du temps de fonctionnement, pour chaque modalité, de chaque compacteur

Mesure de la consommation totale en carburant de chaque compacteur

Mesure de la consommation en eau du compacteur vibrant

Mesure du bruit de fonctionnement de chaque compacteur

Mesure du pourcentage de vides sur l'enrobé chaud (GDF 30)

Mise en œuvre couche de roulement

La couche de roulement n'a pas fait l'objet de mesures spécifiques à l'expérimentation.

Suivi de la RN 76 en service

Suivi du chantier

Mesure de la macrotecture du revêtement (suivi des caractéristiques des enrobés en place)

Mesures des masses volumiques avec le GMPV

Mesures des perméabilité sur carottes prélevées sur la chaussée reconstruite (essai labo)

Mesure des polluants obtenus à partir de l'eau récupérée lors de l'essai labo de perméabilité

Mesures, pour chacun des capteurs de récupération, des volumes d'eau percolant à travers la chaussée, et ce pour chaque événement pluvieux

Mesure du volume d'eau recueillie dans le pluviomètre installé en rive de chaussée

Mesures en labo des polluants contenus dans les eaux de percolation

ANNEXE 4.B : TECHNIQUES DE MESURES DES EMISSIONS CANALISEES DE LA CENTRALE D'ENROBAGE

Les gaz rejetés en cheminée (Figure 7) sont chauds et chargés de composés qui condensent à la température ambiante. Il était donc nécessaire de préparer l'échantillon (filtration, déshydratation, dilution) pour que la composition de cet échantillon reste inchangée entre le point de prélèvement et l'unité analytique.

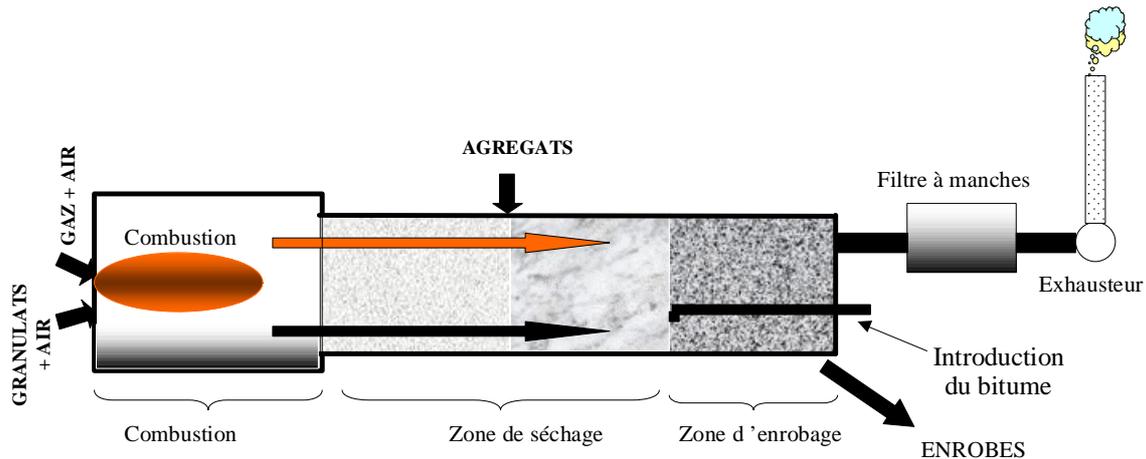


Figure 7. schéma du tambour sécheur enrobeur

Les principes de mesures utilisés pour évaluer les rejets en cheminée et les méthodes générales d'analyses sont récapitulés dans le Tableau 25.

Emplacement du prélèvement	Mesures en continu par analyseurs spécifiques		Mesures par échantillonnage des gaz	
	Paramètres	Type d'analyseur	Paramètres	Type d'analyse
Dans la cheminée au niveau de la bride normalisée	O ₂	Paramagnétique	COV	GC-MS
	CO ₂	Infra-rouge		
	NO _x	Chimiluminescence	HAP	GC-MS
	COT	F.I.D.	Vitesse	Tube de Pitot
	Température	Thermocouple	Teneur en eau	Méthode gravimétrique
	Poussières	opacimètre		

Tableau 25. Principes de mesures

Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : Les HAP sont échantillonnés à la température des gaz prélevés par filtration des rejets gazeux sur un filtre en fibre de quartz et adsorption des HAPs volatils sur une résine adsorbante XAD2. L'ensemble est alors expédié vers le laboratoire dans une glacière. Ils sont ensuite extraits au laboratoire puis concentrés et purifiés avant d'être analysés par chromatographie en phase gazeuse équipée d'un détecteur de masse.

Composés organiques totaux (COT) : La méthode de prélèvement des COT suit les prescriptions de la norme NF X 43-301. Celle-ci consiste à acheminer une fraction de l'effluent gazeux au travers d'une sonde, munie d'un filtre en céramique et d'une ligne de transfert chauffés à plus de 150°C vers un Détecteur à Ionisation de Flamme (FID). Les composés organiques injectés dans la flamme alimentée par un brûleur induisent un état d'ionisation dont on peut déduire une intensité proportionnelle à leur concentration. Pour la mesure du carbone organique total, le calibrage de l'analyseur ayant été réalisé avec du propane, les valeurs obtenues sont normalement en équivalent propane. On admet conventionnellement (Norme NF X 43-550) l'équivalence suivante : 1 ppm équivalent propane = 1,61 mg/m³ équivalent Carbone. Les valeurs finales ont donc été exprimées en équivalent carbone (unité masse C par m³ ou par h). En parallèle, une ligne d'échantillonnage chauffée amène le gaz filtré vers un système de conditionnement : le gaz est refroidi, asséché puis est analysé de façon à déterminer sa concentration en oxygène, dioxyde de carbone et oxydes d'azote.

Dioxyde de carbone (CO₂), Oxyde d'azote (NO_x) et Oxygène (O₂) : Sur les gaz de cheminée conditionnés, des mesures in situ sont réalisées en continu avec :

- un analyseur infrarouge pour mesurer la teneur en dioxyde de carbone (le principe repose sur l'absorption d'un faisceau de radiations I.R. non dispersé) ; la norme de référence étant la X 20 380 ,
- un analyseur à chimiluminescence pour déterminer la teneur en oxydes d'azote (NO + NO₂ exprimé en NO₂) ; l'émission de lumière résultant de la réaction de chimiluminescence est directement proportionnelle à la concentration de NO₂ et la norme de référence est la NF X 43 018,
- un analyseur paramagnétique pour déterminer la teneur en oxygène (basé sur la propriété paramagnétique de la molécule d'oxygène pour en mesurer la concentration).

Particules solides : Un opacimètre, installé à poste fixe dans la cheminée de la centrale, mesure la réflexion de la lumière sur les poussières et, ainsi, le signal électrique enregistré croît proportionnellement à la charge en poussières du courant gazeux. On rappelle que l'envol des particules solides est conditionné par la vitesse des gaz à l'intérieur du sécheur et par la teneur en eau des granulats. Les particules envolées lors du processus de séchage sont en quasi totalité (seuil d'émission à l'atmosphère à respecter) récupérées par le système de dépoussiérage et donc la variation de la concentration à la sortie du sécheur devrait être, si le dépoussiéreur est en bon état de marche, sans grande conséquence sur les rejets par la cheminée. Par ailleurs, une part importante des émissions de poussières n'est pas canalisée, ni traitée ici. Elle provient essentiellement des envols lors de la manutention des matières premières traitées, de la circulation sur les voies de la centrale et du stockage.

En l'absence de définition officielle permettant de classer en fonction de la taille les constituants solides soumis à l'étude, nous considérerons :

- le terme de particules solides comme expression générique pour désigner tous les constituants solides qui transitent par le système de dépoussiérage de la centrale d'enrobage,
- le terme de poussières pour désigner la part des particules précédentes qui va être rejetée à l'atmosphère. Les poussières sont donc de taille inférieure à celle des particules.

ANNEXE 4.C TECHNIQUES DE MESURES DES EMISSIONS DIFFUSES DE L'ENROBE MIS EN ŒUVRE

Présentation du contexte

La mise en œuvre d'un enrobé chaud comprend le répandage de cet enrobé sur la chaussée et son compactage. Le compactage, destiné à obtenir le pourcentage de vides requis, est obtenu par des passages répétés d'un ou deux compacteurs sur toute la surface de l'enrobé mis en place. Ce compactage ne permet pas de laisser à poste fixe la chambre à flux. D'où, il faut soit différer l'intervention des compacteurs assez longtemps pour permettre d'achever les prélèvements de gaz, soit enlever la chambre à flux à chaque passage de compacteur et la remettre en place aussitôt après, ce qui induit plusieurs périodes de prélèvements. Afin de permettre le passage du compacteur puis l'étude de plages de mesures discontinues, le principe d'une chambre légère et amovible a été retenu. En outre, on a privilégié un encombrement réduit du capteur pour qu'il soit positionnable en rive de chaussée.

D'autre part, on pouvait penser, en l'absence de données existantes, que le niveau de température de l'enrobé et son évolution au cours du compactage conditionnent le flux de gaz émis, celui-ci étant rapidement décroissant après le répandage. Il convenait donc de définir la durée de prélèvement permettant de prendre en compte la majeure partie du flux émis tout en déplaçant le capteur très rapidement. Un démontage rapide des différents éléments du capteur nécessaires à la caractérisation des gaz et odeurs était donc souhaitable. Selon ces principes, le capteur conçu comportait une chambre à flux connectée à une chaîne de mesures (appareillages de la SODAE). Ainsi :

- la géométrie de la chambre à flux a été choisie arbitrairement pour qu'elle offre une maniabilité satisfaisante et que les mesures en conditions confinées soient effectuées au plus près de l'enrobé,
- le matériau constitutif de la chambre ne devait pas non plus être potentiellement odorant pour ne pas fausser les mesures d'odeurs,
- enfin, un raccord à un système de ventilation extérieur a été prévu dès la conception du système afin de permettre, si nécessaire, un contrôle des conditions de réalimentation en air frais.

Dispositif et principes de mesure développés

Compte tenu des contraintes précitées, une première phase a consisté à développer un dispositif de mesures adapté, puis à valider une méthode réaliste de prélèvements sur chantiers.

La chambre à flux et sa chaîne d'acquisition

Une chambre à flux constituée d'un demi fût de 200 l coupé dans sa longueur (Figure 8), de section 0,87m (longueur) par 0,55m (diamètre) a été réalisée. Ce demi cylindre métallique, dont les parois intérieures ont été nettoyées de manière à ne pas causer d'émissions parasites, dispose d'une sortie ϕ 100 mm destinée à raccorder un système de ventilation forcée et une ouverture de ϕ 50 mm destinée à raccorder les prises d'échantillons. La surface totale d'émission caractérisée est égale à la section longitudinale de la chambre à flux.

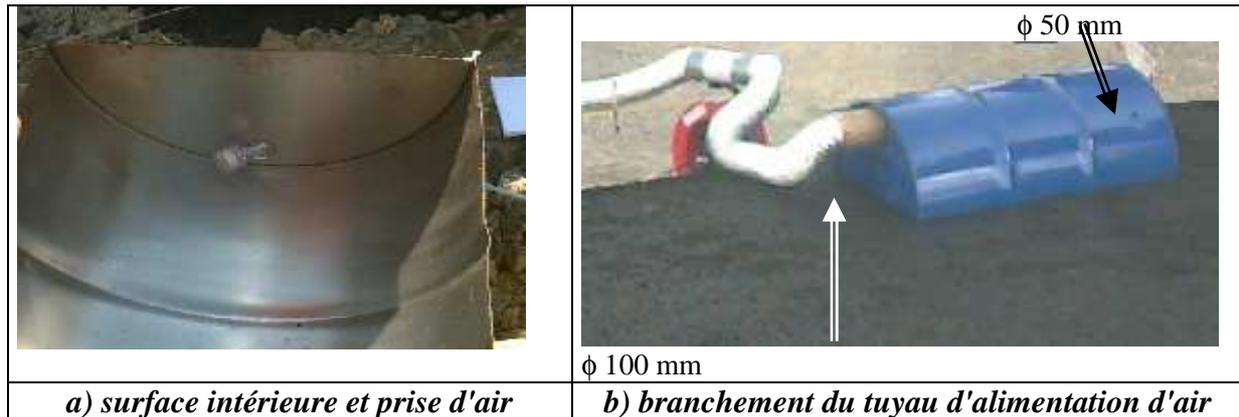


Figure 8. Présentation de la chambre à flux

La chaîne de mesures visait à quantifier :

- la composition des émissions gazeuses en COT (composés organiques volatils) en continu,
- la composition des émissions gazeuses en HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), après échantillonnage et piégeage sur des filtres puis analyses différées en laboratoire,
- le flux d'odeur émis, après stockage des échantillons dans des sacs adaptés et analyse olfactométrique dans les 24 h par un jury de « nez ».

Pour effectuer les différentes mesures et prélèvements, la prise d'aspiration de l'analyseur de gaz a été placée sur une paroi latérale de la chambre à flux, comme le montre la Figure 9, à environ 15 cm de la surface de l'enrobé. L'ensemble de la chaîne de mesure et d'échantillonnage comprenait donc: un analyseur de gaz (F.I.D.) pour les COT, une poche de stockage pour les analyses en différé d'odeurs et de HAP, un thermomètre pour la mesure de la température des gaz, un anémomètre pour la mesure de la vitesse de l'air permettant d'évaluer le débit d'air et de modifier si besoin la dilution des échantillons prélevés.

Toutes les mesures et prélèvements sur les rejets polluants sont effectués en sortie de la chambre à flux, compte tenu du sens de circulation de l'air. L'analyseur et la poche de stockage sont donc directement connectés sur la prise prévue en sortie de chambre. L'air insufflé à l'intérieur de la chambre a été apporté à partir d'un petit groupe d'extraction (matériel domestique) travaillant à vitesse constante selon une courbe unique pression-débit. Ce type d'extraction étant très sensible à la perte de charge du circuit, il était indispensable de minimiser l'effet de tous les éléments susceptibles d'influencer le débit d'air (coude, variation de section..), donc de perturber les résultats de mesure. Le capteur est raccordable rapidement à la chaîne de mesure par la prise de diamètre 100 mm (ventilation forcée), à l'entrée de la chambre, et par les prises d'aspiration pour l'analyseur de COT et le remplissage de la poche (prélèvements).

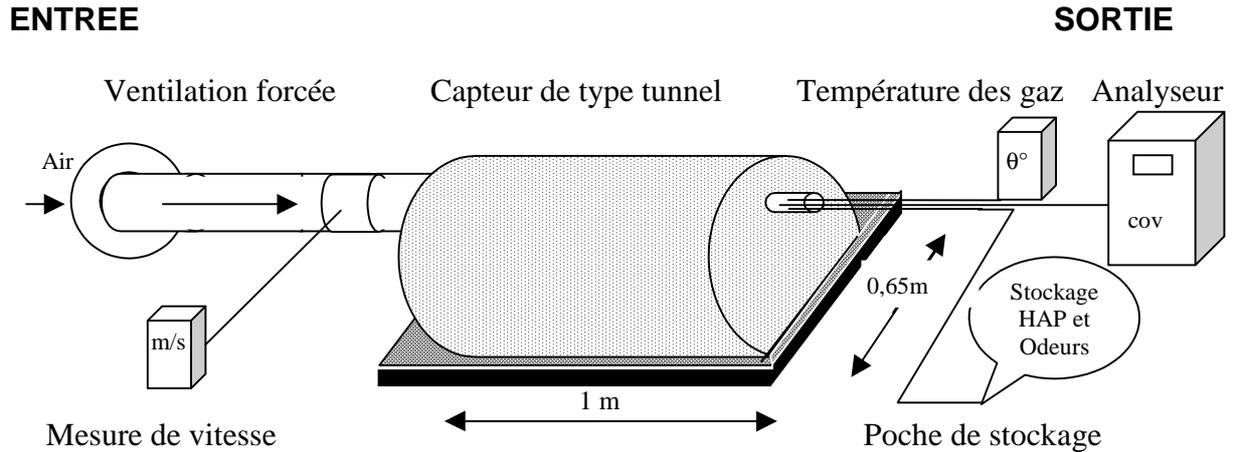


Figure 9. chambre à flux et sa chaîne de mesure sous ventilation forcée

Le principe des mesures avec la chambre à flux

Le débit d'air a été réglé à partir d'une dérivation placée en amont de la mesure de vitesse (Figure 9) et permettant de diriger tout ou partie de l'air aspiré dans la conduite menant au capteur. Ce réglage a été réalisé à partir de la vitesse des gaz mesurée à l'intérieur de la canalisation avec l'anémomètre. Le diamètre de cette conduite étant de 100 mm, la vitesse d'environ 0,7m/s a permis de disposer d'un débit maximum de 20 m³/h pour la ventilation forcée. Le réglage a été effectué avant l'installation de la chambre sur l'enrobé. La canalisation située entre le groupe d'extraction et la chambre à flux devait être aussi rectiligne que possible pour éviter les pertes de charge parasites.

La mesure de température des gaz s'effectue quant à elle avec un thermocouple type K au niveau de la prise d'aspiration, à environ 10 cm de la sortie des gaz, et à 15 cm de la surface de l'enrobé chaud. La prise d'échantillon et les mesures des COT et de la température ont commencé dès les raccordements terminés.

La concentration en COT comme la température peuvent être enregistrées avec une fréquence d'échantillonnage d'une mesure par minute, contrairement au stockage dans la poche qui, compte tenu du volume à remplir d'environ 80 litres, est prévu de manière continue pour 50 minutes.

Le dispositif permet également de quantifier en ambiance confinée (sans ventilation forcée) l'émission surfacique du milieu émetteur, l'enrobé, la ventilation forcée n'étant pas une condition indispensable de fonctionnement du capteur. La variation du débit d'air de la ventilation forcée est un des réglages qui a été étudié au cours d'une phase de tests préliminaires. Le réglage du débit d'air de quelques m³/h à 20 m³/h permet d'agir sur le phénomène de dilution. En fonction de la durée de mesure choisie, si l'on modifie le débit d'air, on influe bien évidemment sur le flux de polluants, grandeur à déterminer in fine pour procéder à l'analyse du cycle de vie de la chaussée.

Application des principes de mesure en vraie grandeur

Mesures sur une chaussée en vraie grandeur dans le cadre d'un chantier hors circulation, le chantier RD2.

Une série de mesures préliminaires a tout d'abord été effectuée sur un chantier routier dans des conditions aisées de mesure, c'est à dire hors circulation. Cette phase préliminaire a été organisée afin de se mettre dans des conditions réelles, c'est à dire en intégrant: la présence d'au moins un compacteur et ses allers-retours sur l'enrobé, le manque de place en rive pour poser les instruments de mesure et d'échantillonnage des gaz connectés au capteur.

