



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. Collecte des données environnementales

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. Collecte des données environnementales. Agnès Jullien. IFSTTAR - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, pp.66-116, 2006, Etudes et Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées - série chaussées, 2-7208-2467-4. hal-00932819

HAL Id: hal-00932819

<https://hal.science/hal-00932819v1>

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, Bouguenais (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, Bagnaux (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

CHAPITRE 4 : COLLECTE DE DONNEES ENVIRONNEMENTALES

4.1. INTRODUCTION A LA COLLECTE DE DONNEES

Les données environnementales collectées dans cette partie sont nécessaires à l'analyse de l'inventaire du cycle de vie. Elles peuvent être classées en trois catégories de données : i) celles intégrées directement à la liste d'inventaire (par exemple les consommations), ii) celles intermédiaires servant à valider l'expérimentation, en permettant d'expliquer physiquement l'évolution d'un paramètre (par exemple la teneur en eau des granulats pour expliquer une variation de la consommation en gaz naturel), et iii) celles permettant d'expliciter le résultat d'une mesure dans l'optique de son intégration dans la liste d'inventaire (par exemple la vitesse des gaz pour le calcul des flux).

La collecte de données a été articulée, selon les besoins de l'étude RN 76, autour des trois axes suivants :

- recherche bibliographique dans les problématiques éloignées du domaine de compétence du LCPC et indispensables à la formalisation complète du problème posé (ex : consommations des véhicules de transport),
- estimation sur site des données ne pouvant faire l'objet d'une mesure en continu et nécessitant une approche analytique pour l'estimation de l'incertitude (ex : consommation moyenne des engins par différence de relevés compteurs),
- mesures sur les sites permettant d'établir une loi de répartition conduisant au calcul d'une valeur moyenne et d'un intervalle de confiance.

Tous les résultats de la collecte de données sont présentés ci-après. La liste complète des données nécessaires à la formalisation de la liste d'inventaire est présentée dans l'annexe 4.A tandis que les détails des méthodes de mesure utilisées sont fournis dans les annexes 4.B à 4.E. Les paragraphes ci-après détaillent l'ensemble des résultats obtenus.

4.2. DONNEES COLLECTEES SUR LES CONSOMMATIONS ET LES DECHETS

4.2.1. Consommations de la centrale d'enrobage

Matériaux constitutifs de l'enrobé

Les enrobés bitumineux élaborés à chaud sont classiquement constitués d'un mélange de différentes classes granulaires, et de liant bitumineux. Dans les cas étudiés de recyclage, des fraisats sont utilisés en remplacement de ces matériaux classiques. Le Tableau 4 - 1 présente les consommations de liant, de fraisats et de granulats par classe granulaire pour les quatre fabrications d'enrobés du chantier RN76.

Ces consommations ont été calculées, pour une fabrication de 100 tonnes d'enrobés, en fonction des compositions réelles de ces enrobés (chapitre 3).

	Gravillons 6/10	Gravillons 2/6	Sable 0/2	Fines	Fraisats	Bitume d'apport
	tonnes					
Classique	42,7	18,3	32,4	1,4	0	5,22
Taux de 10%	39,8	15,4	29,1	1,4	9,6	4,64
Taux de 20%	37,4	12,3	25,9	1,4	18,9	4,13
Taux de 30%	37,1	7,5	21,1	1,9	28,6	3,65

Tableau 4 - 1. Consommations de matériaux en tonnes pour 100 tonnes d'enrobés

Energie électrique de la centrale

La consommation électrique du poste d'enrobage est liée à l'utilisation de moteurs électriques qui assurent les fonctions de : dosage des constituants, transport des constituants par tapis convoyeurs, mise en rotation du tambour sécheur, évacuation par l'exhausteur des rejets gazeux à l'atmosphère et transport de l'enrobé par skip. A un degré moindre, l'énergie électrique est aussi utilisée pour le traçage électrique des canalisations (maintien en température ou chauffage en ligne).

Les consommations électriques ont été estimées à l'aide du compteur de consommation électrique totale de la centrale. Les différences de relevés entre le début et la fin de chaque modalité de fabrication, ont permis d'obtenir les consommations. Elles ont ensuite été rapportées à 1 heure de fabrication dans le Tableau 4 - 2.

Modalité (taux de recyclage)	Consommation électrique (KWh)
Classique 0%	140
Taux de 10%	160
Taux de 20%	140
Taux de 30%	70* → 140

Tableau 4 - 2. Consommations électriques horaires de la centrale
* mesure considérée aberrante

Par rapport à une fabrication classique, le recyclage d'agrégats d'enrobés nécessite l'utilisation d'un doseur et d'un tapis d'alimentation supplémentaires. Cependant, on n'obtient pas de différence de consommation entre la fabrication classique et le taux de 20%. Ainsi, la différence de consommation entre la modalité à 10% et celles à 0% et 20% n'a pas été considérée significative.

D'autre part, la mesure de consommation électrique de la modalité à 30% a été considérée comme aberrante, et arbitrairement fixée à 140 KWh. En effet, le résultat obtenu n'est pas explicable par l'analyse du procédé. Même si le recyclage d'agrégats d'enrobés nécessite l'utilisation, par rapport à une fabrication classique d'un doseur supplémentaire et d'un tapis d'alimentation, la quantité totale d'énergie électrique à fournir est principalement conditionnée par le moteur de l'exhausteur et la mise en rotation du tambour. Or, une différence pour la modalité à 30% n'est pas explicable par la mise en rotation du tambour, car sa charge initiale est équivalente à

celles des autres modalités (elles ont été réalisées à des cadences identiques). De plus, l'exhausteur fonctionnant à vitesse fixe, il n'y a pas non plus de différence au niveau de la consommation électrique liée au fonctionnement de cet exhausteur, même en cas de variation du débit gazeux à évacuer, puisqu'une perte de charge additionnelle compense les variations de perte de charge dues aux variations de ce volume gazeux. La mesure reportée dans le Tableau 4 - 3, a été attribuée à une erreur d'échantillonnage (interprétation erronée entre les compteurs heures pleines et heures creuses).

Gaz naturel de la centrale

La consommation en gaz naturel a été évaluée à partir d'un relevé en temps réel du compteur à gaz de la centrale d'enrobage, pour chacune des fabrications. Pour minimiser l'imprécision, chaque fabrication a été réalisée en respectant les mêmes procédures de démarrage et d'arrêt du brûleur (montée en puissance) et du tambour (mise en rotation).

Après les travaux, ces mesures ont été comparées au comptage effectué par Gaz de France, et disponible chez le gestionnaire gaz du parc routier. Ce comptage consiste en une moyenne horaire de débit de gaz consommé; à partir des informations de débit de gaz cumulé, et de température et de pression d'alimentation. Contrairement aux mesures effectuées sur le site, il n'est donc pas synchronisé avec les fabrications. De ce fait les informations obtenues par ce biais n'ont pu servir que d'indicateur pour la tendance d'évolution des relevés compteur.

Le Tableau 4 - 3 regroupe les données obtenues à partir du relevé du compteur à gaz installé sur la centrale d'enrobage et des comptages GDF.

Modalités	Compteur centrale					Suivi GDF		
	début	fin	consommation			début	fin	consommation Horaire (Nm ³ /h)
			mesurée (Nm ³)	horaire (Nm ³ /h)	rapportée à la production (Nm ³ /t)			
Classique 0%	7h30	8h40	630	540	5,84	7h00	8h00	670
Taux de 10%	9h12	10h20	679	599	6,70	9h00	10h00	760
Taux de 20%	10h50	11h50	580	580	5,94	11h00	12h00	410
Taux de 30%	14h00	15h00	594	594	5,90	14h00	15h00	560

Tableau 4 - 3. Consommations en gaz naturel de la centrale

Le Nm³ est l'unité de volume ramenée aux conditions normales de température (0°C) et de pression (1014 mbars).

On constate que pour trois des modalités (classique, avec taux de 20% et avec 30%) les consommations à la tonne d'enrobés ne sont pas très différentes, mais que celle-ci diffère pour la fabrication à 10%. Ce résultat n'est pas explicable en l'état des connaissances et une analyse fine du procédé serait nécessaire. Il est possible que cette consommation traduise une modification des conditions de combustion

Carburant du chargeur

Le site de la centrale d'enrobage comprend une aire de stockage des constituants granulaires de l'enrobé, stockés séparément les uns des autres. Le respect des proportions des différents constituants de l'enrobé est assuré par les prédoseurs de la centrale d'enrobage. L'approvisionnement des prédoseurs est assurée en

permanence par un chargeur, qui effectue des trajets entre les stocks et les prédoseurs. La disposition des stocks est adaptée pour minimiser les trajets du chargeur, de manière à ne pas perturber la cadence horaire de la centrale.

Le temps de travail du chargeur a été considéré comme identique à celui de la centrale. De ce fait, l'utilisation des agrégats d'enrobé a été considérée sans conséquence notable sur le temps de fonctionnement du chargeur, car le temps de fonctionnement de la centrale est identique, même si le procédé requiert un prédoseur supplémentaire pour les agrégats.

Cette consommation a été estimée à 11 L/h, à partir des consommations moyennes et des temps de fonctionnement établis par le parc routier lors des bilans annuels.

Taux de recyclage	0 %	10 %	20 %	30 %
fuel (kg/h)	9,2	9,2	9,2	9,2

Tableau 4 - 4. Consommation horaire en fuel du chargeur de la centrale

4.2.2. Consommations des engins de chantier

Les consommations des engins de chantier en fonctionnement ont été obtenues en se basant sur les mesures des durées de fonctionnement. Cependant, pour des raisons de rapidité d'exécution et de moindre gêne à l'usager, le chantier ne pouvait pas être effectué en réalisant indépendamment les quatre planches l'une après l'autre. Ainsi, seules les consommations sur la durée totale de fonctionnement des engins ont pu être obtenues à la fin du chantier. Elles ont été ensuite rapportées à chaque modalité selon des méthodes, spécifiques au fonctionnement de chaque engin.. Les méthodes et les résultats sont présentés ci-après pour chaque engin.

Carburant et eau consommés par le fraisage

La fraiseuse a travaillé sur une portion de chaussée de 600 m de longueur et 3,8 m de largeur selon différentes modalités de vitesses et de profondeur nécessaires à l'expérience (Figure 4 - 1), mais sans distinction entre les planches.

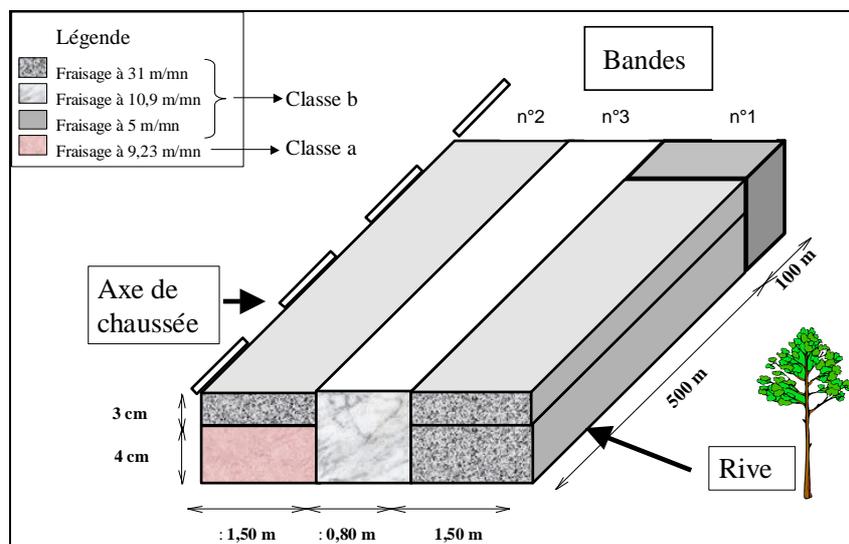


Figure 4 - 1. Conditions expérimentales de fraisage spécifiques au tronçon de la RN 76

Du fait de la largeur de la fraiseuse utilisée (1,5 m), le fraisage s'est effectué en trois bandes qui ont été numérotées arbitrairement (afin de les différencier) comme suit : deux bandes n°1 et n°2 de largeur 1,50 m et une bande n°3 de largeur 0,80 m.

Pour chaque variation de vitesse et/ou d'épaisseur, la durée de fonctionnement a été chronométrée et est présentée dans le Tableau 4 - 5

Bandes (Figure 4 - 1)	Couche de chaussée	Paramètres de fraisage				Type de fraisats	Durée (min)
		longueur (m)	largeur (m)	épaisseur (cm)	vitesse (m/min)		
rive N°1	roulement	500	1,50	3	14,3	Déchet classe c	35
	liaison	500	1,50	4	14,3		35
	liaison + roulement	100	1,50	7	5		20
	roulement	600	1,50	3	31		19*
axe N°2	liaison	600	1,50	4	9,23	Recyclable classe a	65*
	Centrale N°3	liaison + roulement	600	0,80	7	10,9	Déchet classe c
TOTAL							3h49 min

Tableau 4 - 5. Durées de fonctionnement de la fraiseuse en fonction des différentes conditions de fraisage

()durées effectives de fraisage pour des phases qui n'intègrent ni le fait que la fraiseuse recule ni une attente de camions; les autres durées englobent ces effets supplémentaires*

Seule la consommation totale de gasoil a été relevée : le plein a été effectué avant et après la réalisation du fraisage, et correspond à une consommation de 350 L de gasoil pour l'ensemble des opérations de fraisage.

De même, seule la consommation totale en eau a été relevée : le plein d'eau de la fraiseuse a été effectué à plusieurs reprises à une borne à incendie à proximité du chantier, afin de réduire au maximum les temps d'attente et les distances à couvrir hors fraisage. Un volume de 4800 L d'eau a été consommé pour l'ensemble des opérations de fraisage.

Carburant et eau consommés par le balayage

Pour le chantier RN 76, la balayeuse s'est positionnée immédiatement derrière la fraiseuse et a balayé de manière similaire et continue, quelle que soit la largeur ou la longueur de la bande fraisée. La vitesse de balayage est très lente, quasiment la même que celle de la fraiseuse, mais il n'y a pas lieu de distinguer différents cas comme pour le fraisage car le balayage s'effectue toujours dans les mêmes conditions.

Pour la journée de fonctionnement, les consommations moteur principal (déplacement) et du moteur auxiliaire (rotation des balais) ont été mesurées à 75 L et 40 L respectivement. Par ailleurs, en fonctionnement normal sur route, le moteur du camion consomme 28 L aux 100 km. Un total de 2000 L d'eau a été utilisé durant la

journee par le balayeuse. La masse des balayures récupérées a été estimée à 30 tonnes.

Matériau, carburant et gaz consommés par la répandeuse

La couche d'accrochage (émulsion constituée d'eau et de bitume) a pour fonction de permettre une meilleure adhésion de l'enrobé mis en œuvre. Elle est déposée juste avant le passage du finisseur. Du fait de la largeur de l'engin, le dépôt de la couche d'accrochage s'est effectué en une seule passe.

Le dosage retenu pour l'ensemble des planches du chantier était de 300 g/m²; toute la surface de chaque planche étant recouverte.

La durée de répandage de la couche d'accrochage relevée par chronométrage a été la même pour chaque planche, soit environ 5 min, quelque soit le taux de recyclage.

La consommation de l'engin dans les conditions de travail a été estimée à 10 L/h.

Le chauffeur a estimé sa consommation en gaz à une bouteille de propane de 84 L par mois, pour une heure par jour de fonctionnement, soit environ 20 h.

Sur la base de ces données les différentes consommations () ont été calculées, et sont les mêmes pour chaque planche.

Emulsion bitume		Durée (min)	Gasoil		Propane		
dosage (g/m ²)	surface (m ²)		consommation (kg)	unitaire (L/h)	unitaire (L/h)	planche (L)	
300	570	171	5	10	0,83	4,2	0,35

Tableau 4 - 6. Consommations en émulsion, gasoil et propane de la répandeuse

Carburant et gaz consommés par le finisseur

Le finisseur a été réglé pour un dosage moyen de 160 kg/m². Pour s'assurer que la longueur prévue (150 m) serait respectée, un marquage de la chaussée a été effectué. L'enrobé a été déposé en une seule passe. Le finisseur a fonctionné, de à vitesse identique quelque soit le taux de recyclage, pendant 3 h 20 min, soit une vitesse d'environ 6 m/min, et une durée de 50 ± 3 minutes par planche. L'incertitude dans le chronométrage est due au temps d'attente qui peut exister entre deux camions d'enrobés.

La consommation totale en gasoil pour les quatre planches a été mesurée à 100 L (plein en fin de chantier).

Du propane est utilisé pour réchauffer l'enrobé. Le chauffeur du finisseur a indiqué une consommation totale de deux bouteilles 84 L.

Du fait d'un temps de travail identique pour les quatre planches d'enrobés, les consommations totales ont donc été divisées par quatre pour obtenir la consommation par planche (Tableau 4 - 7).

Durée (min)		Gasoil		Propane	
totale	planche	totale	planche	totale	planche
200 ± 12	50 ± 3	100	25 ± 0,5	168	42

Tableau 4 - 7. Consommations en gasoil et propane du finisseur

Carburant et eau consommés par les compacteurs

Deux types de compacteurs ont été utilisés : un compacteur pneu et un compacteur vibrant. Les durées de fonctionnement ont été chronométrées, pour chaque engin et chaque modalité, les temps d'arrêt étant décomptés de manière à calculer la consommation au plus juste

Les consommations totales des deux compacteurs ont été déterminées à la fin des travaux. Seul le compacteur vibrant utilise de l'eau et a consommé 500 L d'eau pour la journée. Les consommations totales de chaque compacteur sont de 122 L et 212 L de gasoil pour le vibrant et pour le pneu respectivement. Les consommations de gasoil et d'eau par modalité ont été calculées pour chaque compacteur au prorata des temps de fonctionnement des engins. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4 - 8.

Compacteur	Modalité	Durée (min)	Gasoil (L)	Eau (L)
pneu	TOTAL	212 ± 20	33,4 ± 2	
	Classique 0%	60 ± 5	6 ± 0,5	
	Taux de 10%	52 ± 5	5,2 ± 0,5	
	Taux de 20%	45 ± 5	4,5 ± 0,5	
	Taux de 30%	55 ± 5	5,5 ± 0,5	
vibrant	TOTAL	122 ± 20	12,2 ± 2	500 ± 80
	Classique 0%	40 ± 5	4 ± 0,5	164 ± 20
	Taux de 10%	35 ± 5	3,5 ± 0,5	143 ± 20
	Taux de 20%	25 ± 5	2,5 ± 0,5	102 ± 20
	Taux de 30%	22 ± 5	2,2 ± 0,5	90 ± 20

Tableau 4 - 8. Consommations en eau et en gasoil des compacteurs

En principe, tous les enrobés fabriqués possédaient des caractéristiques identiques, y compris en terme de maniabilité. Mais le fait de recycler conduit à répartir le liant sur des agglomérats d'agrégats d'enrobés, ce qui peut conférer à l'enrobé fabriqué une maniabilité différente de celle de l'enrobé classique, et, pour obtenir une compacité équivalente, augmenter les durées de compactage.

4.2.3. Production de déchets

Seuls les déchets relatifs aux matériaux ont été pris en compte. La comptabilisation des déchets est récapitulée ci-dessous pour l'ensemble des étapes du chantier.

Déchets à la déconstruction

Lors de la déconstruction, la masse des balayures de fraisats obtenues a été estimée au total à 30 tonnes en faisant l'hypothèse d'une densité de 1,2 pour ces balayures et en se basant sur un volume total initial de balayures contenues dans la citerne de la balayeuse de 25 m³.

Les balayures produites dépendent de la surface fraisée. Etant donné que la production de fraisats de « classe a » a nécessité au moins une passe supplémentaire de fraisage, les balayures produites par ce surcroît de surface fraisée ont dépendent taux de recyclage. Les données récoltées ne sont pas différenciées par modalités, et il est nécessaire d'élaborer un scénario pour les reconstituer. Ceci sera détaillé dans le chapitre 5.

Déchets à la fabrication des enrobés

Un enrobé est un produit normalisé dont la composition doit correspondre, entre autres, à des critères de composition (teneur moyenne et dispersion pour chaque constituant de l'enrobé). Le démarrage d'une centrale d'enrobage de type tambour sécheur enrobeur comprend toujours une période de stabilisation au début de laquelle l'enrobé fabriqué n'est pas conforme aux spécifications demandées en matière de courbe granulométrique et de teneur en liant. Ceci est dû au fait que les différentes classes granulaires ont des temps de transfert différents à l'intérieur du tambour rotatif (les particules fines cheminent plus rapidement que les gravillons dans le cas de l'échange thermique à écuicourant), et qu'il est difficile de programmer de façon précise le décalage temporel entre la prise d'information du débit des granulats (table de pesée en amont du tambour) et l'injection du liant sur ces granulats à l'intérieur de ce tambour. Il en résulte une quantité d'enrobé qui est exclue de l'approvisionnement du chantier et qui devient des « agrégats d'enrobés » au titre de surplus de la centrale d'enrobage. Les plus grosses granulométries mettant environ 4 min pour traverser tout le tambour sécheur, ce temps de transfert constitue un bon indicateur pour considérer que la charge du tambour sécheur est proche de la stabilisation, et que les matériaux qui sortent avant 4 minutes de ce tambour sécheur sont des refus de fabrication. Pour cette expérimentation, et pour chaque modalité, une quantité d'enrobés d'environ 4 tonnes a ainsi été écartée de l'approvisionnement du chantier RN 76, pour chaque modalité.

Déchets à la mise en œuvre des enrobés

Les enrobés acheminés pour la mise en œuvre sont contrôlés, en terme de composition, au niveau de la fabrication, et sont donc conformes aux spécifications. En dehors d'une erreur d'estimation de la quantité nécessaire pour effectuer le travail souhaité, et cette hypothèse est indépendante du fait de recycler ou non, la mise en œuvre des enrobés n'induit pas de déchets spécifiques. Ce paramètre sera donc considéré comme nul pour toutes les modalités de l'expérimentation.