Le chantier de la RD 2 en Bretagne (région Rennaise) a été choisi en raison des impératifs de dates de ces essais préliminaires, de sa relative proximité avec les locaux de SODAE et du fait qu'il était réalisé hors circulation et concernait une chaussée en pleine largeur, donc dans des conditions opératoires plus faciles pour la SODAE que celles prévues pour le chantier de Blois. Il convenait également de préciser les conditions de répannage de l'enrobé sur la chaussée. Quelques précisions techniques sont données ci-dessous.

Conditions de mesure sur enrobé comparativement à celles de la RN76

L'épaisseur d'enrobé sur ce chantier était de 13 cm, contre 7 cm prévus pour celui de la RN76 tandis que le liant (35/50), la teneur en liant ainsi que la température de répannage (135 à 160 °C) étaient identiques à celles prévues pour le chantier de Blois. De plus, cette épaisseur importante, a permis lors de cette phase d'essais préliminaires d'attendre plus de vingt minutes entre le passage du finisseur et celui du compacteur afin de permettre à SODAE d'effectuer ses mesures.

Outre les conditions de mesure, il s'agissait également de retenir de cette campagne les éléments d'organisation décisifs en perspective du chantier RN76 en tenant compte des éléments ci-dessous :

- mise à disposition d'un groupe électrogène de 2500 Watts,
- utilisation d'un FID portatif moins précis qu'un appareil de laboratoire.
- minimisation de l'encombrement de l'instrumentation en rive,
- Positionnement du capteur au plus près de la rive avec l'entrée d'air perpendiculaire à la chaussée et les raccords entre chambre et chaîne de mesures devant être assez longs pour poser les boîtiers en rive,
- minimisation du temps de mesure pour laisser place au compacteur dès que possible, les conditions de mesure étant à définir sur place (vitesse, débit, durée pour avoir des grandeurs mesurables).

Réalisation des mesures

La SODAE avait prévu de mesurer, sous ventilation forcée, les concentrations émises en surface par l'enrobé pendant 1 à 2 heures afin d'obtenir la courbe :

$COT(\text{totaux}) = f(t)$.

On estimait alors, à partir d'une telle courbe, être en mesure de définir la durée de prélèvement pour le chantier de Blois, qui permettrait d'avoir une bonne représentativité des émissions surfaciques. Par ailleurs, il était prévu de prélever des aérosols et des gaz en sac afin de vérifier que l'analyse différée du contenu du sac permettrait bien de déceler et quantifier différents composés.

Pour effectuer les mesures, la chambre à flux a été posée sur l'enrobé tout juste répandu et maintenue en place pendant toute la durée du prélèvement. Le ventilateur externe soufflait

dans le capteur, à raison de 20 m³/h environ (réglages choisis), de l'air prélevé à environ 2m du sol et soumis au vent ambiant. A l'autre extrémité du capteur, côté prise d'échantillon, était placée une sonde reliée à l'analyseur FID permettant de mesurer la concentration en COT. La Figure 10 montre les conditions de mesure avec le capteur durant cette phase préliminaire. Plusieurs essais ont été successivement réalisés pour tester l'ordre de grandeur des valeurs mesurées en continu et leur reproductibilité.



Figure 10. Mesures préliminaires avec le capteur, après répandage de l'enrobé.

Analyse des résultats des essais préliminaires

La donne l'évolution des émissions de COT obtenues au cours du premier essai. Le calibrage de l'analyseur FID étant effectué au moyen d'un mélange gazeux de concentration connue de méthane, le résultat est exprimé en équivalent CH₄. Cet essai n'a pas été mené très longtemps en raison d'un problème sur l'appareil. Sur les 20 minutes de suivi de la concentration, on a noté que la concentration augmentait jusqu'à atteindre un palier de 40-50 ppm équivalent CH₄. D'après la courbe en Figure 11, au bout de ce laps de temps, les émissions de gaz n'avaient toujours pas diminué. Cette dernière caractéristique obtenue en ventilation forcée était importante à situer au cours de l'intervalle de mesure, afin de s'assurer de l'obtention d'un maximum des émissions dans la plage considérée et donc de bien analyser les phénomènes.

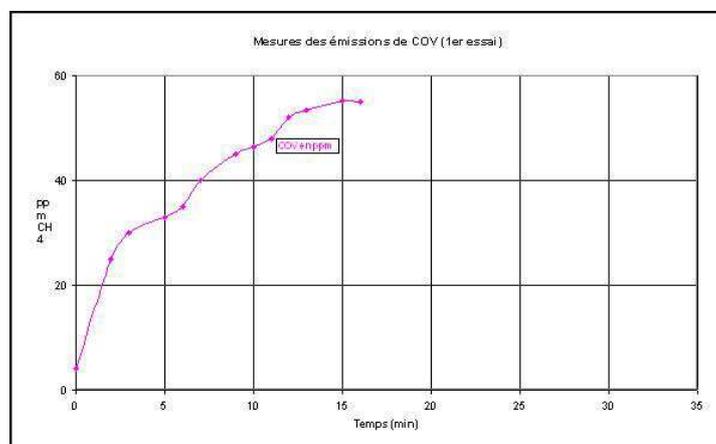


Figure 11. Mesures de COT effectuées avec FID portatif-Chantier RD2.

Un deuxième essai a ensuite été effectué et comportant en parallèle la mesure des COT et l'échantillonnage de gaz et aérosols, sur une durée totale de $\frac{3}{4}$ d'heures. Pendant cet essai, la température du gaz en sortie de capteur a été également relevée. La Figure 12 montre l'évolution de cette température au cours du temps pour la plage de mesures. La température des gaz ne varie pratiquement pas durant 30 minutes et reste comprise entre 90 et 80 °C.

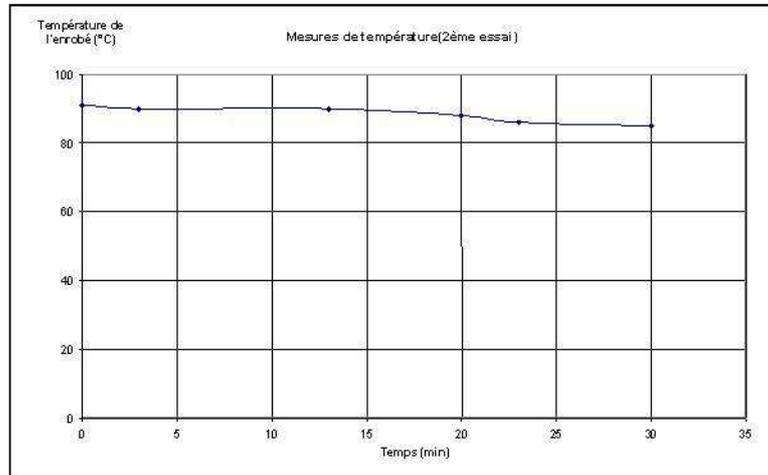


Figure 12. Mesures de température de l'enrobé- Chantier RD2.

Par contre, durant la même période de mesure que celle de la température, et contrairement aux résultats du premier essai, l'analyse en continu des COT n'a pas permis de déceler leur présence à des teneurs supérieures à quelques ppm, c'est à dire trop faibles pour être exploitables. Les échantillons de gaz et aérosols prélevés dans le sac ont été ramenés au laboratoire de la SODAE pour être traités et analysés. Après analyse, il a été conclu que le filtre était resté totalement propre, ne montrant aucun dépôt visible d'aérosols, ni d'autres types.

Essais préliminaires au LCPC sur mini-planches d'enrobé de la RD2

Préparation des minis-planches

Lors du chantier RD2 des prélèvements d'enrobé ont été effectués à la centrale d'enrobage. La couche d'enrobé du chantier a été reproduite grâce à une plaque d'enrobé réalisée dans un moule de dimensions : 1m par 0,65m par 0,07m d'épaisseur. Le choix des dimensions a ainsi permis d'avoir une surface au sol suffisante pour poser la chambre à flux et également de travailler directement avec l'épaisseur à mettre en œuvre sur la RN76. Pour chaque essai, nous avons procédé de manière identique, selon le processus présenté sur la Figure 13.

L'enrobé, stocké dans des fûts de 22 litres fermés hermétiquement, a été étuvé à 160°C la veille de l'essai. La quantité d'enrobé servant aux vérifications n'ayant pas une importance capitale à ce stade, chaque planche d'essai a été élaborée à partir du contenu total de chaque fût, soit environ de 50 kg d'enrobé. Cet enrobé a été mis en place à l'extérieur, donc à l'air libre, sur une surface préalablement balayée. Un moule de dimensions 1m x 0,65m a été spécialement confectionné pour cette série de mini-planches. Pour favoriser la rapidité de la mesure, l'enrobé a été versé en une fois dans le moule, étalé à la pelle et grossièrement compacté à la règle de manière à en aplanir correctement la surface. Immédiatement après, la chambre à flux munie de sa prise d'aspiration a été posée sur l'enrobé, et l'analyseur FID et la prise de température des gaz mis en service aussitôt.

La mesure des COT a cette fois été effectuée avec un analyseur par ionisation de flamme FID de SODAE mais cette fois de laboratoire (équipement lourd), disposant d'une résolution plus grande que le modèle portatif utilisé sur le chantier RD2. La mesure de la température des gaz sous le capteur a été effectuée en parallèle avec un thermomètre numérique.

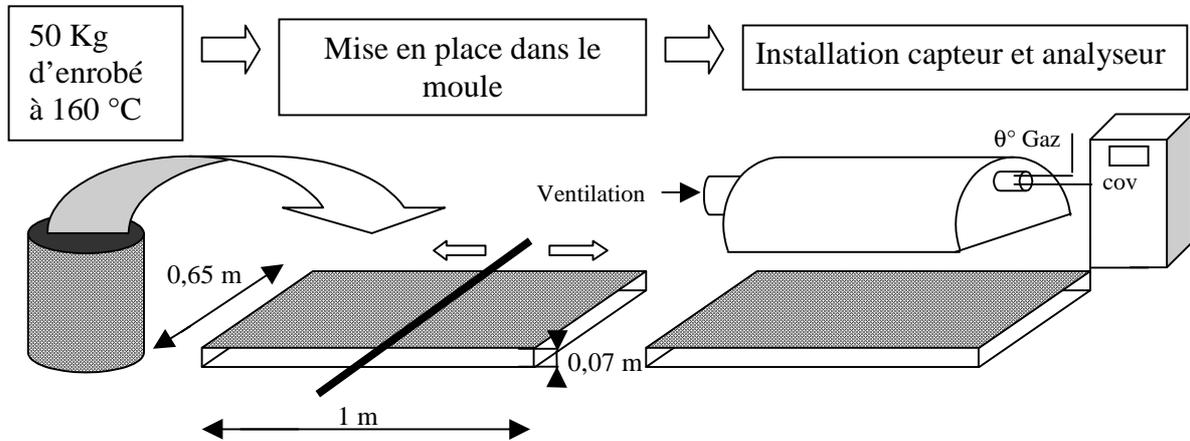


Figure 13. Principe de mise en œuvre des minis-plates

Méthode de test des fonctionnalités du capteur

Les essais préliminaires sur chantier RD2 n'ayant pas permis de conclure sur le réglage et l'influence de la ventilation forcée dans la chambre à flux, ce problème a cette fois été étudié en détail. Pour analyser les effets de la dilution inhérents à la ventilation, l'organisation des essais réalisés en laboratoire a ainsi été la suivante :

- mesure des COT en continu sous la chambre à flux, sans réalimentation forcée par ventilation d'air,
- mesure des COT sur le même corps d'épreuve d'enrobé, après purge de la chambre (soulevée une fois et remise sur la planche),
- mesure des COT à l'air libre, sans chapeautage de l'enrobé par la chambre,
- mesure des COV en continu sous la chambre, avec réalimentation forcée.

Une analyse préalable de COT pratiquée dans l'air ambiant a donné une concentration dans l'air ambiant proche de 0 ppm. Les résultats obtenus dans les conditions mentionnées ci-dessus sont détaillés ci-après dans l'ordre chronologique.

Mesure des COT en continu sous le capteur, sans réalimentation forcée en air

Le premier essai a été réalisé en ambiance confinée selon le schéma de principe présenté en Figure 14, sans ventilation d'air pour obtenir un ordre de grandeur avec une dilution minimale des gaz et rejets. La prise de ventilation forcée a été obturée. Parallèlement, une partie du flux gazeux a été prélevé dans la poche prévue pour le stockage d'échantillons gazeux destinés à la quantification en laboratoire des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des odeurs. Il s'agissait d'abord d'évaluer l'ordre de grandeur des COT émis pour la configuration choisie et de définir un temps de prélèvement compatible avec le remplissage de la poche. Le temps de prélèvement, de l'ordre de 40 minutes, tenait compte de la durée totale de fabrication du chantier RN76 (1 heure) et de la période de stabilisation de la fabrication. Le débit de l'analyseur de COT était de 70 l/h, celui du remplissage de la poche de 60 l/h; ces débits étant imposés par l'appareillage utilisé.

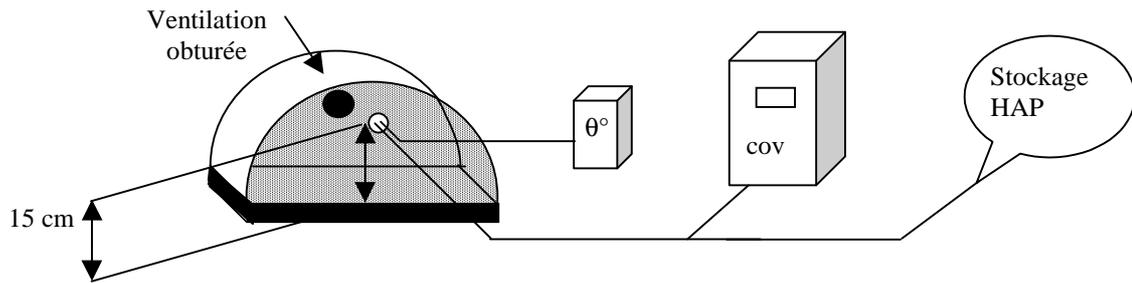


Figure 14. Principe des prélèvements avec le capteur sans ventilation d'air

Les évolutions de la concentration en COT et de la température des gaz mesurées sous le capteur (mesure toutes les minutes) sont représentées sur la Figure 15. La teneur en COT augmente pendant environ les 5 premières minutes, ce qui correspond à la saturation de l'air contenu sous le capteur, et chute après 6 minutes de prélèvement. Pour la température des gaz, qui est le reflet d'un remplissage du capteur avec les émanations gazeuses chaudes de l'enrobé, la montée en température dure environ 10 minutes. Il convient de noter que cette information est susceptible d'être perturbée par les conditions météorologiques (ensoleillement). En effet, la mesure s'effectuant à l'extérieur, le soleil peut intervenir de façon sensible sur la surface métallique du capteur. Ce phénomène a d'ailleurs été observé vers la 21^{ème} minute où la présence du soleil a fait remonter de 1 à 2 °C la température mesurée.

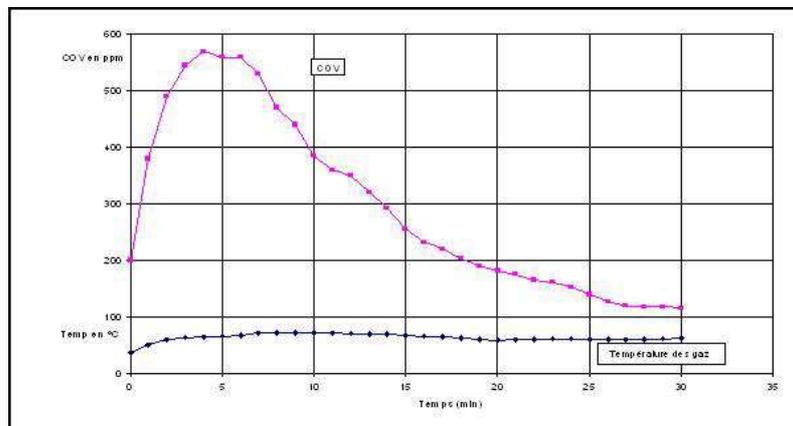


Figure 15. Concentration en COT et température mesurées sans ventilation d'air

D'autre part, le volume total de gaz prélevé (poche et analyseur) sous le capteur a été d'environ 65 litres pour les 30 minutes de mesure. Or, la contenance de ce capteur est d'environ 120 litres. L'essai s'est donc déroulé avec un renouvellement d'air extérieur (renouvellement par passage d'air au niveau du contact non étanche entre capteur et enrobé) de l'ordre de la moitié du volume du capteur. A titre indicatif, la température de l'enrobé de cette mini planche était d'environ 100°C en début de mesure et de 70°C après 30 minutes.

Mesure des COT sur le même corps d'épreuve, après purge du capteur

Pour estimer la reprise potentielle d'émission polluante, nous avons répété la séquence précédente après avoir soulevé le capteur pour obtenir un renouvellement complet en air

extérieur. Après cette purge, d'une durée de 3 minutes, nous avons procédé de nouveau aux mesures de COT et de températures (gaz et enrobé), mais pas à l'aspiration dans la poche de stockage. La température de l'enrobé est passée de 70°C au début à 60 °C après 15 minutes. Les résultats concernant la concentration en COT et la température des gaz sous le capteur sont représentés sur la Figure 16. Compte-tenu de la mesure de départ dans l'air ambiant (0 ppm), il existe effectivement une reprise limitée d'émission de l'enrobé qui se trouvait à une température d'environ 70°C l. La décroissance des COT émis reprend après environ 4 minutes, l'air confiné à l'intérieur du capteur s'étant saturé de nouveau très vite. La température des gaz est maximale aussi après 4 minutes et baisse ensuite de façon régulière, en subissant l'incidence de la présence du soleil (masqué ou non).

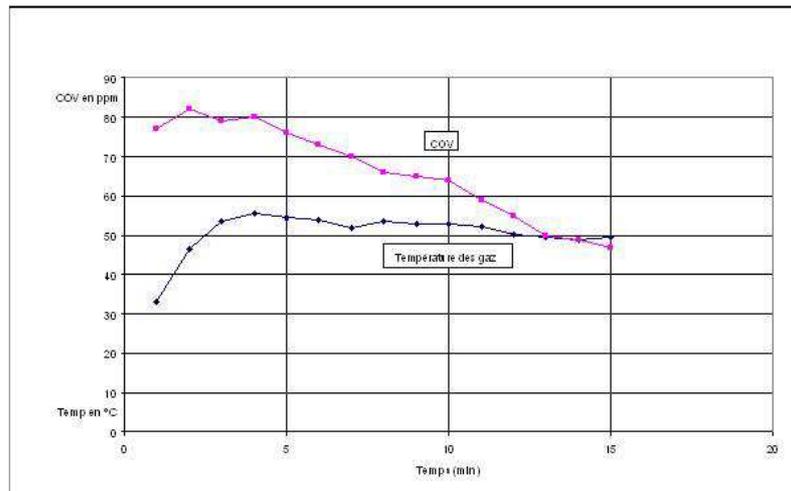


Figure 16. Concentration en COT et température mesurées sans ventilation d'air après purge du capteur.