4.3. DONNEES SUR LES EMISSIONS A L'ATMOSPHERE

L'évaluation des rejets à l'atmosphère a été décomposée selon trois processus élémentaires, associés à trois ensembles de procédés industriels différents, soit :

- les émissions canalisées, associées à la fabrication de l'enrobé (selon les 4 modalités du taux de recyclage) en centrale d'enrobage à chaud (centrale du PARC routier de Blois). La centrale se caractérise par des émissions canalisées au niveau de la cheminée d'évacuation des rejets à l'atmosphère,
- les émissions par source diffuse, associées à la mise en œuvre de l'enrobé sur la chaussée (site RN76). La mise en œuvre se caractérise par des émissions diffuses au niveau de la couche d'enrobé chaud répandu,
- les émissions par moteurs thermiques, associées aux engins de travaux publics et aux différents transports routiers.

L'évaluation des nuisances comprend la caractérisation des odeurs et celle des bruits de chantier. La méthodologie de collecte de données est d'une part directement liée au procédé étudié et d'autre part aux principes physiques qui régissent les mécanismes de transfert et propagation associés. De ce fait la présentation des données collectées ci-après est directement rattachée aux

procédés de mesures pour chaque site. Les méthodes de prélèvement des gaz odorants étant liées à celle des rejets gazeux en général, la présentation des mesures effectuées est faite dans la même partie. Pour les sources canalisées et diffuses, l'ensemble des mesures d'émissions gazeuses et odorantes nécessitent du matériel spécifique, non disponible au LCPC. Une entreprise extérieure, la SODAE, spécialisée dans les mesures d'odeurs et de gaz en cheminée a donc été sollicitée lors du chantier en septembre 2001.

4.3.1. Emissions atmosphériques canalisées de la centrale d'enrobage

Contexte normatif et réglementaire, méthodes de prélèvement et de mesure

Le choix des données de rejets à l'atmosphère à collecter s'est basé sur les textes réglementaires en vigueur à la date du chantier, auxquelles ont été ajoutées des données complémentaires à partir des connaissances environnementales. C'est le cas du dioxyde de carbone (CO₂) au titre de sa contribution à l'effet de serre, et des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) au titre de leurs effets toxiques.

L'arrêté de février 1998, qui régit les installations classées dont font partie les centrales d'enrobage à chaud, mentionne (dans son annexe 1.a) les polluants à mesurer ainsi que les méthodes de prélèvement, mesure et analyse en vigueur pour les sources fixes (voir Tableau 4 - 9). Les mesures doivent être effectuées, selon des procédures normalisées, au niveau de la cheminée destinée aux rejets à l'atmosphère. La cheminée de la centrale de Blois est munie, à cet effet, d'une bride permettant le passage de l'appareillage conformément aux dispositions de la norme NF X 44 051. Pour l'expérimentation, tous les prélèvements de gaz ont été effectués au niveau de cette bride de prélèvement.

Paramètre mesuré	Référence
débit	FD X 10 112
oxygène	O2 FD X 20 377 à 379
poussières	NF X 44 052
monoxyde de carbone	CO FD X 20 361 et 363
dioxyde de soufre	SO2 XP X 43 310 – FD X 20 351 à 355 et 357
hydrocarbures aromatiques polycycliques	HAP XP X 43 329
Composés organiques en phase gazeuse	COT NF X 43 301

Tableau 4 - 9. méthodes de référence pour les émissions gazeuses de sources fixes
Les références FD sont des fascicules de documentation sans caractère normatif

La centrale d'enrobage de Blois est vérifiée annuellement par un organisme agréé utilisant une méthode de détermination pondérale des poussières entraînées par les gaz de combustion (norme NF X 43-003). Cette centrale est conforme en matière de rejets de poussières à l'atmosphère (<100mg/Nm³). Pour les émissions de poussières, l'interprétation a donc porté exclusivement sur la comparaison entre la fabrication classique et les autres fabrications, à partir du signal électrique d'un opacimètre, sans calibrage de ce signal. L'appareil utilisé 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.

Les composés organiques en phase gazeuse sont communément appelés composés organiques volatils (COV). Ceux-ci sont par définition les composés organiques volatils à 20°C (arrêté du 29 mai 2000 portant modification de l'arrêté du 2 février 1998). De ce fait, les composants analysés dans les conditions de fabrication des enrobés ne sont pas des COV, car la température est supérieure à 100 °C. Ils sont spécifiquement désignés par le terme de « composés organiques en phase gazeuse ou totaux (COT) afin de tenir compte de la température des gaz émis.

Le SO₂ n'a pas été analysé car il est généralement considéré provenir majoritairement du combustible fioul, et la centrale de Blois fonctionne avec du gaz naturel, pauvre en soufre.

Les HAP pris en compte sont ceux de la liste de l'agence de protection environnementale américaine (liste EPA) mentionnés dans la liste suivante.

HAP selon EPA (16 substances)
Naphthalène
Acenaphthylène
Acenaphtène
Fluorène
Phenanthrène
Anthracène
Fluoranthène
Pyrène
Benz(a)anthracène
Chrysène
Benzo(b/j)fluoranthène
Benzo(k/j)fluoranthène
Benzo(a)pyrène
Dibenzo(a,h)anthracène
Benzo(ghi)perylène
Indeno(1,2,3-cd)pyrène

Liste de l'agence de protection environnementale américaine (EPA) des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs)

Les principes de mesure sont détaillés dans l'annexe 4.2. Les appareillages utilisés sont schématisés sur la Figure 4 - 2.

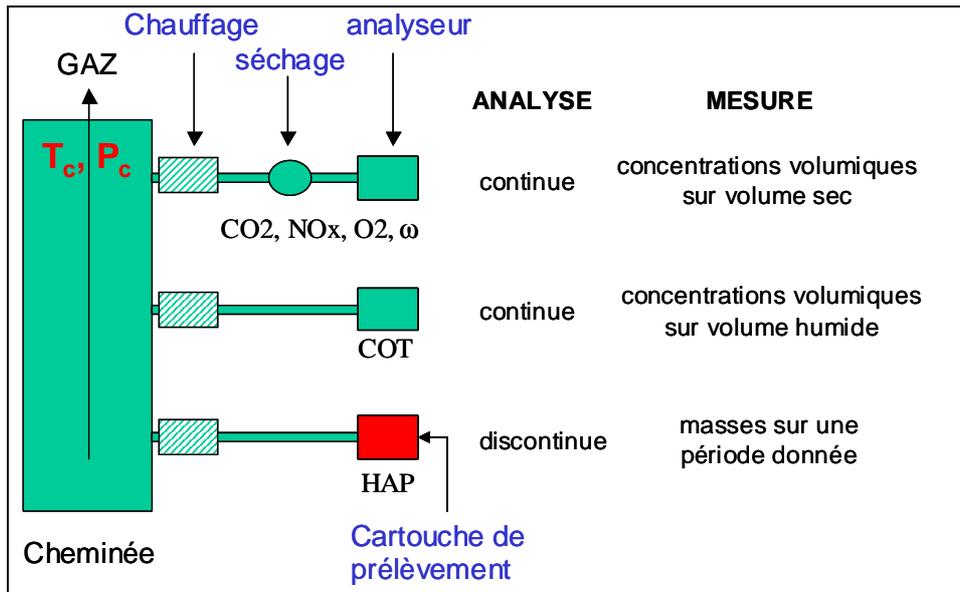


Figure 4 - 2. Principes de prélèvements et mesures effectués dans la cheminée

Résultats

Résultats des suivis en continu

Le suivi en continu des différentes modalités est présenté dans la Figure 4 - 3(a à d).

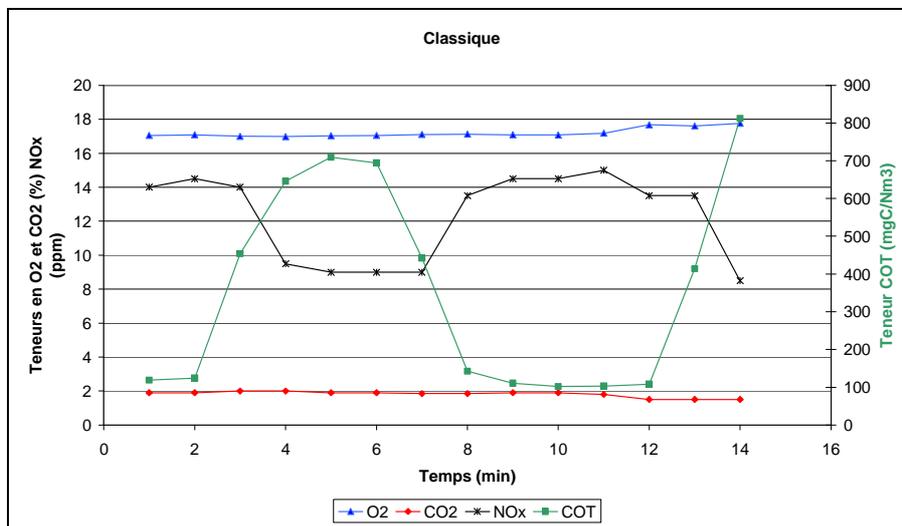


Figure 4 - 3a. fabrication classique

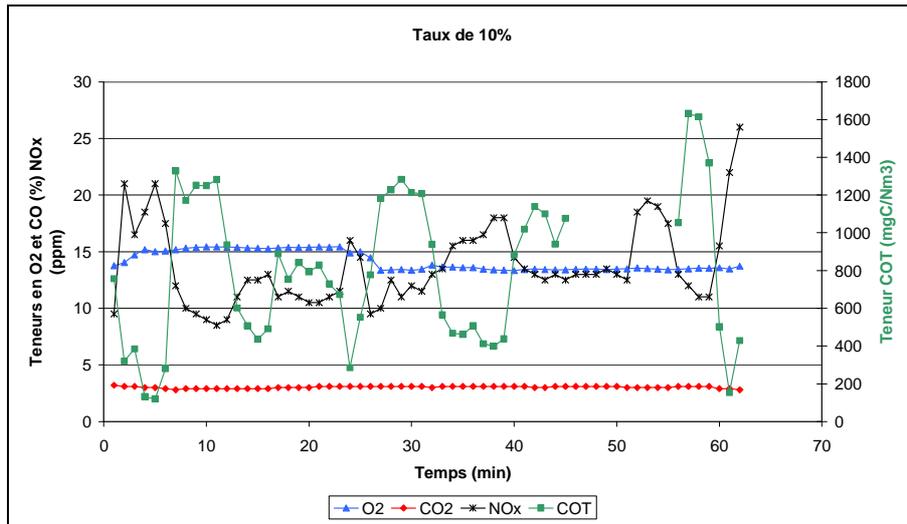


Figure 4 - 3b. fabrication à 10% de recyclage

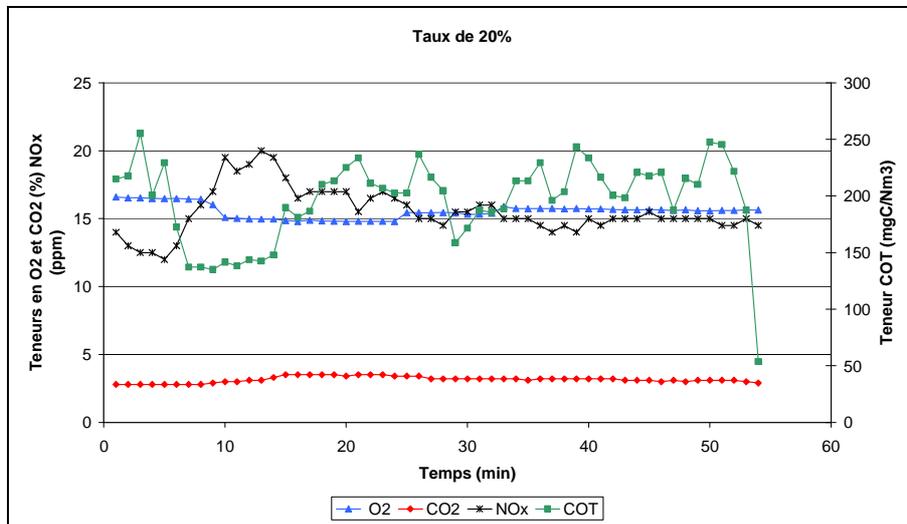


Figure 4 - 3c. fabrication à 20% de recyclage

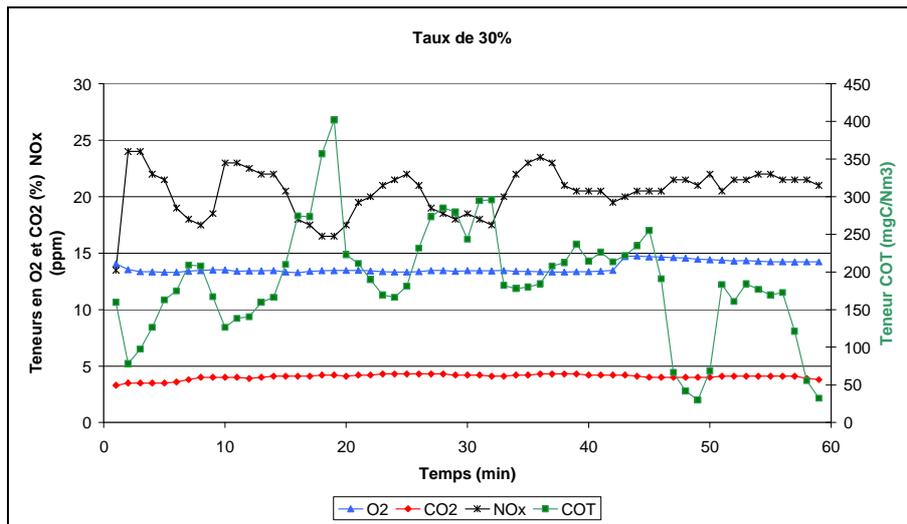


Figure 4 - 3d. fabrication à 30% de recyclage

Figure 4 - 3. mesures en continu pendant la période de référence

Résultats des prélèvements des HAP

		Modalités			
		Classique	Taux de 10%	Taux de 20%	Taux de 30%
prélèvement	heure début	8h07	9h13	10h47	14h03
	heure fin	8h37	10h15	11h47	14h59
	durée (min)	30	62	60	56
HAP (µg/Nm3 sec)	Phénanthrène	0,33	0,33	0,38	0,51
	Pyrène	1,38	*	0,68	0,33
	benzo(a)anthracène	0,48	*	*	*
	Chrysène	0,45	*	*	*
	Fluoranthène	0,77	0,22	0,6	0,4

Tableau 4 - 10. Teneurs en HAP par modalité (limite de détection)**Résultats des mesures de poussières*

Pour les quatre fabrications, les valeurs moyennes obtenues à partir des enregistrements (signaux analogiques) de l'opacimètre sont reportées dans le Tableau 4 - 11.

Modalités	Signal opacimètre
Classique	31
Taux de 10%	27
Taux de 20%	26
Taux de 30%	8

*Tableau 4 - 11. résultats des mesures par opacimètre***4.3.2. Emissions atmosphériques sur le chantier*****Emissions diffuses à la mise en œuvre de l'enrobé****Contexte*

La problématique a consisté à mettre en place un protocole permettant de différencier avec le plus de précision possible les émissions produites par de l'enrobé bitumineux selon le taux de recyclage choisi soit : 0%, 10%, 20% et 30%. En effet, la composition élémentaire des rejets gazeux peut varier du fait de l'emploi de deux constituants dans le cas de l'enrobé neuf (granulats neufs et bitume neuf) contre au moins trois constituants dans les cas de recyclage (granulats neufs, bitume neuf et fraisats déconstruits de l'ancienne chaussée).

Pour mettre au point une méthodologie de mesure d'émissions gazeuses adaptée à la fabrication de l'enrobé et compatible avec les conditions de chantier, des éléments bibliographiques ont été recueillis pour :

- identifier, le cas échéant, une méthodologie déjà existante,
- appréhender les principes de ce type de mesure.

La recherche bibliographique n'a abouti qu'à peu de documents sur le sujet, (AFNOR, 1991 ; Rognon et Pourtier, 2001) et a ainsi conduit à la mise au point d'une

chambre à flux spécifique permettant d'effectuer le prélèvement des gaz et des odeurs en conditions confinées au dessus de l'enrobé chaud. Des essais de mesures préliminaires ont été effectués sur chantier et modèles réduits. Ils ont abouti à la méthode présentée ci-dessous et sont présentées en détails dans l'annexe 4C.

Mesures des rejets de l'enrobé mis en oeuvre

La Figure 4 - 4 montre le dispositif de mesure au dessus d'une mini-planche, tel qu'il a été utilisé pour caractériser les émissions de l'enrobé mis en œuvre, pour les fabrications du chantier RN76 (Jullien et al., 2006). Le détail des mesures préliminaires aboutissant au dispositif expérimental présenté ici, se trouve dans l'annexe 4. Le mode opératoire a intégré les éléments suivants :

- un prélèvement de l'enrobé à la centrale de fabrication et la réalisation d'une mini-planche sur place, ainsi qu'une durée de compactage de quelques minutes, afin de limiter la perte en température avant le démarrage des mesures (enrobé à environ 150°C),
- un compactage manuel des mini-planches avec une masse constante dans un même volume (gabarit) pour obtenir une répétabilité acceptable d'une planche à l'autre,
- l'emploi d'un analyseur non portatif FID pour la mesure des COT, à condition d'utiliser une alimentation électrique stabilisée,
- la réalisation des mesures des rejets gazeux sous abri, de manière à éviter l'action intempestive du soleil ou de la pluie,

Pour chaque mini-planche, une première phase d'environ 50 min, consistait à :

- mesurer la concentration en COT, et l'évolution de la température à l'intérieur de la chambre, par aspiration à 0,33 m³/h,
- piéger les HAP par adsorption sur cartouches en charbon actif, par aspiration à 0,33 m³/h
- remplir une poche d'échantillonnage destinée aux analyses d'odeurs (poche adaptée de 80 L).

Les échantillons prélevés (poche et cartouche) ont ensuite été analysés par le laboratoire d'analyse sous-traitant, afin d'obtenir une caractérisation chimique.

Une deuxième phase d'environ 10 min consistait à mesurer la concentration en COT sous ventilation forcée (20 m³/h) en minimisant les pertes de charge du circuit, afin de récupérer les émissions restantes.

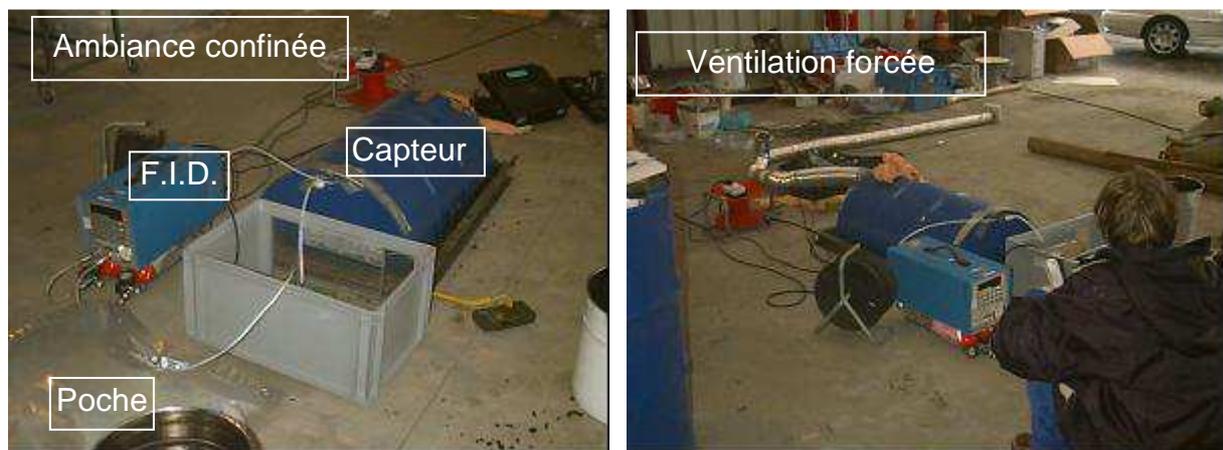


Figure 4 - 4. présentation du dispositif de prélèvement et d'analyse par chambre à flux

Résultats des émissions atmosphériques des modèles réduits

Les concentrations mesurées ont été rapportées aux conditions normales en utilisant la température moyenne mesurée.

Les concentrations obtenues en COT sont représentées sur la Figure 4 - 5.

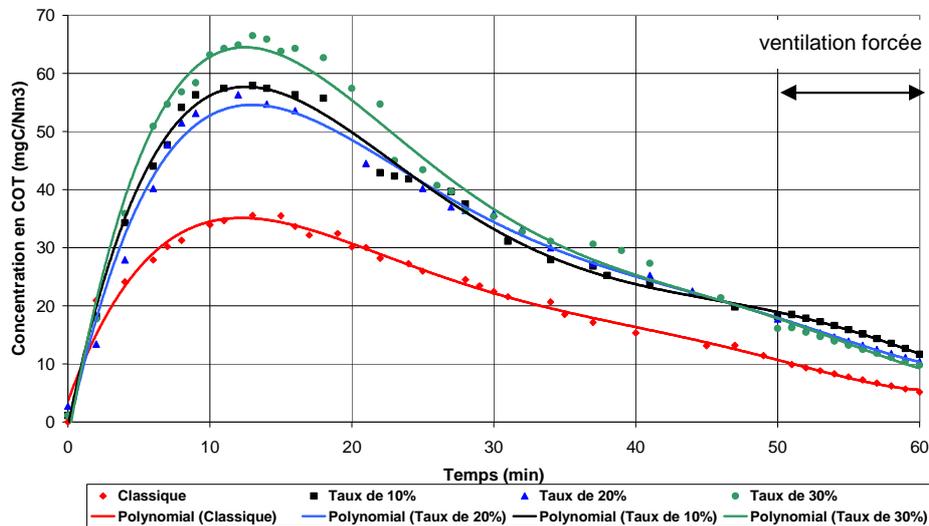


Figure 4 - 5. évolution des concentrations en COT et courbes de tendance pour chaque planche

Pour toutes les fabrications, la concentration maximale en COV totaux est obtenue après environ 12 à 13min de mesure et les cinétiques d'émission ne semblent pas différentes.