Les mesures effectuées précédemment en ambiance confinée, sans ventilation, ont ainsi permis d'évaluer le niveau d'émissions maximum.

Mesure des COT à l'air libre, au dessus de l'enrobé, sans ventilation

Dans des conditions de chantier, la couche d'enrobé mis en œuvre à l'air libre engendre un courant de convection naturelle qui se disperse dans l'atmosphère. Par suite, une sonde pour la mesure des COT ou de la température placée à poste fixe enregistre la concentration donnée et non plus une accumulation comme dans le cas précédent. Le troisième essai consistait donc à effectuer les mesures de COT et de température des gaz en plaçant les capteurs à l'air libre, mais à la même distance (15 cm) de la surface de l'enrobé que dans les cas précédents (Figure 17). Cet emplacement a été choisi pour permettre des comparaisons avec les autres configurations. Cet essai avait donc pour objet de quantifier, en l'absence de renouvellement d'air forcé, une valeur minimale des émissions gazeuses produites immédiatement après mise en œuvre de l'enrobé en un point donné.

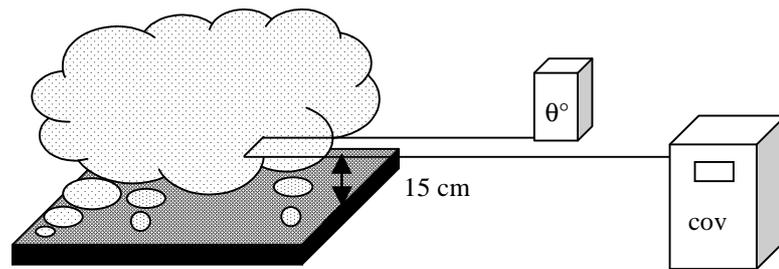


Figure 17. Principe des mesures à l'air libre au-dessus de la mini-planche

Les résultats d'émissions de COT ainsi que la température sont représentés sur la Figure 18, pour une plage de mesures jugée suffisante de 20 minutes. Logiquement, et contrairement aux essais précédents en situation d'accumulation, la concentration en COT ne marque pas de phase ascendante. Cette même tendance est observée dans le cas de la température. Ainsi, pendant une douzaine de minutes l'émission est quasiment constante, avec une valeur maximale réduite d'un facteur 20 par rapport au cas en ambiance confinée. Ensuite, une décroissance des émissions s'amorce de telle sorte que vingt minutes après la mise en place de l'enrobé, la concentration en COT est environ 9 fois moins importante que celle obtenue dans le cas d'une ambiance confinée à l'intérieur de la chambre à flux.

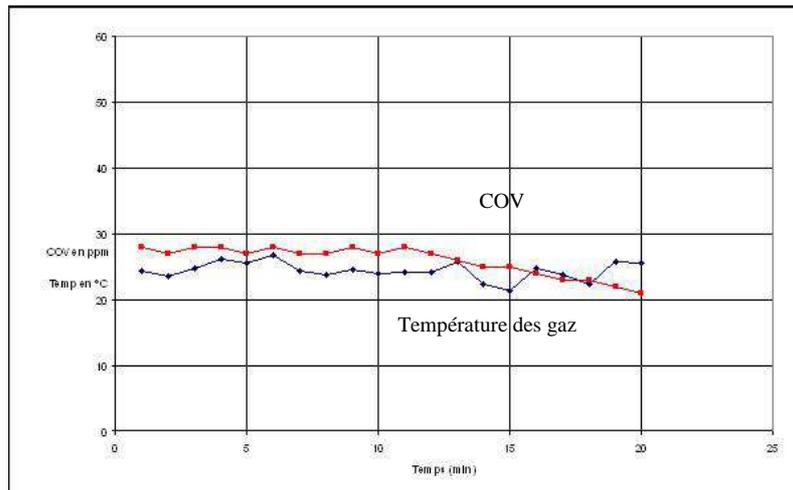


Figure 18. Concentration en COT et température mesurées à l'air libre.

Mesure des COT en continu sous le capteur, avec réalimentation forcée

L'essai précédent a montré que le matériel utilisé lors de cette campagne en laboratoire, pour la mesure de la concentration en COT, est assez sensible pour quantifier l'émission dans le cas le moins favorable (faible quantité d'enrobé (50 kg) et diffusion à l'air libre). Le mode opératoire recommandé (Rognon et Pourtier, 2000) pour la quantification du flux de COT spécifie cependant d'utiliser un dispositif muni d'une alimentation forcée en air. Dans une telle configuration expérimentale, outre la dilution potentielle du rejet polluant, il s'avère que l'air est amené par une canalisation dont le diamètre est inférieur au diamètre du capteur récepteur. On peut donc se poser aussi la question de la qualité de l'écoulement de l'air dans la chambre à flux et de la représentativité de l'essai. L'installation correspondante est schématisée sur la Figure 19.

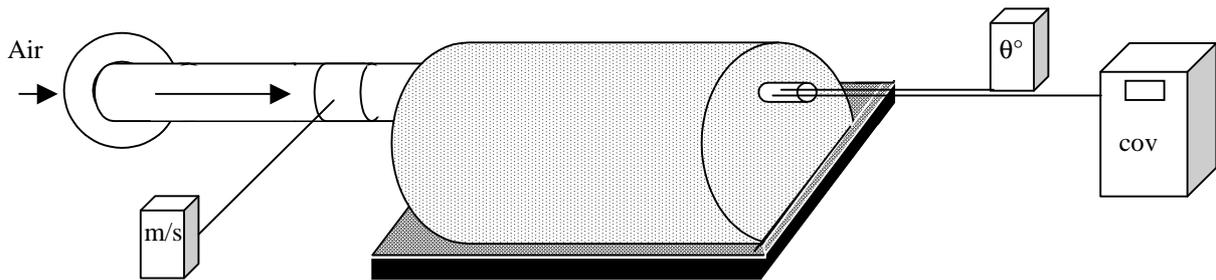


Figure 19. Principe des mesures avec le capteur dans le cas d'une réalimentation forcée d'air d'un côté.

Pour une vitesse mesurée dans cette conduite avec l'anémomètre est de l'ordre de 0,7 m/s (débit d'air d'environ 20 m³/h) le renouvellement du volume d'air sous le capteur se fait toutes les 22 secondes. Cette fréquence de renouvellement entraîne effectivement un important facteur de dilution des émissions gazeuses. Comme la saturation sous le capteur est obtenue rapidement, soit après 5 minutes environ en ambiance confinée, on peut s'attendre à des concentrations faibles et diminuant rapidement lors de cet essai. Les résultats obtenus dans ces conditions sont représentés sur la Figure 20.

Par rapport à l'essai en ambiance confinée, on constate effectivement que :

- la concentration en COT est considérablement diminuée (en effet, le maximum passe de 570 ppm à 30 ppm,)
- la décroissance est rapide pendant environ 10 minutes (le rapport entre les mesures maximales et après 10 minutes passe de 2 à 3 fois moins),
- Après 10 minutes de renouvellement d'air, la concentration en COT est faible (<10ppm) et diminue de façon asymptotique vers la concentration dans l'air ambiant. L'analyseur reste cependant suffisamment discriminant, y compris au bout d'environ 30 minutes de ventilation forcée.

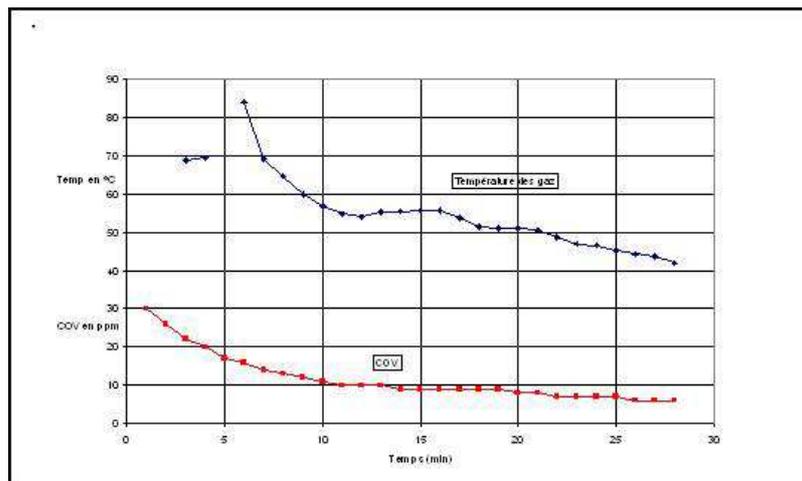


Figure 20. Concentration en COT et température mesurées avec capteur et ventilation de l'air.

ANNEXE 4.D. MESURES DES EMISSIONS ACOUSTIQUES

La présente annexe explicite en détails les mesures acoustiques effectuées au cours du chantier RN76. Quelques définitions sont d'abord rappelées.

Définitions

Les variables

Le niveau sonore ou niveau de pression acoustique d'un son exprimé en décibels est défini par :

$$L_p(t) = 20 \log \frac{p(t)}{p_0}$$

où $p(t)$ est la valeur efficace de la pression acoustique produite par le bruit à mesurer et p_0 est la pression de référence égale à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Le niveau d'intensité acoustique d'un son est défini par :

$$L = 10 \log \frac{I_1}{I_0}$$

avec : L le niveau d'intensité acoustique du bruit considéré, I_1 intensité acoustique du bruit (W/m^2), I_0 intensité acoustique de référence correspondant, en principe, à la plus petite intensité audible ; cette intensité de référence est de 10^{-12} W/m^2 .

Le niveau de pression sonore et le niveau d'intensité acoustique sont liés par une relation qui dépend de la forme du front d'onde.

La pondération

Le signal issu d'un sonomètre restitue le plus fidèlement possible les variations de pression captées par le microphone. Or, l'oreille ne fonctionne pas de la même façon. Elle atténue fortement les fréquences graves et les fréquences très aiguës. Seules les fréquences médium sont retransmises avec le maximum de sensibilité. Cette atténuation est d'ailleurs d'autant plus importante que le niveau global du bruit est faible. Pour corriger cet effet, il faut donc appliquer un filtre de pondération qui reproduise la sensibilité de l'oreille. Il existe trois filtres de pondération fondamentaux : A, B et C, chacun d'eux correspondant à une courbe d'atténuation en fréquence bien définie et devant être utilisée suivant le niveau global de bruit. En fait, actuellement, seule la courbe de pondération A est utilisée réglementairement. Les mesures se font donc en général avec la pondération (A) et les résultats s'expriment alors en décibels pondérés (A) ou dB(A).

Résultats détaillés des mesures à la centrale

La Figure 21 récapitule journée complète de mesures du 26 septembre 2001.

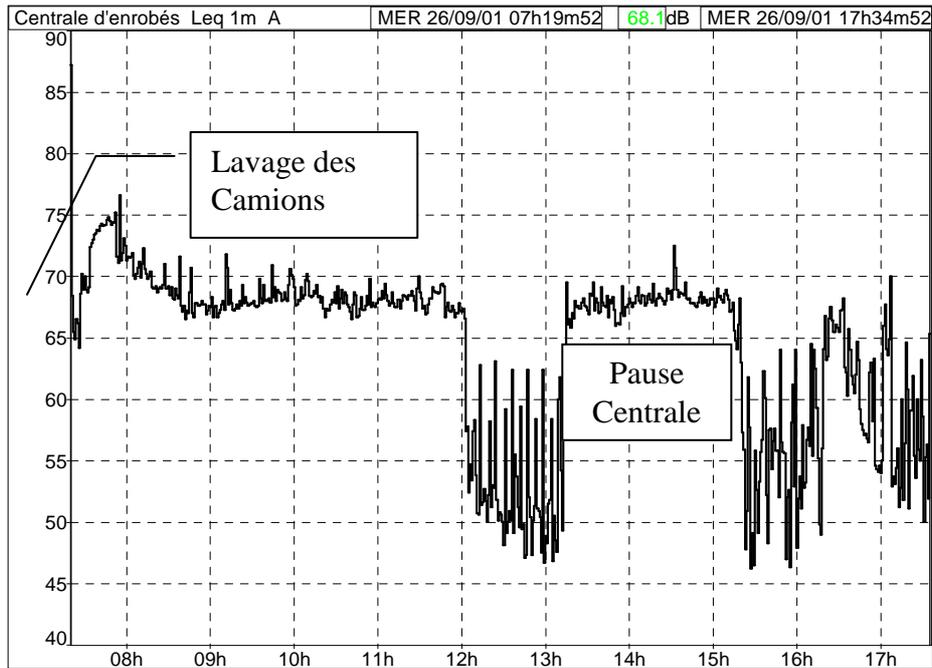


Figure 21. Evolution temporelle des niveaux sonores à la centrale de fabrication

Les évolutions fréquentielles et temporelles au cours des quatre fabrications sont présentées en détails de la Figure 22 à la Figure 25.