Les courbes obtenues pour les COT montrent une courbe en cloche, avec une augmentation de la concentration dans la chambre à flux, provoquée par la mise en chambre confinée de la planche, puis une diminution liée à la baisse de température. Les points figurant après 50 min ont été extrapolés d'après le calcul de la tendance polynomiale de la courbe. Après 50 min, la ventilation forcée destinée à récupérer les émissions restantes, correspond bien à des émissions faibles, et l'on considère que la plus grande part des émissions a été mesurée. Cette observation concernant les COT a été étendue aux HAP et aux odeurs.

Les masses obtenues pour les HAP sont présentées dans le Tableau 4 - 12.

		Modalités			
		Classique 0%	Taux de 10%	Taux de 20%	Taux de 30%
prélèvement	heure début	8h25	9h58	11h37	14h51
	heure fin	9h25	10h58	12h37	15h51
	durée (min)	60	60	60	60
HAP (µg/Nm³)	benzo(a)anthracène	< 0,05	< 0,05	0,19	0,18
	chrysène	0,06	0,16	0,40	0,52
	benzo(b)fluoranthène	< 0,05	0,18	0,16	0,2

Tableau 4 - 12. masses de HAP prélevées par mini-planche – 1 planche = 0,48 m² – débit de prélèvement à 0,33 m³/h

Seuls 3 HAP ont été détectés parmi les 16 analysés de la liste EPA, et certains ont été détectés mais ne sont pas quantifiables.

Emissions des engins sur chantier

Les émissions des moteurs d'engins de chantier n'ont pas fait l'objet de mesures, et aucune donnée récente spécifique aux engins de chantier n'a été trouvée à la date du chantier. Les émissions ont été calculées à partir des consommations à l'aide de données bibliographiques, dont le détail est présenté dans le chapitre 5.

4.3.3. Discussion

Des éléments de discussion, liés aux méthodes de mesures, à leurs limitations et à la validation des résultats obtenus sont brièvement rapportés ci-après.

Centrale d'enrobage

L'ensemble des mesures prévues en cheminée (CO₂, NO_x, HAP, COT..) a pu être mené à terme tandis que des difficultés pour obtenir des conditions de fonctionnement stabilisées du procédé, de nature à influencer sur les futurs résultats d'inventaire, ont été soulignées précisément. De même, les mesures erronées ont été pointées afin, conformément à la norme ACV 14042 de les éliminer de l'ICV et d'introduire des artéfacts indépendants de l'objectif de l'étude consistant à comparer les taux de recyclage. L'essentiel des mesures effectuées donnent des valeurs de concentration tandis que le passage au flux est nécessaire pour réaliser l'ICV des modalités étudiées.

Lors des prélèvements sur la cheminée, des mesures complémentaires ont été réalisées sur les rejets gazeux pour pouvoir en déterminer le volume total et exprimer par la suite les résultats en flux de polluants pour effectuer l'ICV. Ces mesures concernaient :

- la vitesse, dont la valeur moyenne a été déterminée à partir de mesures effectuées avec un tube de Pitot, introduit perpendiculairement dans la conduite à des emplacements déterminés à l'avance, et qui correspond à la différence entre la pression totale et la pression statique, conformément à la norme NF X 44 052 ;
- la température, mesurée avec un thermomètre numérique muni d'un thermocouple type K,
- la pression absolue, déterminée à partir des mesures des pressions statique et atmosphérique locale,
- la teneur en eau, déterminée à partir de la quantité d'eau récupérée par condensation (paroi maintenue froide par de la glace) des prélèvements destinés à l'analyse des CO₂, NO_x et O₂.

Le mode de calcul détaillé des flux à partir des résultats bruts obtenus à la centrale et entrepris dans le cadre méthodologique de l'ACV, est décrit au chapitre 5.

Mise en œuvre de l'enrobé

Des choix technologiques d'utilisation du capteur développé (chambre à flux et chaîne de mesure) ont été retenus dans l'optique de collecter des données relatives à la mise en œuvre d'enrobés de couches de chaussées pour alimenter l'inventaire de cycle de vie. Les contraintes qui en ont découlé sont récapitulées ci-après.

La ventilation forcée est la solution la plus rigoureuse en matière de quantification du débit pour le calcul du flux horaire. En effet, l'évolution de la concentration en polluant est une fonction croissante en début d'émission puis décroissante jusqu'à l'obtention d'une concentration de bruit de fond en fin d'acquisition. L'intégration de cette évolution, associée à la détermination du volume exact insufflé par la ventilation forcée entre le début de la mesure et le moment où la concentration est égale au bruit de fond, permet le calcul rigoureux du flux. Cependant, le manque de sensibilité des moyens de mesure des COT, HAP et odeurs nous a conduit à écarter la ventilation forcée de la plage principale de mesure et d'échantillonnage des gaz. Les mesures ont donc été effectuées essentiellement en atmosphère confinée sans ventilation avec le seul renouvellement d'air lié au dispositif. La méthode de mesure retenue n'a par ailleurs pas empêché d'atteindre l'objectif consistant à obtenir des données validées et comparables pour les quatre modalités afin de les intégrer dans l'ICV global de la couche de liaison.

Engins de chantier

La durée de fonctionnement des engins et certaines consommations sur le chantier (fraiseuse et balayeuse) ont été évaluées le plus finement possible afin de différencier l'incidence du taux de recyclage de l'enrobé. Les données brutes collectées ont permis de mettre en évidence des écarts, notamment en phase de déconstruction.

4.4. DONNEES SUR LES EMISSIONS A L'EAU

4.4.1. Problématique

La quantification expérimentale des rejets polluants dans l'eau concerne essentiellement deux étapes :

- la route en service, afin de distinguer l'effet éventuel du taux de recyclage des fraisats dans la couche de liaison,
- le stockage des agrégats d'enrobés non recyclés.

Concernant la route en service, la mise en place des récupérateurs d'eau, décrite dans le chapitre 2, a été conçue afin de ne récupérer que les eaux percolant au travers de la couche de liaison, et non les eaux de ruissellement, pendant les mois qui ont suivi la mise en service de la chaussée. Cependant, les résultats d'analyse des échantillons prélevés peuvent dépendre du taux de recyclage de l'enrobé de la couche de liaison, mais également de l'enrobé utilisé pour la couche de roulement située au-dessus, ainsi que des véhicules circulant sur la chaussée. Afin d'éclairer les résultats obtenus *in situ* lors du suivi de la couche de liaison en service, des essais en laboratoire concernant les rejets dans l'eau spécifiques des matériaux ont donc également été réalisés. Ces essais ont concerné à la fois le matériau à recycler (fraisats de classe a) et également le matériau produit (enrobé avec différents taux de recyclage). L'organigramme (Figure 4 - 6) résume les différentes expériences et analyses qui ont été réalisées sur lors du suivi en place, et sur les matériaux.

- le suivi de l'ouvrage comprend la quantification des volumes d'eau de percolation pour chaque modalité, l'échantillonnage à partir des volumes totaux et l'analyse chimique des échantillons dès la mise en service de la chaussée ;

- les fraisats à recycler sont caractérisés par une attaque totale pour en déterminer la concentration totale en polluants et par des essais de lixiviation pour en déterminer le potentiel lixiviable ;
- enfin, l'enrobé utilisant différents taux de recyclage des fraisats, est caractérisé par des essais de perméabilité (voir chapitre 3) sur des carottes prélevées sur chaque planche de la RN 76, et dont les eaux de percolation ont été caractérisées par des analyses physico-chimiques.

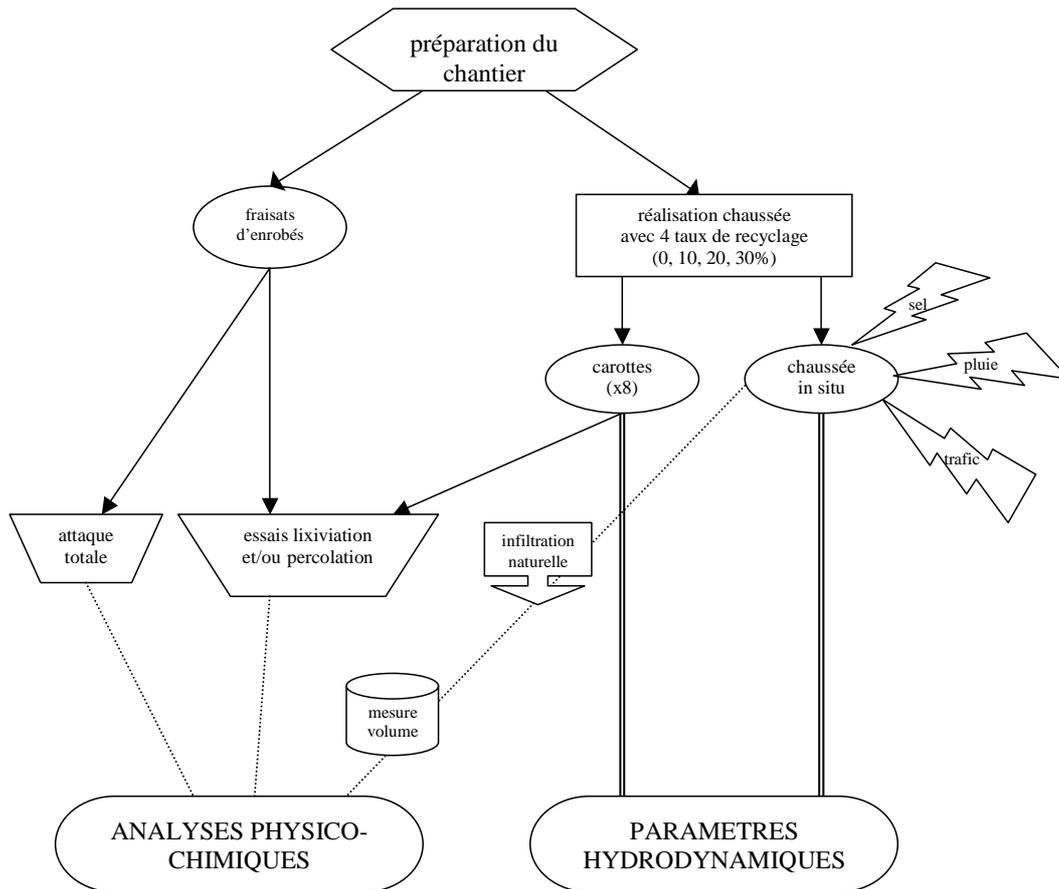


Figure 4 - 6. Organigramme des mesures réalisées pour les rejets dans l'eau

Le stockage des agrégats non recyclés a été évalué à partir d'essais de percolation sur matériaux granulaires, couplés à des analyses physico-chimiques.

4.4.2. Bibliographie sur les émissions à l'eau des ouvrages et matériaux routiers

Emissions liées aux ouvrages routiers

Les études disponibles concernent essentiellement les eaux de ruissellement, dont les principales sources identifiées de pollution sont liées au trafic et à la maintenance (Brinkman, 1985 ; Muschack, 1990, Pagotto, 1999) : gaz d'échappement, usure des pneumatiques, usure des garnitures de freins, corrosion des véhicules usure du revêtement routier, corrosion des barrières de sécurité, sels de déneigement. Les

polluants identifiés varient selon la source. Les freins sont une importante source de métaux lourds, principalement Cu, Zn et Pb, tandis que les pneumatiques, et surtout les barrières de sécurité en acier galvanisé, sont une source de Zn. En ce qui concerne les carburants, seule l'essence plombée constituait une source de polluants métalliques (Pb), et il est généralement admis que 75 % du plomb contenu dans l'essence est émis dans les gaz d'échappement des moteurs (Hewitt et Rashed, 1990). Néanmoins, il faut noter que le super plombé a été totalement remplacé par un carburant de substitution sans plomb depuis le 1^{er} janvier 2000, mais, les sols et les sédiments routiers restent contaminés par ce polluant. Les gaz d'échappement contiennent des hydrocarbures, et notamment des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dont certains sont cancérigènes (benzo(a)pyrène). Les pneumatiques ainsi que les bitumes peuvent également constituer des sources d'HAP. Peu d'études ont été réalisées sur les eaux de percolation à travers les chaussées. Les données existantes concernent essentiellement les eaux de ruissellement à la surface des chaussées et les eaux traversant les chaussées poreuses à structure réservoir (Legret, 2001) ou le rôle des enrobés drainant (Pagotto et al., 2000).

Emissions liées aux matériaux routiers

L'eau de pluie peut pénétrer dans les enrobés en fonction de leur porosité puis, au cours de la vie de la chaussée, profiter des fissures produites par différents mécanismes de dégradation. Aucune donnée n'est disponible concernant les caractéristiques physico-chimiques et émissions polluantes liées à un matériau bitumeux en place, mais des études sont disponibles concernant la pénétration de l'eau dans les matériaux de chaussées.

La porosité ouverte permet le passage de l'eau à travers les vides ; la dimension des pores conditionne en partie la cinétique de transfert de la masse d'eau. Pour une chaussée neuve (porosité d'interstices) comme pour une chaussée dégradée (porosité de fissures) la perméabilité des enrobés, associée à cette porosité, apparaît ainsi comme un des paramètres essentiels conditionnant le transfert d'eau dans les différentes couches de la chaussée.

La perméabilité est l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par l'eau (vitesse de circulation), sous l'action d'un gradient hydraulique. Pour un milieu homogène et saturé, la perméabilité intrinsèque s'exprime par :

$$k = \frac{M \times h \times \eta}{t \times \rho \times S \times \Delta P}$$

avec

k : perméabilité intrinsèque (m²)

M : masse d'eau percolée (kg)

h : hauteur de la couche concernée d'enrobé (m)

η : viscosité dynamique de l'eau pour la température de l'essai (Pa.sec)

t : temps (sec)

ρ : masse volumique de l'eau à la température de l'essai (kg.m⁻³)

S : surface de la couche d'enrobé (m²)

ΔP : différence de pression appliquée à la couche d'enrobé (Pa)

A partir du débit obtenu en régime permanent, la conductivité hydraulique à saturation ou perméabilité K (m/s) est déterminée d'après la loi de Darcy par:

$$K = \frac{k \times \gamma}{\eta}$$

Avec γ : poids volumique de l'eau ($N.m^{-3}$)

Actuellement, il n'existe pas de données bibliographiques détaillées concernant la perméabilité des ouvrages multicouches, comme c'est le cas de la RN 76, dont le milieu est fortement hétérogène. En effet, il est constituée de plusieurs couches d'enrobé de compositions différentes, dont la mise en œuvre s'accompagne d'hétérogénéités de répartition des différentes classes granulaires. Quelques données sont pourtant disponibles dans ce domaine au sein du réseau ; elles concernent des couches de roulement, plus particulièrement des enrobés drainants, pour lesquels la perméabilité varie de 5.10^{-3} à 15.10^{-3} m/s (Vulcano, 2004).

Une étude de drainage de couches d'enrobés menée aux Etats Unis conclut que la conductivité hydraulique à saturation la plus faible ($9,5.10^{-7}$ m/s) est obtenue pour une couche de roulement (Hassan, 1996). Par ailleurs, dans une étude de l'infiltration de l'eau à travers les enrobés de couches de surface (Waters, 1998), un classement des enrobés en fonction de la perméabilité est proposé (Tableau 4 - 13).

Catégorie d'enrobé	perméabilité. K	Vides (air)	Description de l'enrobé
	(m/s)	(%)	
A1	$10^{-8} - 10^{-7}$	2,5 - 3,7	Très faible perméabilité
A2	$10^{-7} - 10^{-6}$	3,7 - 5,6	Faible perméabilité
B	$10^{-6} - 10^{-5}$	5,6 - 8,5	Modérément perméable. Une petite quantité d'eau peut s'infiltrer sous l'action du trafic.
C	$10^{-5} - 10^{-4}$	8,5 - 13	Perméable. Une quantité d'eau substantielle pénètre sous l'action du trafic.
D	$10^{-4} - 10^{-3}$	13 - 20	Modérément drainant. L'eau s'infiltré librement sous l'action du trafic ou de l'impact de la pluie.
E	$10^{-3} - 10^{-2}$	20 - 30	Drainant

Tableau 4 - 13. Catégories d'enrobés en fonction de la conductivité hydraulique

La réponse à un événement pluvieux est quelquefois quantifiée par le coefficient de ruissellement, qui est le rapport entre le volume d'eau ruisselant en sortie de la surface considérée et la pluie « brute ». Par suite, un coefficient d'infiltration peut aussi être défini comme étant le rapport entre le volume d'eau infiltrée et la pluie brute (Raimbault, 2001).. D'après Raimbault (2001), ce coefficient varie de façon significative en fonction, de l'état des surfaces et de l'événement pluvieux. Pour des couches de surface en très bon état et possédant une conductibilité hydraulique à saturation de l'ordre de 10^{-8} m/s, pour des événements pluvieux de type « pluie de novembre », le coefficient d'infiltration est de l'ordre de 5% (Raimbault, 2001).

4.4.3. Description des prélèvements, essais et analyses réalisés

Prélèvement des eaux de percolation de l'ouvrage

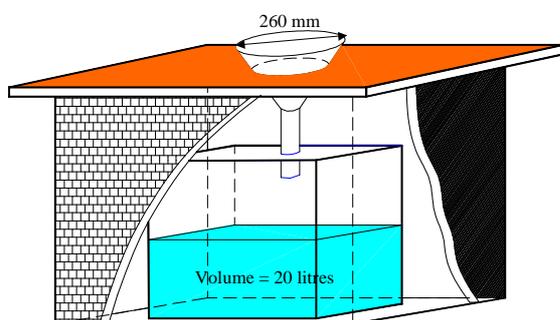
Les contraintes en matière de prélèvements étaient :

- de disposer d'environ 4 litres d'eau de récupération pour la réalisation de l'ensemble des analyses souhaitées,
- d'effectuer le prélèvement après chaque événement pluvieux pour s'affranchir le plus possible de la dégradation potentielle de certains polluants par l'effet de la lumière et des gaz réactifs de l'atmosphère.

Pour effectuer ces caractérisations, il était nécessaire de dimensionner le capteur de récupération de l'eau de manière à intervenir, la première année de mise en service, après chaque pluie afin d'effectuer les prélèvements dès que les 4 litres étaient obtenus. L'annexe 4F précise respectivement tous les détails relatifs à la réalisation du suivi en service des eaux de percolation, plus particulièrement:

- les essais préliminaires au dimensionnement du capteur de récupération de l'eau, réalisés au laboratoire sur des plaques de différentes compacités,
- la conception du capteur de récupération d'eau en vraie grandeur,
- les essais préliminaires à la mise en place des capteurs sur la chaussée RN 76,
- la mise en place de ces capteurs dans le contexte normal de mise en œuvre des enrobés
- les modalités de prélèvement de l'eau après mise en service.

Afin d'établir des valeurs de « référence », un dispositif pour recueillir l'eau de pluie elle même, de manière à procéder aux mêmes analyses que sur l'eau de percolation, a été mis en place. On a appelé par convention ce dispositif « pluviomètre ». Celui-ci (Figure 4 - 7a) est constitué d'un entonnoir en polyéthylène d'un diamètre de 260 mm, d'une capacité de 4 litres, installé dans un récipient du même type que ceux servant à la collecte de l'eau de percolation. Le pluviomètre a été installé dans l'enceinte d'un site industriel (Figure 4 - 7b) à environ 10m de la chaussée, dans un lieu protégé des risques accidentels (lors des interventions en rives de chaussées). Par contre, aucune précaution n'a été prise quant à la protection de l'eau de pluie des éléments extérieurs (type insectes ou substances véhiculées par le vent).



a) schéma du pluviomètre



b) lieu d'implantation du pluviomètre

Figure 4 - 7. Description du pluviomètre

Les capteurs de récupération ont été implantés en s'assurant que :

- l'enrobé nécessaire à leur réalisation provenait d'une période de fabrication stabilisée pour s'affranchir des problèmes d'hétérogénéité de ces enrobés,
- les capteurs étaient suffisamment distants pour éviter les remontées capillaires d'un capteur à l'autre.

Le choix s'est donc porté sur la partie médiane de chaque planche d'enrobé, qui utilise les enrobés en milieu de fabrication. Géométriquement, le point de départ de chaque capteur a donc été « démarrage planche + 72m ». La Figure 4 - 8 montre l'implantation générale des dispositifs. Les détails de l'installation des capteurs sont fournis dans l'annexe 4F.