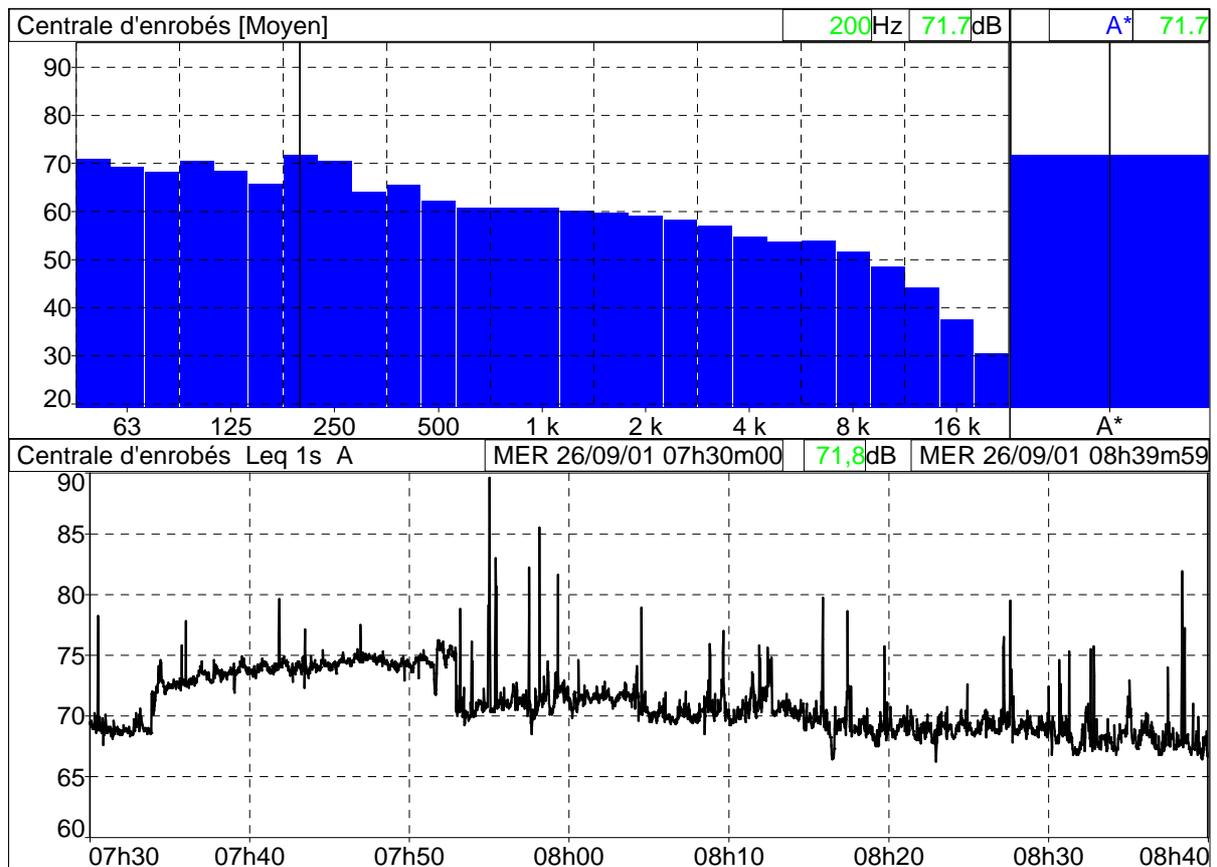


Figure 22. évolutions fréquentielles et temporelles Enrobé neuf

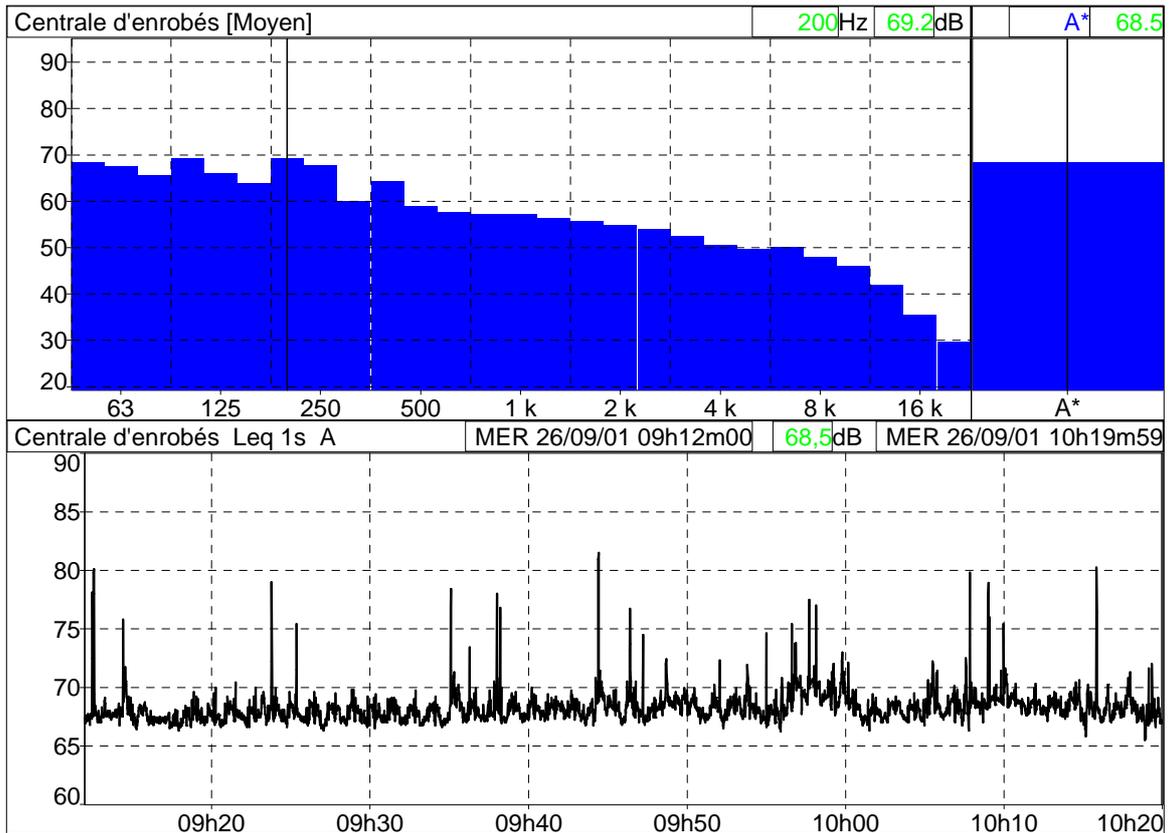


Figure 23. évolutions fréquentielles et temporelles Enrobé avec le taux de 10%

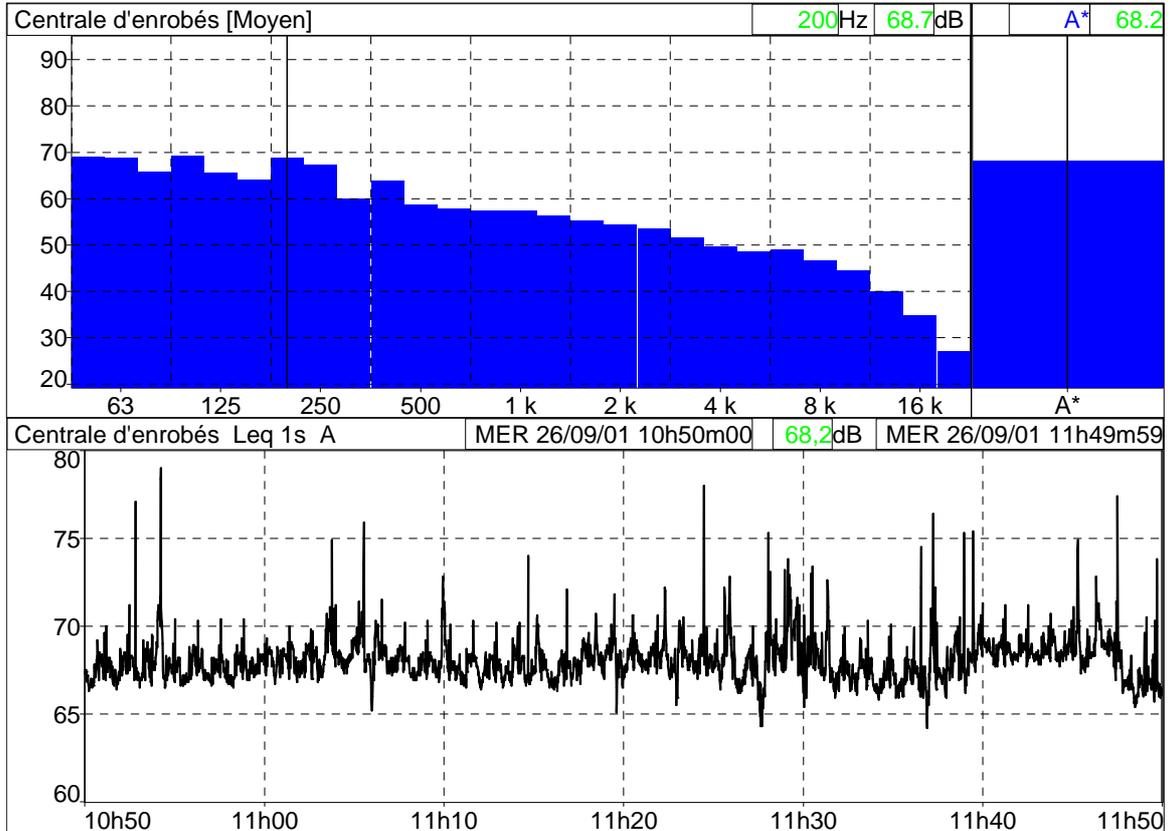


Figure 24. évolutions fréquentielles et temporelles Enrobé avec le taux de 20%

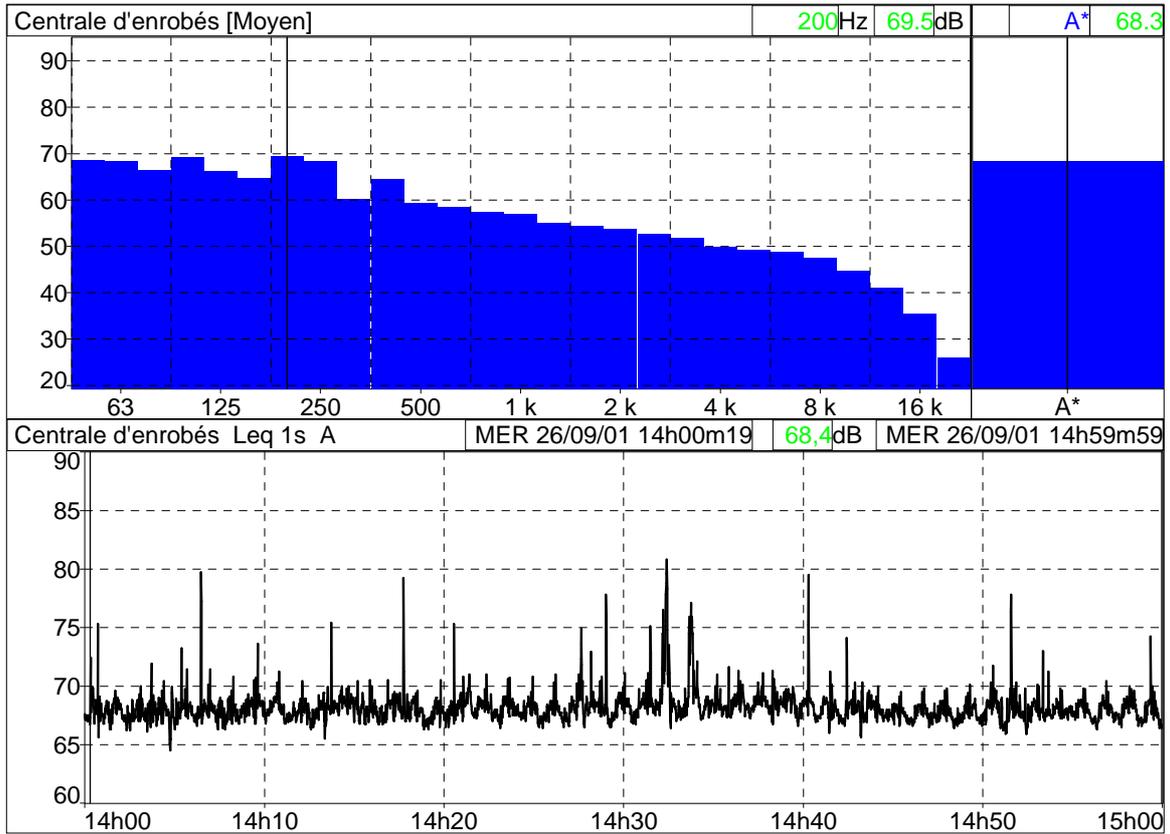


Figure 25. évolutions fréquentielles et temporelles Enrobé avec le taux de 30%

Résultats des mesures à la mise en œuvre

Tableau 26. Section à 0% de recyclage

PLANCHE 1							
Engins	Phase	Vitesse	Phase étudiée	Leq	distance	Lw sol absorbant	LW moyen
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	68	46	109,3	110,9
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	72	36	111,1	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	73	35	111,9	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	73	36	112,1	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	70	46	111,3	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	70	33	108,4	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	79	18	112,1	
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	82	15	113,5	112,7
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	78	18	111,1	
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	75	33	113,4	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	62	53	104,5	110,2
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	65	46	106,3	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	72	36	111,1	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	74	35	112,9	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	73	36	112,1	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	68	33	106,4	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	78	18	111,1	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	82	15	113,5	
Fraiseuse	2	9,23 m/mn	Décapage à 4 cm	81	18	114,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	66	46	107,3	110,0
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	70	36	109,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	72	36	111,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	69	46	110,3	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	72	33	110,4	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	77	18	110,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	79	15	110,5	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	78	18	111,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	72	33	110,4	
Camion			Seul, sans raboteuse	62	35	100,9	100,9
Balayeuse				72	35	110,9	111,4
Balayeuse				70	46	111,3	
Balayeuse				83	15	114,5	
Balayeuse				78	18	111,1	
Balayeuse				76	18	109,1	
Balayeuse				72	33	110,4	
Balayeuse				74	33	112,4	
Finisseur				62	46	103,3	104,3
Finisseur				66	35	104,9	
Finisseur				64	36	103,1	
Finisseur				64	36	103,1	
Finisseur				67	35	105,9	
Finisseur				64	40	104,0	
Finisseur				65	33	103,4	
Finisseur				72	18	105,1	
Finisseur				72	15	103,5	
Finisseur				72	18	105,1	
Finisseur				67	33	105,4	
Finisseur			au ralenti	59	35	97,9	98,5
Finisseur			au ralenti	66	18	99,1	
Finisseur			avec chargt camion	70	15	101,5	101,5
Compacteur à cylindre				72	35	110,9	109,1
Compacteur à cylindre				70	35	108,9	
Compacteur à cylindre				77	15	108,5	
Compacteur à cylindre				78	15	109,5	
Compacteur à cylindre				76	15	107,5	
Compacteur à pneus				65	35	103,9	101,9
Compacteur à pneus				63	35	101,9	
Compacteur à pneus				64	35	102,9	
Compacteur à pneus				65	35	103,9	
Compacteur à pneus				65	35	103,9	
Compacteur à pneus				71	15	102,5	
Compacteur à pneus				67	15	98,5	
Compacteur à pneus				69	15	100,5	
Compacteur à pneus				70	15	101,5	
Compacteur à pneus				68	15	99,5	

Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN76

PLANCHE : 2							
Engins	Phase	Vitesse	Phase étudiée	Leq	distance	Lw sol absorbant	LW moyen
Fraiseuse	1	12 m/mn	Décapage à 4 cm	78	15	109,5	108,7
Fraiseuse	1	12 m/mn	Décapage à 4 cm	76	18	109,1	
Fraiseuse	1	12 m/mn	Décapage à 4 cm	69	33	107,4	
Balayeuse				78	15	109,5	108,8
Balayeuse				75	18	108,1	
Finisseur				65	46	106,3	104,3
Finisseur				66	36	105,1	
Finisseur				66	35	104,9	
Finisseur				65	40	105,0	
Finisseur				62	46	103,3	
Finisseur				70	18	103,1	
Finisseur				72	16	104,1	
Finisseur				71	16	103,1	
Finisseur				73	15	104,5	
Finisseur				65	33	103,4	
Finisseur			au ralenti	56	40	96,0	
Finisseur							
Compacteur à cylindre				72	35	110,9	109,2
Compacteur à cylindre				73	35	111,9	
Compacteur à cylindre				70	36	109,1	
Compacteur à cylindre				67	46	108,3	
Compacteur à cylindre				78	15	109,5	
Compacteur à cylindre				79	15	110,5	
Compacteur à cylindre				71	18	104,1	
Compacteur à cylindre							
Compacteur à pneus				61	35	99,9	100,9
Compacteur à pneus			en recul	61	35	99,9	
Compacteur à pneus				63	35	101,9	
Compacteur à pneus				64	35	102,9	
Compacteur à pneus				62	35	100,9	
Compacteur à pneus				68	15	99,5	
Compacteur à pneus				70	15	101,5	
Compacteur à pneus							

Tableau 27. Section à 10% de recyclage

Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN76

PLANCHE : 3							
Engins	Phase	Vitesse	Phase étudiée	Leq	distance	Lw sol absorbant	LW moyen
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	68	42	108,5	109,3
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	72	32	110,1	
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	74	30	111,5	
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	71	32	109,1	
Fraiseuse	1	14,3 m/mn	Décapage à 3 cm	67	42	107,5	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	67	42	107,5	108,9
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	70	32	108,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	74	30	111,5	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	72	32	110,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	70	42	110,5	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	70	33	108,4	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	73	18	106,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	77	15	108,5	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	76	18	109,1	
Balayeuse				71	32	109,1	109,3
Balayeuse				72	30	109,5	
Balayeuse				73	32	111,1	
Balayeuse				67	42	107,5	
Balayeuse				78	15	109,5	
Balayeuse				76	18	109,1	
Répandeuse				65	30	102,5	100,7
Répandeuse				63	32	101,1	
Répandeuse				59	42	99,5	
Répandeuse				66	30	103,5	
Répandeuse				64	32	102,1	
Répandeuse				59	42	99,5	
Répandeuse				72	15	103,5	
Répandeuse				68	18	101,1	
Répandeuse				62	25	98,0	
Répandeuse				59	30	96,5	
Répandeuse				69	15	100,5	
Répandeuse				68	18	101,1	
Répandeuse				62	33	100,4	
Finisseur				67	32	105,1	
Finisseur				65	42	105,5	
Finisseur				67	32	105,1	
Finisseur				65	42	105,5	
Finisseur				68	25	104,0	
Finisseur				70	18	103,1	
Finisseur				72	15	103,5	
Finisseur				65	33	103,4	
Finisseur			au ralenti	60	30	97,5	97,5
Compacteur à cylindre				73	30	110,5	106,0
Compacteur à cylindre				70	30	107,5	
Compacteur à cylindre				67	30	104,5	
Compacteur à cylindre				69	30	106,5	
Compacteur à cylindre				71	30	108,5	
Compacteur à cylindre				75	15	106,5	
Compacteur à cylindre				74	15	105,5	
Compacteur à cylindre				70	15	101,5	
Compacteur à cylindre				71	15	102,5	
Compacteur à pneus				64	30	101,5	101,0
Compacteur à pneus				62	30	99,5	
Compacteur à pneus			recul	62	30	99,5	
Compacteur à pneus				61	30	98,5	
Compacteur à pneus				76	15	107,5	
Compacteur à pneus				68	15	99,5	

Tableau 28. Section à 20% de recyclage

Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN76

PLANCHE : 4							
Engins	Phase	Vitesse	Phase étudiée	Leq	distance	Lw sol absorbant	LW moyen
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	64	50	106,0	109,2
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	68	42	108,5	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	71	32	109,1	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	74	30	111,5	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	70	33	108,4	
Fraiseuse	3	10,9 m/mn	Décapage à 7 cm	80	15	111,5	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	75	30	112,5	112,0
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	76	30	113,5	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	74	32	112,1	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	69	42	109,5	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	81	15	112,5	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	78	18	111,1	
Fraiseuse	2	31 m/mn	Décapage à 3 cm	74	33	112,4	
Balayeuse				68	42	108,5	110,1
Balayeuse				73	30	110,5	
Balayeuse				74	30	111,5	
Balayeuse				72	30	109,5	
Balayeuse				72	30	109,5	
Balayeuse				80	15	111,5	
Balayeuse				79	15	110,5	
Balayeuse				76	18	109,1	
Finisseur				67	32	105,1	104,8
Finisseur				69	32	107,1	
Finisseur				67	42	107,5	
Finisseur				69	33	107,4	
Finisseur				70	33	108,4	
Finisseur				71	18	104,1	
Finisseur				72	15	103,5	
Finisseur				71	15	102,5	
Finisseur				72	15	103,5	
Finisseur				69	18	102,1	
Finisseur				68	18	101,1	
Finisseur			au ralenti	58	30	95,5	97,8
Finisseur			au ralenti	63	33	101,4	
Finisseur			au ralenti	65	15	96,5	
compacteur à pneus				66	30	103,5	98,5
compacteur à pneus				66	30	103,5	
compacteur à pneus			en recul	66	15	97,5	
compacteur à pneus			en recul	62	15	93,5	
compacteur à pneus			en recul	68	15	99,5	
compacteur à pneus			marche avant	60	15	91,5	
compacteur à pneus			marche avant	69	15	100,5	
compacteur à pneus			marche avant	67	15	98,5	
compacteur à cylindre				78	15	109,5	104,9
compacteur à cylindre				71	15	102,5	
compacteur à cylindre				71	15	102,5	

Tableau 29. Section à 30% de recyclage

L'analyse fréquentielle des bruits des engins de chantier

L'analyse fréquentielle des bruits des engins de chantier est montrée de la Figure 26 à la Figure 29.