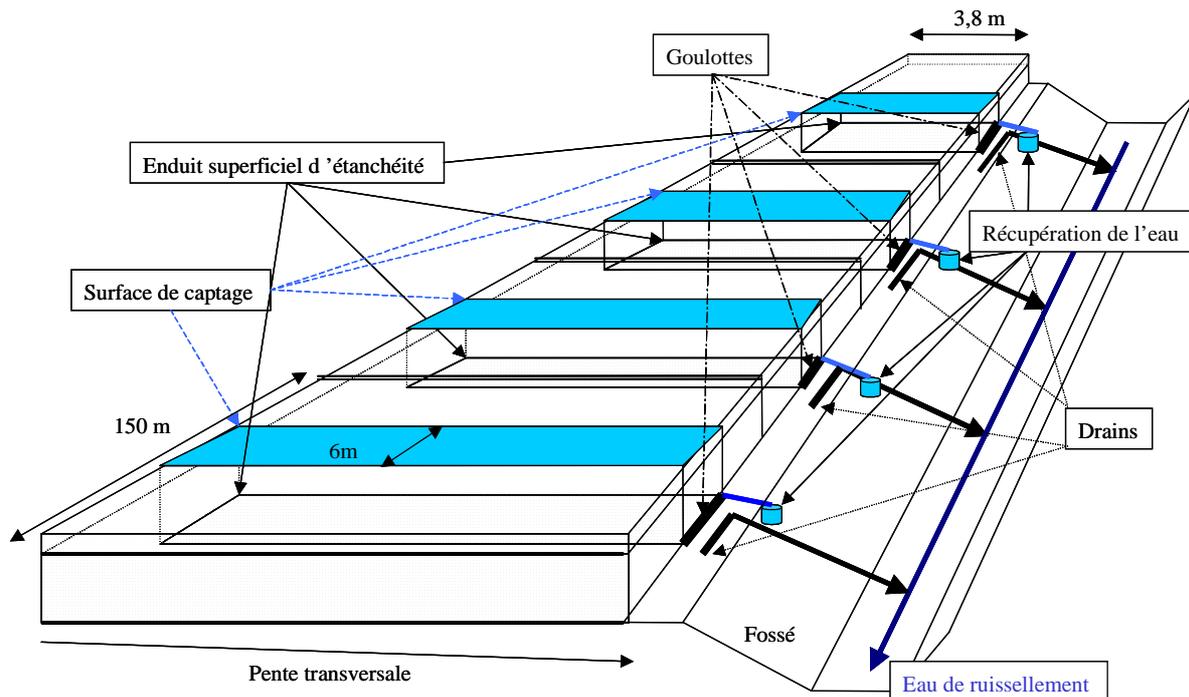


Figure 4 - 8. Implantation des capteurs de récupération de l'eau de percolation

En fonction des événements pluvieux et du fait de la présence de vides communicants dans les deux couches d'enrobés, l'eau de pluie s'infiltrait verticalement à travers la couche de roulement et la couche de liaison, s'accumule au niveau de l'interface étanche constituée par l'enduit superficiel et s'écoule jusqu'en rive de chaussée sous l'action de la pente transversale (2%). L'eau est stockée dans des bidons de 20 litres chimiquement inertes et dans le volume de la goutte (18 litres) lorsque le bidon est plein.

Prélèvements des échantillons de matériaux

Les prélèvements unitaires ont été réalisés en respectant au mieux (faute de moyens mécaniques pour ouvrir et homogénéiser les stocks) les principes de la norme P 18-551 (prélèvement de matériaux sur stock) en vigueur au moment du chantier mais supprimée depuis. Ils ont été réalisés les 25 et 26 septembre 2001.

Chacun des 2 échantillons de 20kg (notés FS 1 et FS2) a été constitué à partir d'une dizaine de prélèvements unitaires, réalisés avec une main de fer (Ø 160 mm). En

prévision des essais de caractérisation environnementale, les 2 catégories de fraisats ont subi, au laboratoire, des opérations d'homogénéisation, de quartage, de criblage à 20mm et concassage à 4mm, conformément au Tableau 4 - 14 .

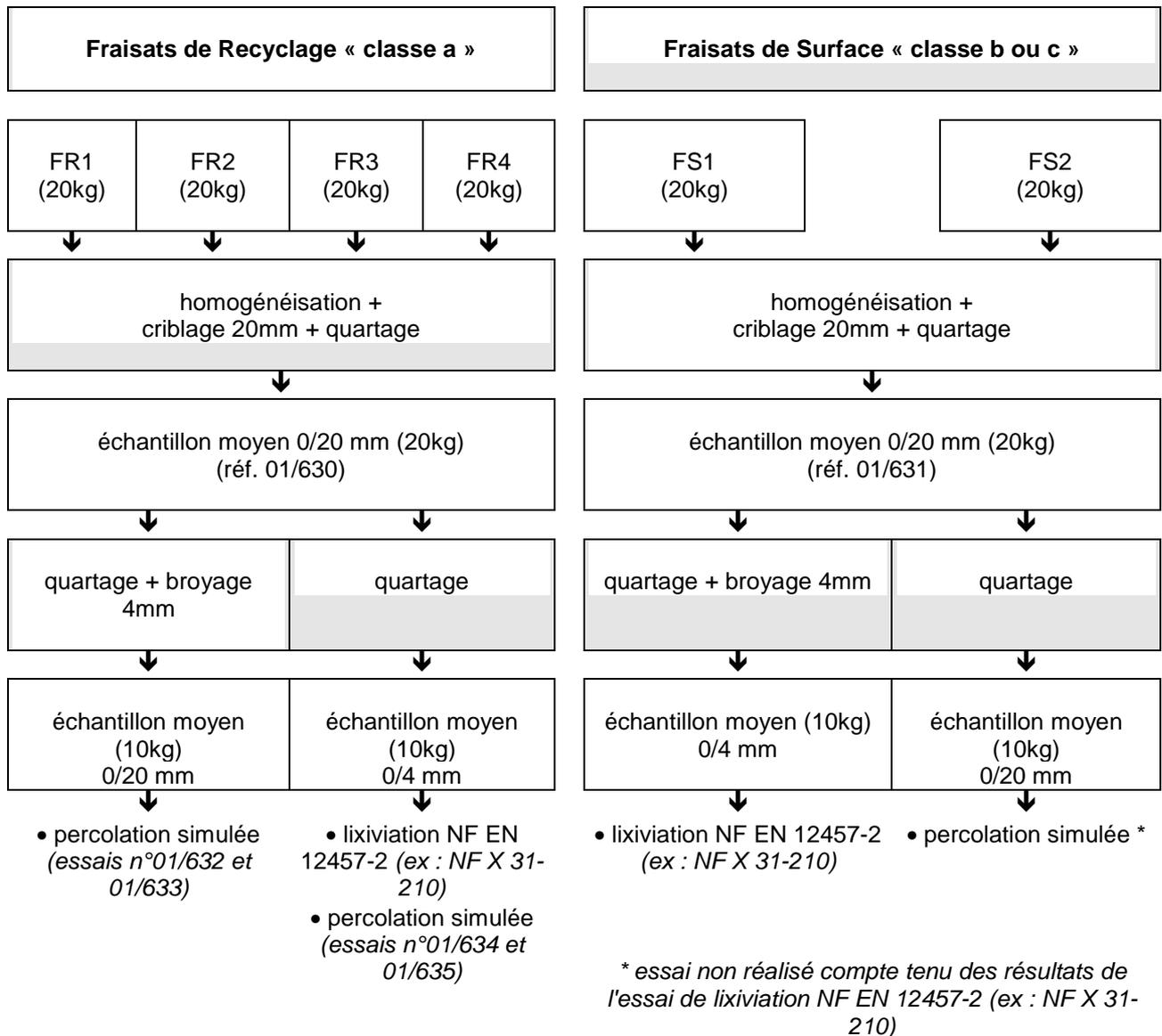


Tableau 4 - 14. Conditionnement des échantillons d'agrégats d'enrobés

Le prélèvement des fraisats de « classe a » (0/30 mm) a été réalisé sur un stock, d'environ 40 m³, sur le site de la centrale d'enrobés du Parc DDE du Loir-et-Cher et sur le site de la RN76. Préalablement à l'opération de prélèvement, 4 saignées ont été réalisées dans le stock au moyen d'un chargeur. Après homogénéisation des zones de prélèvement au chargeur, 4 échantillons de 20kg (notés FR 1 à FR4) ont été constitués à partir d'une dizaine de prélèvements unitaires, réalisés avec une main de fer (Ø 160 mm).

Les fraisats de « classe b ou c » (0/30 mm), issus du fraisage des premiers centimètres de couche de roulement de la chaussée, ont été réalisés sur les stocks présents sur un délaissé, situé à proximité immédiate du chantier de la RN76. Une

légère prise en masse des matériaux a été constatée à la surface des stocks. Ils ont été qualifiés, au début de l'opération, de fraisats "pollués", du fait de la présomption d'accumulation, dans les premiers centimètres, de composés chimiques, issus de la pollution chronique routière (métaux lourds, hydrocarbures).
Les modalités de prélèvement des carottes sont décrits dans l'annexe 3.B.

Méthodes d'essais

Essai de lixiviation

Pour cet essai, un échantillon de 100g de matériau, préalablement fragmenté à 4 mm, est soumis à une ou plusieurs extractions "Liquide / Solide". Ces extractions (1 x 24 heures ou 3 x 16 heures) sont réalisées, sous agitation permanente, avec de l'eau déminéralisée en maintenant un ratio L/S =10 (1 litre d'eau pour 100g d'échantillon). L'eau issue de ces extractions successives est analysée pour déterminer la quantité extractible des différents éléments recherchés. Cette dernière est exprimée en mg ou µg par kg de matière sèche. Les paramètres d'analyse des eaux d'extraction, sont liées aux spécificités chimiques de la pollution chronique routière (voir Tableau 4 - 16).

Essai de percolation simulée sur fraisats

La norme XP ENV 12920, propose une méthodologie pour modéliser le comportement d'un matériau au lessivage, à l'aide des essais de percolation simulée (en cours de normalisation au niveau du CEN (TC292/WG6 - prNF EN 14405) et utilisé pour se rapprocher des conditions de relargage propres à un scénario d'exposition donné. Cet essai permet d'adapter le rythme de percolation aux conditions de transfert hydrique d'un scénario d'exposition (ex: couche de chaussée). C'est sur la base ce projet de mode opératoire que repose l'essai de percolation simulation, utilisé dans la présente étude. A la date de réalisation, le projet de norme (TC292/WG6 - prNF EN 14405, normalisé depuis juillet 2005 sous la référence NF CEN/TS 14405) ne définissait pas de protocole spécifique à un scénario de "mise en stock" des fraisats, ce protocole a été proposé sur les bases de celui, déjà pratiqué par le CETE de l'Ouest, pour l'utilisation de déchets en couche de chaussée. Les principales modifications portent sur la vitesse de percolation et sur le niveau de compactage, respectivement plus rapide et plus faible que pour le scénario "couche de chaussée".

Le protocole du scénario standard "mise en stock" est le suivant :

- rapport L/S journalier : 0.4
- dimension de la colonne : $\varnothing = 10\text{cm}$, Hauteur = 35 cm
- masse d'échantillon : 3.6 kg
- granulométrie maximale : $D_{\text{max}} = 20\text{ mm}$
- densité initiale (niveau de compactage) : 1.6
- saturation statique initiale : aucune
- nombre d'extraction : 5 (réparties selon : $0.5 < L/S < 30$)
- durée de l'essai : 2.5 mois

Les essais de percolation ont été réalisés au CETE Ouest, seules les analyses des eaux d'extractions, ont été sous-traitées au LDA 22 (agréé par les ministères de la Santé et de l'Environnement => agréments 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9 et 11 pour l'année 2002).

Compte tenu du caractère encore expérimental de l'essai de percolation simulée, le programme d'essai présenté ci-dessus visait les deux objectifs suivants :

- déterminer les flux de relargage des fraissats, dans un scénario d'exposition correspondant à une "mise en stock" (essais n° 01/632, 01/633).
- poursuivre l'évaluation de l'essai (répétabilité, influence de la variation du rapport L/S, influence de la variation de la granulométrie de l'échantillon), de façon à finaliser un mode opératoire, spécifique notamment aux scénarios routiers. Cette démarche constitue une suite logique du sujet de recherche, en cours de réalisation par le CETE Ouest, pour le compte du LCPC (essais n° 01/634, 01/635 + n° 01/632, 01/633).