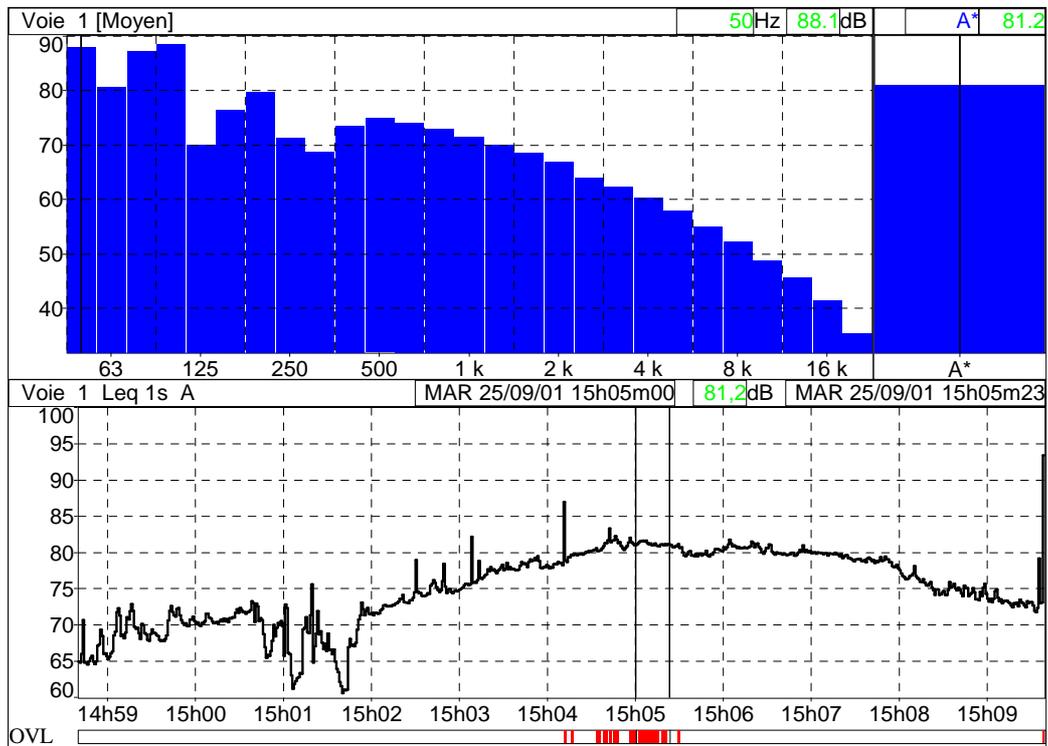


Figure 26. Spectre de la fraiseuse

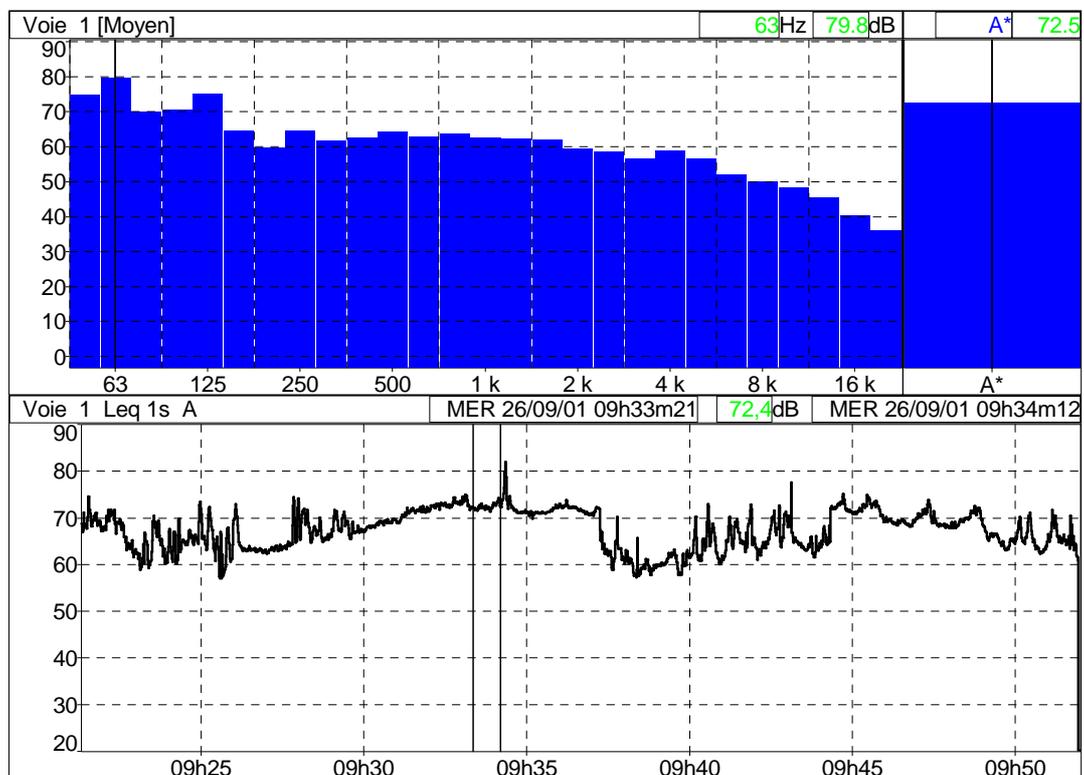


Figure 27. Spectre du finisseur

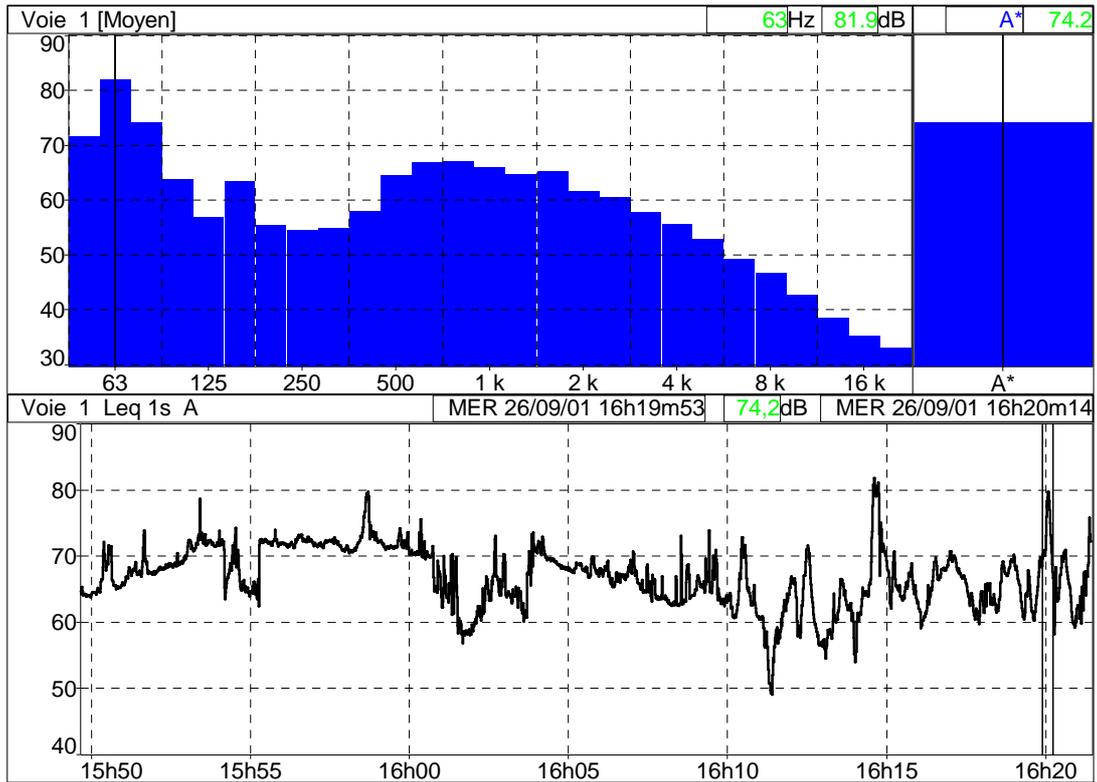


Figure 28. Spectre du compacteur vibrant

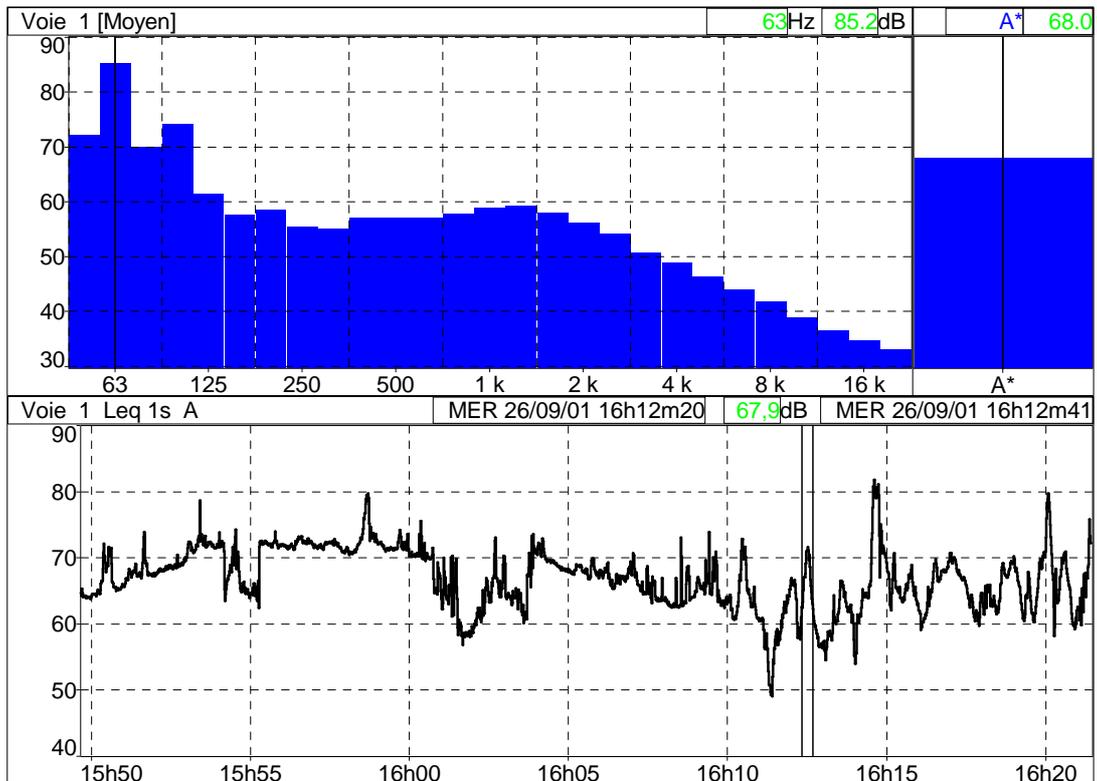


Figure 29. Spectre compacteur à pneus

ANNEXE 4.E. MISE AU POINT DES MESURES D'EMISSION VERS L'EAU DE LA CHAUSSEE EN SERVICE

Expérience préliminaire sur plaques d'enrobé de différentes compacités

Devant la difficulté d'estimer à priori de façon précise la pénétration de l'eau de pluie pour la structure envisagée sur le chantier RN 76 (7 cm BBSG, couche d'accrochage + 4 cm BBTM), une expérience préliminaire a été réalisée, afin de valider les potentialités en matière d'infiltration. La compacité, couramment mesurée en laboratoire car faisant partie des spécifications normatives, est liée au squelette granulaire et a vraisemblablement, pour les enrobés denses, un rapport avec la porosité et donc avec la perméabilité. L'hypothèse de base a consisté à ne prendre en compte que la couche de BBSG, à considérer de façon arbitraire 3 classes de perméabilité des enrobés, en liaison avec leur compacité initiale, et à faire varier cette compacité en fonction des références de la norme NF P 98 130 (AFNOR, 1999).

Conformément à cette norme, le pourcentage moyen de vides obtenu pour un enrobé de type BBSG doit être compris entre 4% et 8%. La compacité de l'enrobé doit donc être comprise entre 92 et 96%. Trois plaques d'enrobés ont été confectionnées au laboratoire en visant des compacités représentatives des valeurs précédentes, soit <90%, comprises entre 90 et 94% et > à 94%. Comme le paramètre pris en compte était uniquement la compacité, les différences de compacité ont été obtenues par modification de la formule de l'enrobé, allant d'un BBSG à 5,5% de liant à une GB avec 4,5% de liant.

Les enrobés ont été fabriqués sur le site de Nantes avec un malaxeur de laboratoire et les plaques d'enrobés (400x600x50mm ; Figure 30) confectionnées avec le compacteur de plaques. Les compacités résultantes ont été quantifiées à partir du banc gamma. Le Tableau 30 montre la synthèse des valeurs obtenues en matière de Masse Volumique Apparente (MVA), de % de vide moyen calculé par rapport à la masse volumique réelle des enrobés fabriqués, ainsi que de dispersion (écart type σ) et de compacité.

Enrobé fabriqué	MVA. moyenne	σ sur MVA	% vide moyen	σ sur % vide	Compacité %
BBSG à 5,5% liant	2,47	0,07	5,74	2,77	94
BBSG à 5,1% liant	2,41	0,07	8,08	2,71	92
GB à 4,5% liant	2,28	0,08	14,15	2,93	86

Tableau 30. Compacités des plaques d'enrobés

En moyenne, les compacités des plaques étaient donc de l'ordre de 94% ; 92% et 86% et correspondaient aux valeurs recherchées. Au centre de chacune de ces plaques un cylindre de diamètre 15cm et de 30 cm de haut a été placé, l'étanchéité par rapport à l'enrobé assurée par un joint silicone. Chaque cylindre a été rempli sur une hauteur de 20 cm (soit environ 3,5l) avec de l'eau. L'objectif était de voir si l'eau, sans exercer de pression supplémentaire,

pouvait traverser en un temps relativement court (de l'ordre de 1 heure) les différentes plaques d'enrobé. Le montage est présenté sur la Figure 30.

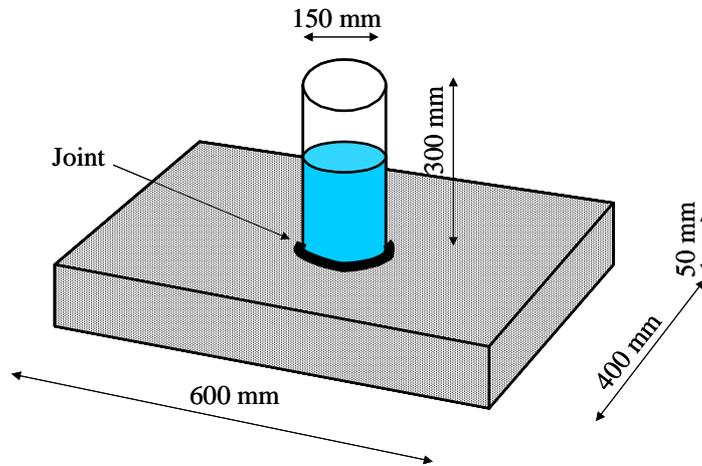


Figure 30. Essai d'infiltration de l'eau dans les plaques d'enrobé

Pour cet essai très simplifié, basé sur l'observation visuelle, aucune instrumentation spécifique (pesée de l'eau récupérée, mesure du temps écoulé, mesure de l'évolution de la hauteur d'eau dans le cylindre..) n'a été réalisée. Les constatations ont été les suivantes :

- pour la plaque d'enrobé à 86% de compacité, l'eau a traversé les 5 cm rapidement, et s'est écoulée sous la plaque,
- pour la plaque à 92%, l'eau n'a pas traversé instantanément, mais l'on a vu apparaître des remontées sur le pourtour extérieur du cylindre, signe qu'une certaine quantité d'eau s'est bien infiltrée,
- pour la plaque à 94%, nous n'avons observé, dans l'heure qui a suivi la mise de l'eau dans le cylindre, aucune résurgence d'eau. Cependant, n'ayant pas mesuré l'évolution potentielle du niveau d'eau dans le cylindre, rien ne permet de conclure à l'étanchéité de la plaque d'enrobé.

Par ailleurs, la pression qui résulte de la hauteur d'eau de cet essai n'est pas représentative de la pression exercée par les véhicules sur la chaussée, qui constitue un paramètre important du processus de percolation de l'eau. Pour se placer dans l'optique d'une circulation automobile, il est préférable de prendre comme hypothèse que la pression moyenne sol/pneu dans l'aire de contact est la même que la pression de gonflage du pneumatique, soit environ 2 bars. C'est donc une pression 100 fois supérieure à la pression mise en œuvre au départ de l'essai simplifié. La possibilité de récupérer de l'eau d'infiltration de la chaussée RN 76 est donc apparue, à ce stade de l'étude, réaliste.

Conception du système de récupération de l'eau de percolation

Surface de captage et géométrie du dispositif de captage

Même avec toutes les précautions possibles en matière de fabrication et de mise en œuvre des enrobés à chaud, la répartition granulaire et la compacité des couches d'enrobés (variation de l'ordre de 4% tolérée dans la norme NF P 98 130 pour un BBSG) ne sont pas homogènes sur l'ensemble du volume d'enrobé mis en place sur la chaussée. Liée au squelette granulaire, la porosité, en rapport avec la compacité, ne peut ainsi pas être considérée comme homogène.

Pour effectuer un suivi du transfert d'eau à l'échelle du milieu homogène équivalent, la surface de récupération devait être suffisamment grande, afin de disposer de la quantité d'eau définie précédemment.

La surface de captage de l'eau a été définie sur la base des hypothèses suivantes :

- la chaussée elle-même est utilisée comme surface de captage,
- le coefficient d'infiltration a été estimé à 5%.

Par ailleurs, le dispositif de captage devait répondre aux impératifs suivants :

- la récupération de l'eau de percolation impliquait la présence d'un dispositif d'étanchéité dans la structure de la chaussée,
- il était indispensable de s'affranchir des eaux de ruissellement,
- la mise en place sur une chaussée circulée et en rase campagne impliquait des dimensions compatibles avec le transport et l'installation du dispositif,
- le dispositif ne devait pas présenter des problèmes de sécurité sous circulation,
- tout en restant le plus neutre possible par rapport aux constituants à analyser, le dispositif se devait de posséder, dans le temps, la meilleure tenue mécanique et la meilleure résistance à la corrosion possibles.

L'ensemble du dispositif de captage a constitué le capteur de récupération d'eau. Chaque capteur, installé pour chaque modalité de fabrication d'enrobé, a été matérialisé par une surface de captage constituée par une demie chaussée de 3,8 m sur 6 m de long, soit 22,8 m². Pour la surface concernée, en supposant un pourcentage d'eau d'infiltration de 5%, cela permet de récupérer environ 11,4 litres d'eau par cm de hauteur d'eau de pluie. La pente transversale de la demie chaussée RN 76 assurait la collecte totale de l'eau en rive de chaussée où se situait la goutlotte de récupération, via le récipient de collecte. La goutlotte devait donc faire 6 m de long et disposer elle-même d'une pente longitudinale (de 1cm/m) pour assurer la récupération dans le récipient de collecte de l'eau (d'une capacité de 20 litres). Par ailleurs, la nécessité de ne récupérer que l'eau s'infiltrant dans l'enrobé imposait de s'affranchir de recueillir aussi l'eau de ruissellement. La goutlotte devait donc être protégée par un dispositif que nous avons appelé chapeau de goutlotte. Enfin, pour éviter l'accumulation de l'eau de ruissellement en rive, un drainage devait être posé le long de la goutlotte, avec une évacuation dans le fossé. La Figure 31 présente le schéma de principe du capteur de récupération de l'eau traversant la couche d'enrobé testé.

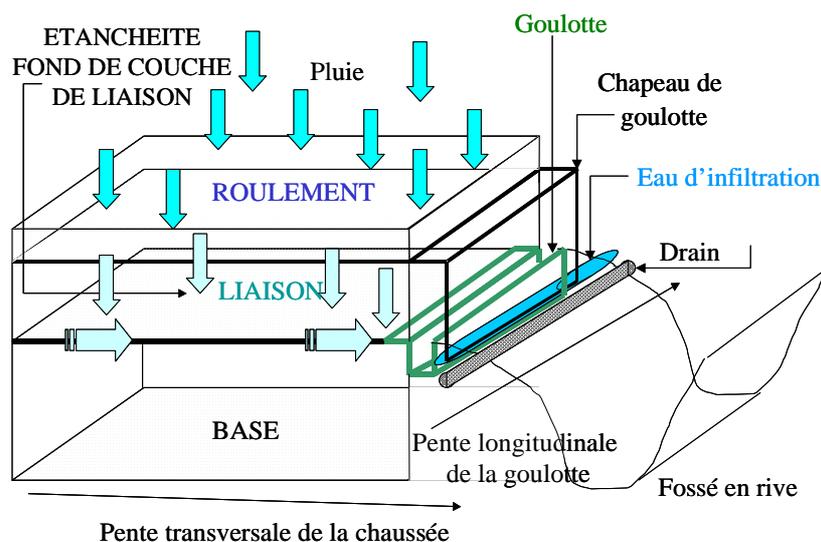
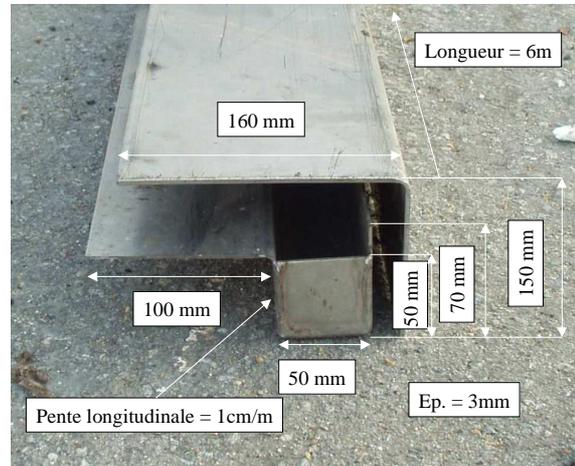


Figure 31. Principe du capteur de récupération de l'eau de percolation

L'analyse ultérieure de l'eau de pluie récupérée nécessitait de s'affranchir le plus possible d'une pollution indésirable liée au système de récupération et non à l'enrobé testé. Pour cette raison la goutlotte de récupération de l'eau ainsi que le chapeau de protection de l'eau de ruissellement a été réalisée en acier inoxydable. Les Figure 32 a et b montrent la vue d'ensemble ainsi que les dimensions de la goutlotte et de son chapeau.



a) vue d'ensemble de la goutlotte



b) dimensions de la goutlotte et de son chapeau

Figure 32. Présentation du système de captage d'eau- la goutlotte

Validation du dispositif de captage

Préalablement à la réalisation des capteurs de récupération de l'eau sur le site RN 76, une expérience préliminaire a été réalisée pour valider la faisabilité du système de captage. Cet essai a été effectué en même temps que la planche de fraisage de référence (environ 6 mois avant le chantier réel), à partir d'un modèle de goutlotte de 1 m de long. Toutes les opérations ont été effectuées selon le scénario prévu pour le chantier réel RN 76 : fraisage de l'enrobé ancien, balayage de la couche fraisée, installation de la goutlotte, mise en place de la couche d'accrochage, mise en œuvre de l'enrobé et compactage de cet enrobé. Il s'agissait de vérifier que :

- la vitesse de la fraiseuse permettait d'obtenir un fond de couche fraisée pas trop altéré (par la profondeur et la période des ondulations) pour pouvoir envisager l'étanchéité du fond de couche (Figure 33a),
- la goutlotte pouvait s'installer correctement en rive de chaussée, par clouage dans la chaussée fraisée (Figure 33b),
- la couche d'accrochage mise en place avant le répandage de l'enrobé adhérait bien à la goutlotte en inox (Figure 33c),
- qu'une protection provisoire de l'intérieur de la goutlotte (chevron en bois découpé aux dimensions intérieures de la goutlotte) permettait de s'affranchir de la pollution qui serait occasionnée par le liant de la couche d'accrochage ou les constituants de l'enrobé répandu si ceux ci pouvaient pénétrer dans la goutlotte lors des opérations successives de la mise en œuvre de l'enrobé (Figure 33d),
- la goutlotte se maintenait bien en place lors du passage du compacteur (Figure 33e).

Le résultat de la mise en place est présenté sur la Figure 33f. La présence de liant à l'intérieur de la goutlotte tient au fait que le protecteur (chevron en bois) a été enlevé volontairement avant la fin du compactage, pour s'assurer que celui ci ne poussait pas, entre le protecteur et

les bords de la goulotte, des granulats susceptibles de bloquer le dispositif. Cette manœuvre a ainsi provoqué une chute d'enrobés encore chauds dans la goulotte, ce qui sera évité pour le chantier réel.



a : Fond de couche fraisée



b : Clouage de la goulotte



c : Mise en place de la couche d'accrochage



d : Protection de la goulotte



e : Compactage de l'enrobé



f : Goulotte mise en place

Figure 33. validation du système de captage d'eau lors d'une phases préliminaire

En résumé, l'opération s'est déroulée conformément aux prévisions. La problématique de la mise en place du chapeau de goutlotte étant identique à celle de la goutlotte, les 4 ensembles (goutottes + chapeaux) prévus ont donc été fabriqués selon le projet initial.

Mise en place des capteurs de récupération de l'eau sur la RN 76

La mise en place des capteurs de récupération s'est effectuée pendant la réalisation du chantier RN 76. L'installation des goutottes et du drainage a été réalisée, pour chaque longueur concernée, dès la fin du fraisage de l'ancienne chaussée. Les différentes opérations comprenant la mise en place du chapeau, l'étanchéité de l'ensemble goutlotte et chapeau, le raccordement entre goutlotte et bidon de récupération ont été pratiquées après la réalisation de la couche de BBSG de liaison.

Le déroulement des opérations est schématisé sur la Figure 34. Les différentes interventions ont été réalisées, pour chaque capteur de récupération de l'eau, selon le protocole suivant :

- 8 Avant le fraisage de l'ancienne chaussée, sciage vertical en rive de chaussée, sur 6,5 m de long et 0,2 m de profondeur, pour obtenir un bon positionnement de la goutlotte,
- 9 fraisage de l'ancienne chaussée sur 7 cm de profondeur,
- 10 enlèvement du bord de sciage par pelle mécanique, préparation de la rive destinée à recevoir la goutlotte, ainsi que de l'emplacement destiné à recevoir le regard d'eau pluvial dans lequel est placé le bidon de collecte de l'eau,
- 11 balayage du fond de couche fraisée,
- 12 la face de la goutlotte en contact avec la couche fraisée est préalablement enduite sur toute la longueur d'un mastic d'étanchéité résistant à la température (150°C) de mise en œuvre de l'enrobé,
- 13 mise en place de la goutlotte en rive de chaussée et maintien par des clous installés au pistolet de scellement,
- 14 mise en place du protecteur de goutlotte,
- 15 mise en place sur la surface de récupération de 24 m² de l'enduit superficiel (monocouche 2/4) destiné à assurer l'étanchéité du fond de couche et ainsi permettre à l'eau de percolation de s'écouler jusqu'en rive de chaussée, via la goutlotte de récupération,
- 16 mise en œuvre du béton bitumineux de liaison BBSG 0/10,
- 17 compactage du béton bitumineux,
- 18 enlèvement des protecteurs une fois l'enrobé suffisamment refroidi,
- 19 la face du chapeau de goutlotte en contact avec le BBSG est enduite de mastic d'étanchéité, comme pour la goutlotte,
- 20 mise en place du chapeau de protection des eaux de ruissellement, et maintien par des clous comme pour la goutlotte,
- 21 mise en place de la couche d'accrochage entre le BBSG et la couche de roulement,
- 22 mise en œuvre du BBTM constituant la couche de roulement,
- 23 compactage du BBTM.

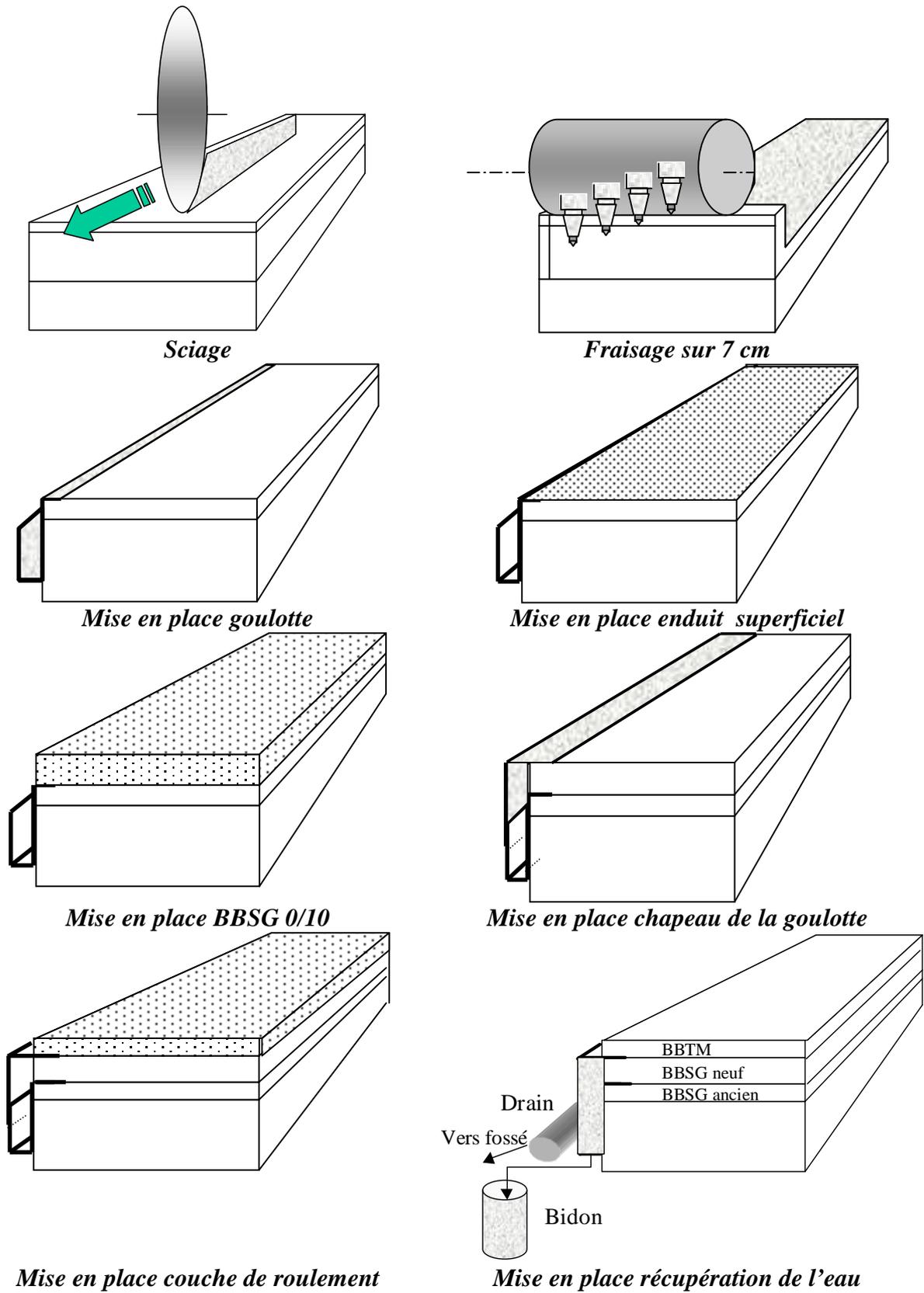


Figure 34. Opérations de mise en place du capteur de récupération de l'eau

L'ensemble du système mis en place, conformément aux dispositions qui ont été initialement prévues et précédemment décrites en matière d'implantation et de sécurité, est présenté sur la Figure 35.



Sciage en rive de chaussée



installation de la goutte avec drain

Figure 35. Mise en place du système de récupération d'eau sur le site RN76.

Matériels de prélèvement et de stockage

Pour des raisons de sécurité, il était prévu de recouvrir complètement le chapeau de la goutte avec l'enrobé de la couche de roulement, et d'installer le bidon de récupération à l'intérieur d'un regard d'eau pluviale mis en place dans le sol du fossé, sans partie saillante. Ainsi, aucune partie du capteur ne pouvait présenter une adhérence particulière, ni le système de collecte un obstacle en cas de passage sur le bas coté. Pour chaque capteur, ainsi que pour la récupération issue du pluviomètre, le récipient de collecte de l'eau est un bidon en polyéthylène de qualité alimentaire. Les quantités d'eau pour analyse ont été obtenues, depuis le lieu de récupération de la RN 76, à partir d'échantillonnages réalisés dans les bidons de collecte préalablement gradués (de 1 à 20 litres). Les échantillons ont été transportés, en fonction du type d'analyse physico-chimique à réaliser, dans des flacons en verre ou en polyéthylène identifiés de façon différente (pour éviter les confusions lors des différentes transmissions entre le lieu de prélèvement et les laboratoires d'analyse). La Figure 36 montre le bidon de collecte avant installation, et la figure 34 les flacons d'échantillonnage.



Bidon de collecte de l'eau de percolation



flacons de stockage des hydrocarbures

Figure 36. Matériel de prélèvement et de stockage

Protocole d'échantillonnage de l'eau récupérée sur le site RN76

La procédure d'échantillonnage retenue initialement et décrite ci après a été utilisée pendant la première année de suivi (septembre 2001 à septembre 2002). Par la suite, compte tenu de l'évolution des résultats, une procédure destinée à obtenir des prélèvements moyens (par échantillons constitués à partir de plusieurs prélèvements unitaires représentatifs d'évènements pluvieux différents) a été retenue. Cette procédure, (septembre 2002 à juin 2003), destinée à minimiser le nombre total d'analyses chimiques, ne modifie cependant pas le protocole précédent en matière de relevé des volumes d'eau de percolation.

Outre la récupération de l'eau de percolation pour chaque planche (Figure 37) la récupération de l'eau de pluie a aussi été effectuée sur le site grâce à un bidon de 20 litres installé à l'intérieur du dépôt de carburant longeant la RN 76 (à gauche en Figure 37). Le relevé des bidons a été réalisé de façon systématique (après orages) par une personne de la subdivision de Romorantin (DDE41) et selon le remplissage des bidons le LR de Blois prenait le relais afin de faire procéder aux analyses.



Figure 37. Récupération de l'eau sur le site RN76

Prélèvements effectués

PRELEVEMENT		EAU PERCOLEE A PARTIR DES PLANCHES DE 22.8 m2				PLUIE cumulée m3
Date	Jour	Classique litres	Avec 10% litres	Avec 20% litres	Avec 30% litres	
26/09/01	0	/	/	/	/	/
10/10/01	14	11	12	13	22	1.118
18/10/01	22	29.5	29.5	32	44	1.565
22/10/01	26	51.5	51.5	54	66	2.682
24/10/01	28	75	81.5	74	86	3.085
09/11/01	44	95	101.5	94	106	3.085
21/11/01	56	117	124	112	128	3.353
30/11/01	65	141	148	135.5	151	3.353
03/12/01	68	165	172	159.5	175	3.889
23/01/02	119	189	184	183.5	199	5.454
30/01/02	126	213	208	200.5	222.5	5.767
07/02/02	134	235	230	214.5	243.5	6.214
11/02/02	138	259	254	234.5	267	6.885
14/02/02	141	283	278	258.5	289	7.555
11/03/02	166	307	303	283.5	312	8.852
25/03/02	180	331	327	301.5	335	9.746
06/05/02	222	348	348	307.5	355.5	9.791
13/05/02	229	372	371	323.5	378.5	10.372
24/10/02	424	396	395	331.5	402.5	17.972
25/10/02	425	404	401	334.5	412.5	17.972
26/11/02	457	454	446.5	359	459.5	20.207
10/01/03	502	478	465.5	377	483.5	22.219
26/02/03	549	502	486.5	397	506.5	24.007
26/03/03	577	526	498.5	405	524.5	24.678
07/05/03	619	550	514.5	417	547.5	27.36
19/05/03	631	561	518	419	565.5	27.807
06/06/03	658	568	525	421	589.5	28.254

Tableau 31. Dates des prélèvements des eaux de percolation de la chaussée en service

Résultats des analyses physicochimiques

jour	pluie	pH				conductivité (µS/cm)				
		0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%
14	6,9	7,4	7,2	7,4	7,4	23	87	72	85	65
22	6,9	6,8	6,6	6,8	6,5	39	95	87	88	90
26		6,8	6,6	6,8	6,9		56	53	65	57
28		6,8	6,6	7,2	7		57	40	92	47
68	6,2	7,0	7,0	7,0	7,3	23	128	110	123	132
119	6,6	7,1	7,4	7,1	7,5	28	2832	2336	1807	2150
141	6,5	7,7	7,7	7,7	7,8	30	548	362	289	291
166		8,0	7,8	7,8	7,6		347	313	322	361
180										
229	6,9	7,5	7,3	7,6	7,6	39	163	142	169	175
393		7,3	7,3	7,0	7,0		135	115	117	112
471		7,7	7,5	7,7	7,8		158	137	113	135

date	jour
10/10/2001	14
18/10/2001	22
22/10/2001	26
24/10/2001	28
période de salage 03/12/2001	68
période de salage 23/01/2002	119
période de salage 14/02/2002	141
période de salage 22/04/2002	166
25/03/2002	180
13/05/2002	229
24/10/2002	393
10/01/2003	471

jour	pluie	DCO (mgO2/l)				MES (mg/l)				NTK (mg/l N)		
		0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%	0%	20%
14	234	78	37	39	28	14	2	17	15	3	0,7	1,1
22	37	73	79	66	43	7	14	4	6	17	1,9	2,3
26		25	26	89	33		4	4	6	17	0,8	0,9
28		23	21	27	<20		6	2	17	7	0,6	1,7
68	<20	<20	43	<15	<15	12	17	15	18	25		
119		36	23	75	<20	7	139	11	59	122		
141	<20	<20	<20	<20	<20	20	15	13	9	21		
166							14	8	7	13		
180												
229							10	8	4	10		
393		37	33	29	38		17	7	5	63		
471		21	<20	<20	<20		3	4	8	9		

jour	pluie	NO3 (mg/l)				SO4(mg/l)					Cl (mg/l)				
		0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%
14	1,1	<1	<1	<1	<1	2,1	5,8	3,3	3,9	3,2	0,8	2,9	1,6	1,6	1,2
22	<1	<1	<1	<1	<1	1,7	6,2	5,4	5,1	6,0	2,4	2,3	1,6	1,8	2,3
26		<1	<1	<1	<1		2,8	3,1	4,0	5,2		1,0	0,8	1,2	1,7
28		<1	<1	<1	<1		2,7	1,5	3,3	2,3		1,1	0,5	1,7	0,9
68	2,9	2,7	2,3	2,6	2,8	2,1	4,7	7,8	8,8	9,4	1,5	6,6	4,8	5,0	5,3
119	1,3	2,3	2,3	2,2	2,1	2,2	59,6	57,4	40,5	52,4	3,1	931,0	757,0	537,8	648,3
141	1,6	1,1	<1	1,3	<1	2,4	19,5	17,5	13,1	17,1	4,5	143,1	85,4	51,7	94,9
166															
180															
229															
393			1,5	2,2	2,1		4,0	4,1	4,1	4,1		2,6	2,5	3,1	2,5
471		1	0,5	<0,5	0,6		8,7	6,1	6,4	7,2		4,9	3,5	3,7	3,9

jour	pluie	Fe (µg/l)				Al (µg/l)					Mn (µg/l)				
		0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%
14	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100	<100	<100	<100	<10	<10	11	<10	<10
22	10	47	40	<10	<10	<100	<100	<100	<100	<100	<10	24	21	21	<10
26		<10	<10	<10	<10		<100	<100	<100	<100		<10	<10	<10	<10
28		<10	<10	<10	<10		<100	<100	<100	<100		<10	<10	<10	<10
68	<10	<10	<10	<10	<10	<100	<100	<100	<100	<100	<10	<10	<10	<10	<10
119	<10	66	30	<10	52	<100	109	<100	<100	<100	<10	65	53	23	26
141	<10	17	42	20,3	30	<100	<100	<100	<100	<100	<10	<10	<10	<10	<10
166															
180															
229															
393		<10	<10	<10	<10		<100	<100	<100	<100		<10	<10	<10	<10
471		<10	<10	<10	<10		<100	<100	<100	<100		<10	<10	<10	<10

jour	pluie	Na (mg/l)				Ca (mg/l)					Mg (mg/l)				
		0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%
14	0,6	2,2	1,6	2,2	1,6	2,0	12,0	11,0	12,0	14,0	0,1	0,9	0,6	0,8	0,5
22	2,2	2,6	2,2	2,5	2,8	3,0	12,0	12,0	11,0	10,0	0,1	0,8	0,6	0,7	0,7
26		1,3	1,2	1,7	2,2		7,0	7,0	9,0	13,0		0,4	0,4	0,6	0,8
28		1,2	0,6	2,0	0,8		7,0	6,0	13,0	7,0		0,3	0,2	0,6	0,2
68	0,7	5,1	3,9	4,3	4,5	2,1	17,3	15,0	17,1	18,9	0,1	1,2	0,9	1,1	1,1
119	1,8	578,0	444,8	329,2	389,1	1,5	66,6	57,9	44,9	61,4	0,1	4,3	3,0	2,5	3,5
141	2,7	73,6	55,9	37,6	61,3	0,8	23,6	20,0	18,5	21,7	0,4	1,9	1,3	1,4	1,5
166		54,0	17,0	48,0	52,0		23,0	21,0	22,0	25,0		1,0	1,0	1,0	1
180															
229		11,0	8,0	10,0	10,0		22,0	21,0	25,0	25,0		1,0	1,0	2,0	2
393		6,0	4,0	4,0	4,0		21,0	17,0	17,0	18,0		1,8	1,1	1,1	1,0
471		5,0	3,0	3,0	4,0		25,0	22,0	20,0	21,0		1,6	2,2	1,0	1,1

Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN76

	jour	Pb (µg/l)					Cd (µg/l)				
		pluie	0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%
10/10/2001	14	<1	<1	<1	<1	<1	0,2	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
18/10/2001	22	<1	<1	<1	<1	<1	0,2	<0,1	<0,1	0,2	<0,1
22/10/2001	26		<1	<1	<1	2,7		<0,1	<0,1	<0,1	0,2
24/10/2001	28		<1	<1	<1	<1		<0,1	<0,1	0,3	0,2
03/12/2001	68	<1	<1	<1	<1	<1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
23/01/2002	119	<1	1,9	1,3	<1	1,4	<0,1	0,3	<0,1	0,1	<0,1
14/02/2002	141	<1	<1	1,0	1,8	<1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
22/04/2002	166		2	1,6	1,8	2,3					
25/03/2002	180										
13/05/2002	229		1,4	1,3	1,4	1,5					
24/10/2002	393		4	6,0	9,0	1		0,1	0,1	<0,1	0,2
10/01/2003	471		<1	<1	<1	<1		<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

	jour	Zn (µg/l)					Cr (µg/l)				
		pluie	0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%
10/10/2001	14	43	43	64	57	47	<1	<1	<1	<1	<1
18/10/2001	22	13	41	16	19	12	1	2	2	1	1
22/10/2001	26		<10	<10	<10	<10		2	3	1	7
24/10/2001	28		<10	<10	<10	<10		1	2	<1	<1
03/12/2001	68	<10	21	40	42	41	2	2	1	3	2
23/01/2002	119	<10	132	159	145	79	1	3	5	5	3
14/02/2002	141	20	43	70	39	44	2	3	3	3	2
22/04/2002	166		32	56	45	35					
25/03/2002	180										
13/05/2002	229		32	56	45	35					
24/10/2002	393		28	63	41	33					
10/01/2003	471		15	60	33	25		1	3	1	1

	jour	Cu (µg/l)					Ni (µg/l)				
		pluie	0%	10%	20%	30%	pluie	0%	10%	20%	30%
10/10/2001	14	2	7	9	12	11	<2	3,2	<2	4,3	<2
18/10/2001	22	8	19	14	15	16	4	3	2	3	<2
22/10/2001	26		15	13	8	11		2	<2	<2	<2
24/10/2001	28		10	12	5	6		<2	<2	<2	<2
03/12/2001	68	4	19	23	21	11	<2	<2	<2	<2	<2
23/01/2002	119	3	51	31	37	16	<4	<4	<4	5	<4
14/02/2002	141	2	18	29	16	15	<2	<2	<2	10	<2
22/04/2002	166										
25/03/2002	180										
13/05/2002	229										
24/10/2002	393		129	203	39	22		3	2	4	<2
10/01/2003	471		52	51	50	30		<2	<2	<2	<2

	jour	HT (mg/l)		HAP (ng/l)	
		0%	20%	0%	20%
10/10/2001	14	0,02	0,03	21	16
18/10/2001	22	0,27	0,14	62	50
22/10/2001	26	0,04	0,04	25	29
24/10/2001	28	0,09	0,12	24	48
03/12/2001	68	0,14	0,10	77	35
23/01/2002	119	0,55	0,53	165	176
14/02/2002	141	0,12	0,05	77	24
22/04/2002	166				
25/03/2002	180	0,08	0,03	2	2
13/05/2002	229	0,05	0,08	6	13
24/10/2002	393	0,15	<0,03	423	28
10/01/2003	471	<0,01	<0,01	9	23

ANNEXE 4.F. CARACTERISATION ENVIRONNEMENTALE DES FRAISATS

Essais de lixiviation

Dans les différents tableaux, les valeurs indiquées avec un signe « < » signalent un composé détecté à l'analyse mais avec une concentration sous la limite de quantification de la méthode.

paramètres	FRAISATS DE CLASSE A (réf. 01/634)			
	lixiviation n°1	lixiviation n°2	lixiviation n°3	total
ratio L/S	10	20	30	-
volume affecté à la percolation (l)	1.0	1.0	1.0	-
masse mat. sec (kg MS)	0.100	0.100	0.100	-
pH	7.2	7.6	7.8	-
conduc. 20°C (µS/cm)	49	34	34	-
Cl (mg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
SO4 (mg/kg MS)	22	< 20	< 20	< 62
COT (mg/kg MS de C)	31	23	11	65
Cu (µg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
Zn (µg/kg MS)	1150	< 60	< 100	< 1310
Pb (µg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
Hg (µg/kg MS)	1.9	1.0	1.0	3.9
Mo (µg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
Hydrocarbures totaux (µg/kg MS)	615	< 505	< 510	< 1630
PCB n°28 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°52 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°101 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°118 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°138 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°153 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°180 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
total 7 isomères PCB (µg/kg MS)	< 2.1	< 2.1	< 2.1	< 6.3
Anthracène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Benzo(a)anthracène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Benzo(a)pyrène (µg/kg MS)	0.2	< 0.1	< 0.1	< 0.4
Benzo(b)fluoranthène (µg/kg MS)	0.2	< 0.3	< 0.3	< 0.8
Benzo(ghi)perylène (µg/kg MS)	0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Benzo(k)fluoranthène (µg/kg MS)	0.2	< 0.3	< 0.3	< 0.8
Dibenzo(ah)anthracène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Fluoranthène (µg/kg MS)	0.5	0.6	0.6	1.7
Indeno(123cd)pyrène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Naphthalene (µg/kg MS)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 3.0
Phénanthrène (µg/kg MS)	2.9	2.5	2.5	7.9
Pyrène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Chrysène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Méthyl(2)fluoranthène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Méthyl(2)naphthalène (µg/kg MS)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 3.0
Acénaphthylène (µg/kg MS)	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 1.5
Acénaphthène (µg/kg MS)	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 1.5
Fluorène (µg/kg MS)	0.4	< 0.3	< 0.3	< 1.0
total sur 18 HAP (µg/kg MS)	< 9.8	< 9.5	< 9.5	< 28.8

Tableau 32. Résultats sur les fraisats de classe a

paramètres	FRAISATS DE CLASSE B OU C (réf. 01/636)			
	lixiviation n°1	lixiviation n°2	lixiviation n°3	total
ratio L/S	10	20	30	-
volume affecté à la percolation (l)	1.0	1.0	1.0	-
masse mat. sec (kg MS)	0.100	0.100	0.100	-
pH	7.7	7.7	7.8	-
conduc. 20°C (µS/cm)	43	34	31	-
Cl (mg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
SO4 (mg/kg MS)	28	< 20	< 20	< 68
COT (mg/kg MS de C)	33	14	13	60
Cu (µg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
Zn (µg/kg MS)	< 100	< 100	< 100	< 300
Pb (µg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
Hg (µg/kg MS)	< 1.0	< 1.2	< 2.9	< 5.1
Mo (µg/kg MS)	< 50	< 50	< 50	< 150
Hydrocarbures totaux (µg/kg MS)	< 510	< 500	< 500	< 1510
PCB n°28 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°52 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°101 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°118 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°138 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°153 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
PCB n°180 (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
total 7 isomères PCB (µg/kg MS)	< 2.1	< 2.1	< 2.1	< 6.3
Anthracène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Benzo(a)anthracène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Benzo(a)pyrène (µg/kg MS)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.3
Benzo(b)fluoranthène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Benzo(ghi)perylène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Benzo(k)fluoranthène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Dibenzo(ah)anthracène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Fluoranthène (µg/kg MS)	0.5	< 0.3	< 0.3	< 1.1
Indeno(123cd)pyrène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Naphthalene (µg/kg MS)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 3.0
Phénanthrène (µg/kg MS)	2.0	1.7	2.0	5.7
Pyrène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Chrysène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Méthyl(2)fluoranthène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
Méthyl(2)naphthalène (µg/kg MS)	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 3.0
Acénaphtylène (µg/kg MS)	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 1.5
Acénaphène (µg/kg MS)	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 1.5
Fluorène (µg/kg MS)	< 0.3	< 0.3	< 0.3	< 0.9
total sur 18 HPA (µg/kg MS)	< 8.9	< 8.4	< 8.7	< 26.0

Tableau 33. Résultats sur les fraisats de classe b ou c

Essais de percolation simulée

Résultats bruts des essais

paramètres	essai de percolation n° 01/632					
	extrac. n°1	extrac. n°2	extrac. n°3	extrac. n°4	extrac. n°5	total
réf. échantillon eau	P1-01/632	P2-01/632	P3-01/632	P4-01/632	P5-01/632	-
ratio L/S cumulé	0.496	3.953	10.044	20.168	30.075	-
volume affecté à la percolation (l)	1.820	12.670	22.330	37.115	36.32	-
masse mat. sec (kg MS)	3.6660	3.6660	3.6660	3.6660	3.6660	-
pH	8.1	7.2	7.1	8.4	7.7	-
conduc. 20°C (µS/cm)	230	50	41	30	36	-
CONCENTRATIONS des eaux de percolation						
Cl (mg/l)	9.5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 29.5
SO4 (mg/l)	17	< 2	< 2	< 2	< 2	< 25
COT (mg/l de C)	11.4	2.4	1.0	0.6	0.8	16.2
Cu (µg/l)	13	< 5	< 5	< 5	< 5	< 33
Zn (µg/l)	71	30	< 10	< 10	< 10	< 131
Pb (µg/l)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 25
Hg (µg/l)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.2	0.3	< 0.8
Mo (µg/l)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 25
Hydrocarbures totaux (µg/l)	95	175	< 50	< 50	< 50	< 420
Polychlorobiphényl (PCB)						
total 7 isomères PCB (µg/l)	< 0.175	< 0.175	-	-	-	< 0.35
Hydrocarbures Polyaromatiques (HAP)						
total sur 18 HPA (µg/l)	< 0.765	< 0.615	< 0.605	< 0.605	< 0.605	< 3.195

Tableau 34. Essai de percolation simulée n° 01/632

paramètres	essai de percolation n° 01/633					
	extrac. n°1	extrac. n°2	extrac. n°3	extrac. n°4	extrac. n°5	total
réf. échantillon eau	P1-01/633	P2-01/633	P3-01/633	P4-01/633	P5-01/633	-
ratio L/S cumulé	0.722	4.281	10.594	20.024	30.093	-
volume affecté à la percolation (l)	2.640	13.020	23.090	34.490	36.83	-
masse mat. sec (kg MS)	3.6576	3.6576	3.6576	3.6576	3.6576	-
pH	8.1	7.7	7.4	7.6	8.1	-
conduc. 20°C (µS/cm)	175	49	36	30	35	-
CONCENTRATIONS des eaux de percolation						
Cl (mg/l)	6.2	< 5	< 5	< 5	< 5	< 26.2
SO4 (mg/l)	12	< 2	< 2	< 2	< 2	< 20
COT (mg/l de C)	8.5	2.1	1.0	0.7	0.8	13.1
Cu (µg/l)	8	< 5	< 5	13	< 5	< 36
Zn (µg/l)	53	30	< 10	< 10	< 10	< 113
Pb (µg/l)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 25
Hg (µg/l)	< 0.1	< 0.1	0.2	0.4	0.3	< 1.1
Mo (µg/l)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 25
Hydrocarbures totaux (µg/l)	215	140	< 50	< 50	< 50	< 505
Polychlorobiphényl (PCB)						
total 7 isomères PCB (µg/l)	< 0.175	< 0.175	-	-	-	< 0.35
Hydrocarbures Polyaromatiques (HPA)						
total sur 18 HPA (µg/l)	< 0.610	< 0.605	< 1.370	< 0.605	< 0.605	< 3.795

Tableau 35. Essai de percolation simulée n° 01/633

paramètres	essai de percolation n° 01/634					
	extrac. n°1	extrac. n°2	extrac. n°3	extrac. n°4	extrac. n°5	total
réf. échantillon eau	P1-01/634	P2-01/634	P3-01/634	P4-01/634	P5-01/634	-
ratio L/S cumulé	0.571	4.376	11.031	20.056	30.292	-
volume affecté à la percolation (l)	2.100	14.000	24.485	33.200	37.660	-
masse mat. sec (kg MS)	3.6790	3.6790	3.6790	3.6790	3.6790	-
pH	8.4	8.1	7.8	8.3	8	-
conduc. 20°C (µS/cm)	333	53	39	34	36	-
CONCENTRATIONS des eaux de percolation						
Cl (mg/l)	13	< 5	< 5	< 5	< 5	< 33
SO4 (mg/l)	33	< 2	< 2	< 2	< 2	< 41
COT (mg/l de C)	13.1	2.1	0.8	0.7	0.6	17.3
Cu (µg/l)	10	< 5	< 5	11	< 5	< 36
Zn (µg/l)	60	26	< 10	16	19	< 131
Pb (µg/l)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 25
Hg (µg/l)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.5
Mo (µg/l)	< 5	< 5	< 5	< 5	< 5	< 25
Hydrocarbures totaux (µg/l)	< 50	260	< 50	< 50	< 50	< 460
Polychlorobiphényl (PCB)						
total 7 isomères PCB (µg/l)	< 0.175	< 0.175	-	-	-	< 0.35
Hydrocarbures Polyaromatiques (HPA)						
total sur 18 HPA (µg/l)	< 0.605	< 0.610	< 0.605	< 0.605	< 0.605	< 3.030

Tableau 36. Essai de percolation simulée n° 01/634

paramètres	essai de percolation n° 01/635					
	extrac. n°1	extrac. n°2	extrac. n°3	extrac. n°4	extrac. n°5	total
réf. échantillon eau	P1-01/635	P2-01/635	P3-01/635	P4-01/635	P5-01/635	-
ratio L/S cumulé	0.403	1.272	2.016	5.315	-	-
volume affecté à la percolation (l)	1.485	3.205	2.745	12.170	-	-
masse mat. sec (kg MS)	3.6885	3.6885	3.6885	3.6885	-	-
pH	8.3	7.5	7.3	7.7	-	-
conduc. 20°C (µS/cm)	377	140	86	61	-	-
CONCENTRATIONS des eaux de percolation						
Cl (mg/l)	14	< 5	< 5	< 5	-	< 29
SO4 (mg/l)	37	4	< 2	< 2	-	< 45
COT (mg/l de C)	14.1	5.1	2.6	1.6	-	23.4
Cu (µg/l)	45	13	14	< 5	-	77
Zn (µg/l)	370	90	57	20	-	537
Pb (µg/l)	14	8	< 5	< 5	-	< 32
Hg (µg/l)	< 0.1	< 0.1	0.2	< 0.1	-	< 0.5
Mo (µg/l)	6	< 5	< 5	< 5	-	< 21
Hydrocarbures totaux (µg/l)	< 50	< 50	< 50	< 50	-	< 200
Polychlorobiphényl (PCB)						
total 7 isomères PCB (µg/l)	< 0.175	< 0.175	-	-	-	< 0.35
Hydrocarbures Polyaromatiques (HPA)						
total sur 18 HPA (µg/l)	< 0.625	< 0.605	< 0.605	< 0.605	-	< 2.440

Tableau 37. Essai de percolation simulée n° 01/634

Commentaires relatifs à l'évaluation du protocole d'essai (essais 01/634 et 635)

La mise au point et l'évaluation du mode opératoire de l'essai de percolation (scénarios "couches de chaussées" et "mise en stock"), ne constituaient pas les objectifs principaux de la présente étude. Les essais 01/634 et 01/635 ont été entrepris essentiellement pour compléter le

plan d'expérience relatif au sujet de recherche mené par le CETE Ouest, dans le cadre de l'opération "Recyclage et matériaux non conventionnels" (comité de programme D / LCPC). Des commentaires succincts, sont cependant proposés ci-après.

Evaluation de la répétabilité

Comme nous ne disposons que d'une série de 2 essais identiques (01/632 et 01/633), il n'est donc pas possible de déterminer des valeurs de répétabilité, selon une méthode statistique sérieuse (NF ISO 5725-2). Seule une évaluation des étendues a été réalisée, uniquement sur les paramètres d'analyse, jugés significatifs lors des premières extractions (concentration supérieure au seuil de détection analytique). Les résultats sont présentés dans le Tableau 38.

<i>paramètres</i>	<i>n°essai</i>	QUANTITES EXTRAITES					<i>total</i>
		<i>extrac. n°1</i>	<i>extrac. n°2</i>	<i>extrac. n°3</i>	<i>extrac. n°4</i>	<i>extrac. n°5</i>	
volume affecté à l'extraction (litres)	01/632	1.82	12.67	22.33	37.11	36.32	110.25
	01/633	2.10	14.00	24.48	33.20	37.66	111.44
Cl (mg/kg MS)	01/632	4.7	17.3	30.5	50.6	49.5	152.6
	01/633	4.5	17.8	31.6	47.1	50.3	151.3
	<i>moyenne 632-633</i>	4.6	17.5	31.0	48.9	49.9	152.0
	<i>étendue 632-633 (%)</i>	5	3	4	7	1.6	0.8
SO4 (mg/kg MS)	01/632	8.4	6.9	12.2	20.2	19.8	67.6
	01/633	8.7	7.1	12.6	18.9	20.1	67.4
	<i>moyenne 632-633</i>	8.6	7.0	12.4	19.6	20.0	67.5
	<i>étendue 632-633 (%)</i>	3	3	4	7	1.6	0.3
COT (mg/kg MS de C)	01/632	5.7	8.3	6.1	6.1	7.9	34.0
	01/633	6.1	7.5	6.3	6.6	8.1	34.6
	<i>moyenne 632-633</i>	5.9	7.9	6.2	6.3	8.0	34.3
	<i>étendue 632-633 (%)</i>	8	10	4	8	2	1.6
Cu (µg/kg MS)	01/632	6.5	17.3	30.5	50.6	49.5	154.3
	01/633	5.8	17.8	31.6	122.6	50.3	228.1
	<i>moyenne 632-633</i>	6.1	17.5	31.0	86.6	49.9	191.2
	<i>étendue 632-633 (%)</i>	11	3	4	83	2	39
Zn (µg/kg MS)	01/632	35.2	103.7	60.9	101.2	99.1	400.2
	01/633	38.3	106.8	63.1	94.3	100.7	403.2
	<i>moyenne 632-633</i>	36.8	105.2	62.0	97.8	99.9	401.7
	<i>étendue 632-633 (%)</i>	8	3	4	7.1	1.6	0.7
Hydrocarbures totaux (µg/kg MS)	01/632	47.2	604.8	304.6	506.2	495.4	1958.1
	01/633	155.2	498.4	315.6	471.5	503.5	1944.1
	<i>moyenne 632-633</i>	101.2	551.6	310.1	488.8	499.4	1951.1
	<i>étendue 632-633 (%)</i>	107	19.3	4	7	1.6	0.7

Tableau 38. évaluation de la répétabilité

En dehors du cuivre, les étendues obtenues sur les quantités extraites sont globalement satisfaisantes (étendue < 2% pour le total des extractions / étendue < 10% pour les extractions intermédiaires). Ces bons résultats (en jaune), qui permettent de considérer cet essai comme globalement répétable, doivent cependant être pondérés, dans la mesure où des étendues élevées (en rouge) peuvent être calculées pour les certaines extractions intermédiaires. Etant donné que les quantités extraites sont calculées en affectant la concentration mesurée à un volume de percolation de plus en plus important au fur et à mesure que l'on atteint les

dernières extractions, seuls les artefacts (concentration anormalement forte) mesurés lors des dernières extractions sont susceptibles de faire varier de façon significative la quantité extraite totale.

Cet effet de "lissage" intervient pour l'essai 01/633, pour lequel la forte étendue (107%), calculée sur le paramètre hydrocarbures de la 1ère extraction, n'entraîne pas d'augmentation de l'étendue globale. Par contre, dès qu'un artefact est mesuré sur une des dernières extractions (cas du cuivre pour la 4ème extraction de l'essai 01/633), il contribue à augmenter de façon importante l'étendue globale (39%). Comme dans le cas des fraisats étudiés, la plupart des concentrations mesurées atteignent rapidement (dès la 2ème ou la 3ème extraction) les seuils de détection analytique, les étendues globales et donc la répétabilité de l'essai de percolation ne peuvent être que bonnes.

Il est donc légitime de penser que la répétabilité de l'essai de percolation dépend moins du mode opératoire que de la nature des déchets, qui sont caractérisés par cette technique. Des classes de répétabilité ne pourront être proposées, pour des niveaux de relargage homogènes, fonction de la mobilité (solubilité) de l'espèce recherchée.

Influence de la granulométrie de l'échantillon sur le relargage

Pour évaluer l'influence de la granulométrie de l'échantillon sur le relargage, la moyenne des résultats des essais 01/632 et 01/633, a été comparée avec les résultats de l'essai 01/634, pour lequel les fraisats ont été broyés à 4 mm. La comparaison se fait sur les résultats exprimés en quantités extraites (concentration mesurée x volume affecté à l'extraction concernée). Comme précédemment, seuls les paramètres donnant lieu à des relargages jugés suffisamment significatifs ont été étudiés. Les résultats sont synthétisés sur le Tableau 39.

<i>paramètres</i>	<i>n°essai</i>	QUANTITES EXTRAITES					
		<i>extrac. n°1</i>	<i>extrac. n°2</i>	<i>extrac. n°3</i>	<i>extrac. n°4</i>	<i>extrac. n°5</i>	<i>total</i>
volume affecté à l'extraction (litres)	moy. 01/632-633	1.96	13.34	23.41	35.16	36.99	110.85
	01/634	2.10	14.00	24.49	33.20	37.66	111.45
Cl (mg/kg MS)	moy. 01/632-633	4.6	17.5	31.0	48.9	49.9	152.0
	01/634	7.4	19.0	33.3	45.1	51.2	156.0
	<i>étendue (%)</i>	47	8	7	8	2	3
SO4 (mg/kg MS)	moy. 01/632-633	8.6	7.0	12.4	19.6	20.0	67.5
	01/634	18.8	7.6	13.3	18.0	20.5	78.3
	<i>étendue (%)</i>	75	8	7	8	2	15
COT (mg/kg MS de C)	moy. 01/632-633	5.9	7.9	6.2	6.3	8.0	34.3
	01/634	7.5	8.0	5.3	6.3	6.1	33.3
	<i>étendue (%)</i>	24	1	15	0.3	26	3
Cu (µg/kg MS)	moy. 01/632-633	6.1	17.5	31.0	86.6	49.9	191.2
	01/634	5.7	19.0	33.3	99.3	51.2	208.5
	<i>étendue (%)</i>	7	8	7	14	2	9
Zn (µg/kg MS)	moy. 01/632-633	36.8	105.2	62.0	97.8	99.9	401.7
	01/634	34.2	98.9	66.6	144.4	194.5	538.6
	<i>étendue (%)</i>	7	6	7	39	64	29
Hydrocarbures totaux (µg/kg MS)	moy. 01/632-633	101.2	551.6	310.1	488.8	499.4	1951.1
	01/634	28.5	989.4	332.8	451.2	511.8	2313.7
	<i>étendue (%)</i>	112	57	7	8	2	17

Tableau 39. Influence de la granulométrie de l'échantillon sur le relargage

On remarque tout d'abord que les étendues sont globalement supérieures à celles qui ont été obtenues lors de la comparaison des essais 01/632 et 01/633, ce qui traduit que la réduction granulométrique de l'échantillon a une influence sur le relargage. Cette influence se manifeste de la façon suivante :

Pour les espèces les plus solubles (chlorures, sulfates), la quantité extraite, lors de la première extraction, est nettement plus élevée pour l'essai 01/634. Cette situation peut s'expliquer par l'augmentation de la surface spécifique (non recouverte de liant) de l'échantillon. Pour les extractions suivantes, l'effet de "lissage", déjà évoqué précédemment, intervient pour atténuer l'étendue calculée sur les quantités extraites globales. Le même constat peut être établi pour le relargage en COT.

Pour les espèces métalliques peu solubles, en particulier le zinc, la quantité extraite est, comme précédemment, supérieure pour l'essai pour lequel les fraisats ont été fractionnés à 4 mm (01/634). Par contre le relargage (concentration supérieure au seuil de détection) est réparti sur 4 des 5 extractions, pour l'essai 01/634. Pour le protocole de percolation "standard" (moyenne 01/632 et 633) seules les deux premières extractions dépassaient les seuils, comme le montre la Figure 38 :

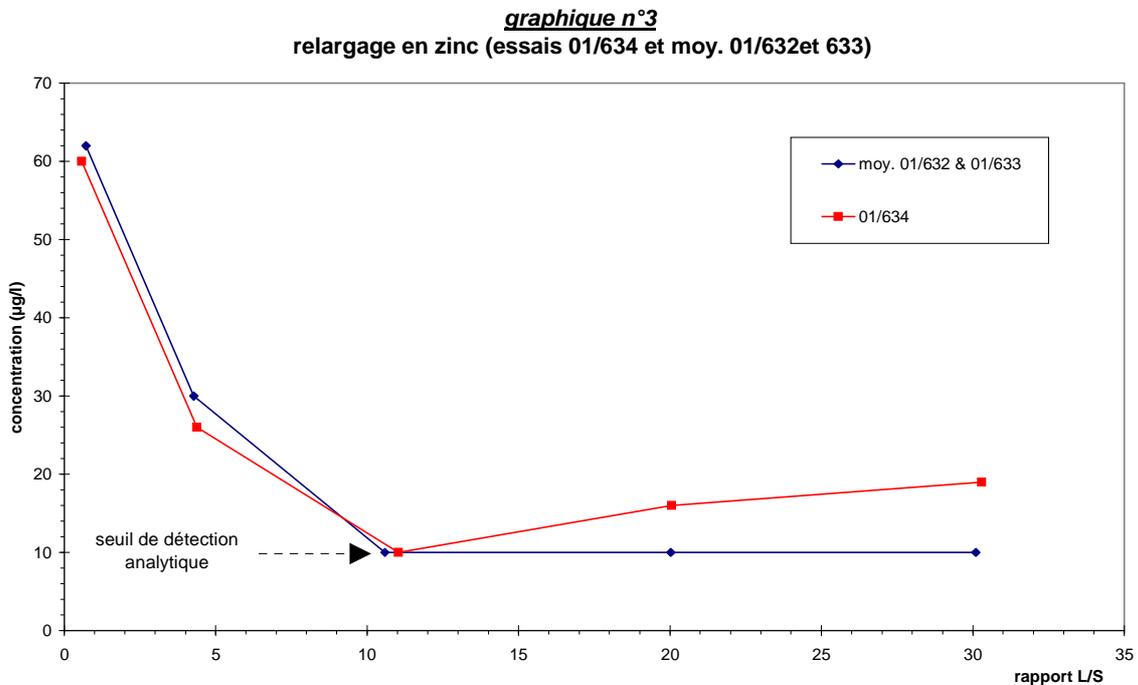


Figure 38. Influence de la granulométrie sur le relargage.

L'augmentation des quantités extraites, pour les dernières extractions, laisse présager une possible influence du mode de transfert des éléments peu solubles (Zn), depuis la matrice des fraisats vers l'eau d'extraction. En début de percolation, la convection est le mode de transfert privilégié pour toutes les espèces. En fin de percolation, la diffusion pourrait intervenir sur le relargage des éléments peu solubles (Zn), en particulier si l'échantillon a subi un fractionnement (augmentation de la surface d'échange).

La quantité extraite d'hydrocarbures totaux est plus importante dans le cas de l'essai 01/634, principalement du fait de l'existence d'un artefact de concentration mesuré, lors de la 2ème extraction. Cette forte concentration est donc dans ce cas affectée à un volume de percolation, plus élevé que pour l'essai "standard" (moyenne "01/632 et 633).

Pour le cuivre un léger artefact est également mesuré pour la 4ème extraction de l'essai 01/634. Les concentrations mesurées inférieures ou tangentes aux seuils de détection analytique ne permettent pas de tirer de conclusion définitive.

Influence de la vitesse de percolation sur le relargage

L'influence de la vitesse de percolation sur le relargage des fraisats a été évaluée à partir des résultats des essais 01/634 (rapport L/S journalier = 0.4) et 01/635 (rapport L/S journalier = 0.04). Contrairement aux essais précédents (01/632 à 01/634), pour lesquels les 5 extractions étaient réalisées pour des valeurs de L/S cumulés assez similaires (0.5, 5, 10, 20 et 30), l'essai 01/635 (globalement 10 fois plus lent que les précédents) a été réalisé avec des extractions effectuées sur des L/S nettement plus faibles (0.4, 1.2, 2, 5.3). La 5ème extraction de l'essai 01/635, programmée pour juillet 2002, sera réalisée à la valeur de L/S cumulés de 11 (3ème extraction de l'essai 01/634), pour permettre une comparaison objective.

Les résultats, disponibles à ce jour, sont synthétisés dans le Tableau 40 :

<i>paramètres</i>	<i>n°essai</i>	QUANTITES EXTRAITES					
		<i>extrac. n°1</i>	<i>extrac. n°2</i>	<i>extrac. n°3</i>	<i>extrac. n°4</i>	<i>extrac. n°5</i>	<i>total</i>
rapport L/S cumulé	01/634	0.57	4.37	11.03	20.05	30.29	-
	01/635	0.40	1.27	2.01	5.31	11 ⁽¹⁾	-
volume affecté à l'extraction (litres)	01/634	2.10	14.00	24.49	33.20	37.66	16.1 ⁽²⁾
	01/635	1.49	3.21	2.75	12.17	-	19.6 ⁽³⁾
Cl (mg/kg MS)	01/634	7.4	19.0	33.3	45.1	51.2	26.4 ⁽²⁾
	01/635	5.6	4.3	3.7	16.5	-	30.2 ⁽³⁾
SO4 (mg/kg MS)	01/634	18.8	7.6	13.3	18.0	20.5	26.4 ⁽²⁾
	01/635	14.9	3.5	1.5	6.6	-	26.5 ⁽³⁾
COT (mg/kg MS de C)	01/634	7.5	8.0	5.3	6.3	6.1	15.5 ⁽²⁾
	01/635	5.7	4.4	1.9	5.3	-	17.3 ⁽³⁾
Cu (µg/kg MS)	01/634	5.7	19.0	33.3	99.3	51.2	24.7 ⁽²⁾
	01/635	18.1	11.3	10.4	16.5	-	56.3 ⁽³⁾
Zn (µg/kg MS)	01/634	34.2	98.9	66.6	144.4	194.5	133.2 ⁽²⁾
	01/635	149.0	78.2	42.4	66.0	-	335.6 ⁽³⁾
Hydrocarbures totaux (µg/kg MS)	01/634	28.5	989.4	332.8	451.2	511.8	1017.9 ⁽²⁾
	01/635	20.1	43.4	37.2	165.0	-	265.8 ⁽³⁾

⁽¹⁾ extraction non réalisée, programmée pour juillet 2002

⁽²⁾ total sur les deux premières extractions

⁽³⁾ total sur 4 extractions

Tableau 40. Influence de la vitesse de percolation sur le relargage

On peut noter les tendances suivantes :

- la vitesse de percolation n'a que peu d'influence sur le relargage des espèces les plus solubles,
- le relargage des espèces les moins solubles (métaux : Cu et surtout Zn) est d'autant plus important que la percolation est lente. Ces dernières conditions de percolation favorisent les phénomènes de diffusion,
- le relargage des hydrocarbures totaux est d'autant plus important que la vitesse de percolation est rapide. La percolation lente (essai 01/635), peut favoriser les phénomènes de dégradation (photochimiques) des chaînes hydrocarbonées courtes. Ce constat peut également être fait pour les HAP, paramètres pour lesquels les

concentrations mesurées dans les eaux de percolation de l'essai 01/635, sont systématiquement inférieures aux seuils de détection analytique.

Comparaison des essais de lixiviation et de percolation simulée

Cette comparaison a été effectuée uniquement avec l'essai 01/634, pour lequel :

- nous disposons d'extractions qui atteignent un L/S cumulé de 30,
- l'échantillon a été fractionné à 4mm.

Les résultats de cette comparaison sont présentés dans les graphiques de la Figure 39.

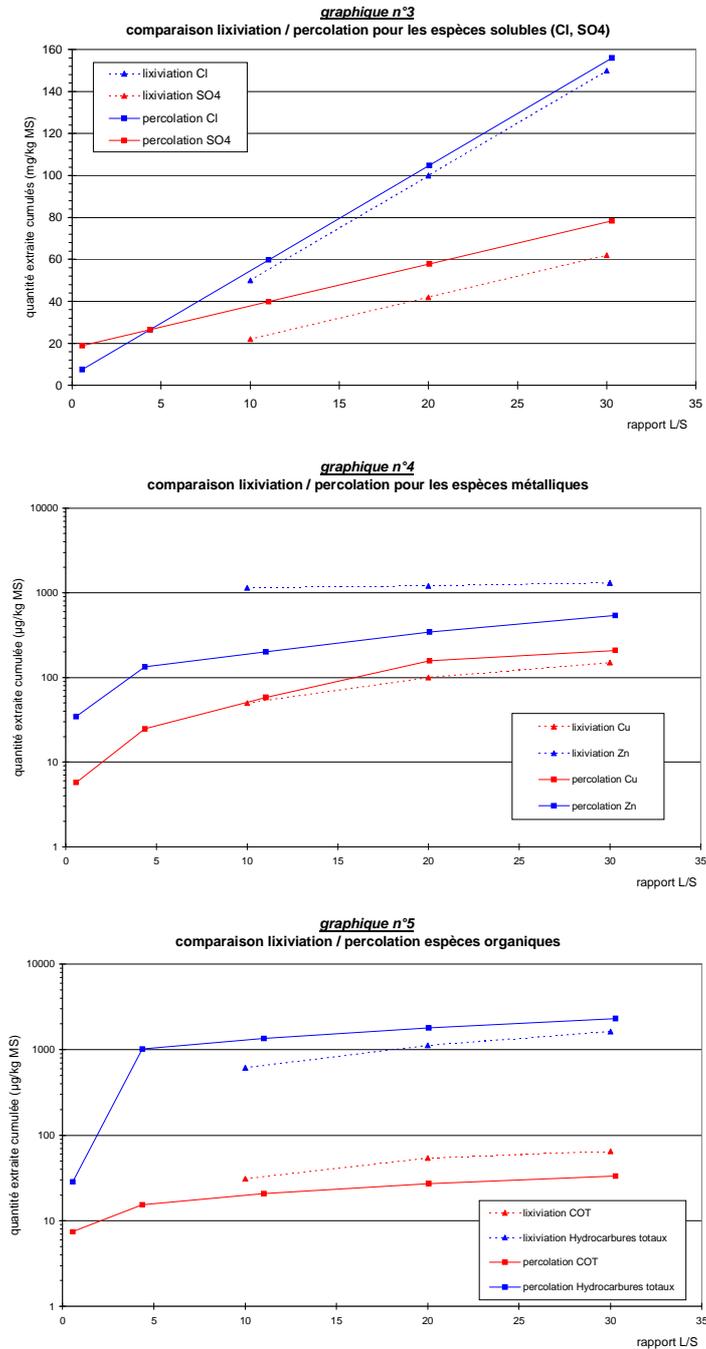


Figure 39. Comparaison des essais de lixiviation et de percolation simulée

On observe que les quantités extraites, obtenues par l'essai de percolation sont globalement supérieures à celles obtenues avec l'essai de lixiviation. L'écart est d'autant plus important que

les espèces sont peu solubles. Ce qui s'explique par l'action de la diffusion qui intervient, du fait du maintien de l'échantillon dans des conditions de saturation sur des durées plus importantes (48 h pour la lixiviation contre environ 75 jours pour la percolation).

Le zinc et le COT échappent cependant à cette règle. On note en effet que la quantité extraite par la lixiviation, dès la première extraction est plus importante que celle obtenue par percolation. Cette situation un peu surprenante, peut s'expliquer par une représentativité moindre de l'échantillon destiné à la percolation (100g), par rapport à celui destiné à la percolation simulée (3600 g).