Le principe général de l'essai est présenté sur la Figure 4 - 9. L'échantillon de matériau granulaire (masse ≥ 2.5 kg), est introduit dans une colonne et compacté par couches. La colonne est ensuite soumise à une percolation ascendante d'eau déminéralisée, dont le rythme est représentatif du scénario d'exposition étudié. Le rythme de percolation s'exprime en fonction du rapport L/S journalier (Liquide / Solide). L'eau de percolation, collectée de façon périodique est ensuite analysée (voir Tableau 4 - 16), pour déterminer, à l'aide des volumes de percolation, les flux de relargage.

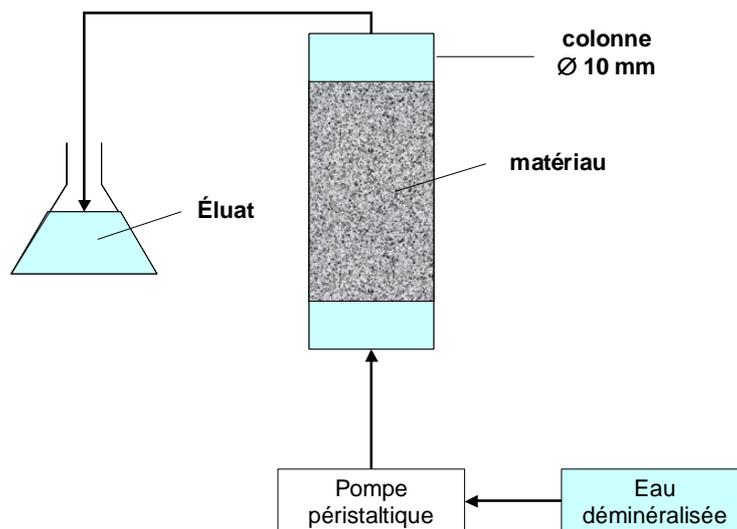


Figure 4 - 9. Essai de percolation simulée

Les caractéristiques des différents essais de percolation réalisés, dans le cadre de la présente étude, sont décrits dans le Tableau 4 - 15.

Paramètres	n° de référence des essais de percolation			
	01/632	01/633	01/634	01/635
type de fraisats	fraisats de recyclage ⁽¹⁾			
Granulométrie / D _{max} (mm)	20	20	4	4
masse de l'échantillon (kg MS)	3.6660	3.6576	3.6790	3.6885
débit moyen mesuré (litre / 24H)	1.444	1.517	1.589	0.155
rapport L/S journalier moyen	0.394	0.415	0.432	0.043
rapport L/S pour la :				
1 ^{ère} extraction	0.496	0.722	0.571	0.403
2 ^{ème} extraction	3.953	4.281	4.376	1.272
3 ^{ème} extraction	10.044	10.594	11.031	2.016
4 ^{ème} extraction	20.168	20.024	20.056	5.315
5 ^{ème} extraction	30.075	30.093	30.292	-
durée de l'essai (jours)	78	73	70	125

Tableau 4 - 15. Description des essais de percolation sur fraisats

Essais de percolation sur carottes

Les carottes ont subi un essai destiné à déterminer prioritairement à caractériser leur perméabilité. Cet essai est décrit dans l'annexe 3.B, et les résultats concernant les paramètres hydrodynamiques sont présentés dans le chapitre 3. Les eaux qui ont percolé au travers des carottes correspondant aux taux de recyclage à 10% et 20% ont été analysées. La méthode expérimentale n'ayant pas été mise au point pour une caractérisation chimique, cette expérimentation doit être considérée comme un essai préliminaire susceptible d'apporter des informations complémentaires.

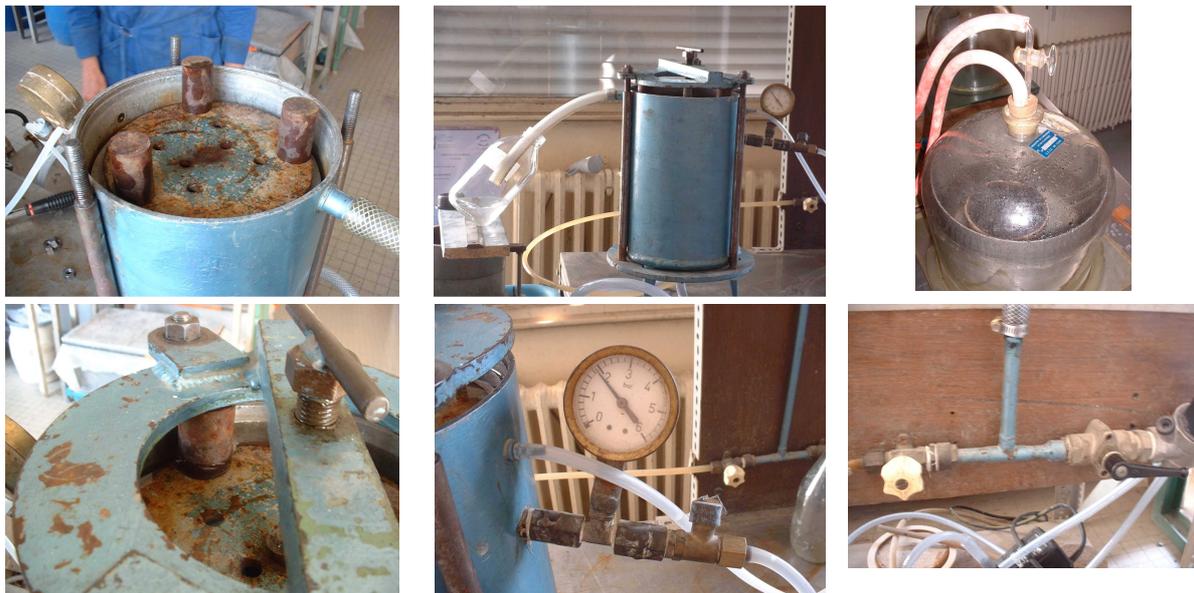


Figure 4 - 10. Photographies du montage du perméamètre

En effet, l'appareillage du perméamètre (Figure 4 - 10) comporte des éléments rouillés et contient des raccords en cuivre ce qui peut provoquer la présence

d'espèces métalliques non liées au matériau. Par ailleurs, l'eau distillée de l'immersion a été réutilisée dans le montage du perméamètre.

Méthodes d'analyses physicochimiques

Le Tableau 4 - 16 ci-après donne la liste des paramètres physico-chimiques mesurés; ainsi que les références normalisées utilisées pour les analyses. Seuls les paramètres jugés pertinents figurent dans cette liste.

Les réactifs utilisés sont de qualité analytique (Merck Suprapur ou Pro analysi) et l'eau ultra-pure provient d'un système d'échange d'ions sur colonne (ELGA Maxima). La vaisselle en contact avec les échantillons a été lavée avec de l'acide nitrique dilué et rincée avec de l'eau ultra-pure. La conductivité, le pH, les matières en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO) et l'azote Kjeldhal (NTK), ont été déterminés sur les échantillons bruts. Les hydrocarbures totaux (Hc) ont été extraits par le tétrachlorure de carbone et analysés par spectrométrie infrarouge (PERKIN-ELMER Spectrum one). Les HAP ont été extraits par le cyclohexane et déterminés par chromatographie liquide haute pression (WATERS 600). Les métaux lourds (plomb, cadmium, chrome, cuivre, nickel et zinc) ont été déterminés par spectrométrie d'adsorption atomique (VARIAN SpectrAA 300 et SpectrAA 220 Z) ou par spectrométrie d'émission atomique (VARIAN Liberty 220), selon les métaux et les concentrations mesurées, sur les eaux brutes filtrées sur membrane de 0,45 µm de porosité et acidifiées à pH<2. Les nitrates, les chlorures et les sulfates ont été analysés sur les eaux filtrées par chromatographie ionique (DIONEX 100).

Pour toutes les analyses, un système de contrôle de la qualité a été mis en place. Toutes les analyses sont réalisées en double. Des échantillons à blancs sont incorporés dans chaque série d'analyse ainsi qu'un échantillon de contrôle qualité interne. Si une déviation significative est enregistrée par rapport à la concentration de référence, la série d'essais est recommencée.

Classification selon "l'analyse de l'eau", J. Rodier	paramètres	eaux lixiviation fraisats	eaux de percolation des carottes	eaux percolation chantier	références
paramètres physico-chimiques liés à la structure naturelle des eaux	pH	x	x	x	NFT 90-008
	conductivité	x	x	x	NF EN 27888
	Cl SO4	x	x	x	NF EN ISO 10304-1 (CI)
	Ca Mg Na K Al	x	x	x	NF EN ISO 11885 (ICP)
	MES		x	x	NF EN 872
	DCO	x	x	x	NFT 90-101
paramètres concernant les substances indésirables	NO3	x	x	x	NF EN ISO 10304-1 (CI)
	HT	x	x	x	NF T90-114 (IR)
	NTK	x		x	NF EN 25663
	Cu	x	x	x	FD T 90-119 (SAA) NF EN ISO 11885
	Fe Zn Mn	x	x	x	NF EN ISO 11885 (ICP)
paramètres concernant les substances toxiques	HPA	x (18 ou 6)	x (6)	x (6)	NF T90-115 (HPLC)
	Pb	x	x	x	FD T 90-119 (SAA) NF EN ISO 11885
	Cd	x	x	x	NF EN ISO 5961 (SAA)
	Hg	x		x	NF EN 1483 (SAA)
	Cr	x	x	x	NF EN 1233 (SAA) NF EN ISO 11885
Autres	Ni	x	x	x	FD T 90-119 (SAA) NF EN ISO 11885
	Mo	x			
	PCB	x (7)			
	COT	x			

Tableau 4 - 16. Paramètres étudiés lors des différentes analyses physico-chimiques
IR: spectrométrie infra-rouge; HPLC: chromatographie liquide à haute pression; SAA: spectrométrie d'absorption atomique; CI: chromatographie ionique; ICP: spectrométrie d'émission atomique à plasma d'induction.

4.4.4. Résultats du suivi de l'ouvrage

Volumes d'eau récupérés lors du suivi en service

Aucune fréquence de prélèvement n'a pu être définie a priori. Des visites d'inspection systématiques après événements pluvieux, pour vérifier le niveau d'eau récupérée dans les 5 bidons (pluviomètre + bidons associés aux capteurs) ont été nécessaires au début du suivi. Ce suivi a été réalisé selon le protocole décrit dans l'Annexe 4.E. Les masses totales d'eau récupérées (pluviomètre et les 4 bidons de collecte en rive de chaussée) ont été relevées à chaque prélèvement.

Les eaux de percolation ont été recueillies et échantillonnées pour analyses du 24 Octobre 2001 (le chantier a été fini le 26 septembre 2001) au 6 Juin 2003 (période de 654 jours). Cette durée intégrait donc les périodes hivernales, incluant gel et utilisation de sels de déverglaçage, ainsi que des périodes estivales, caractérisées par de plus faibles pluviométries.

Les volumes récupérés à partir des capteurs et du pluviomètre sont reportés dans l'Annexe 4.E.

La Figure 4 - 11 montre, l'évolution temporelle des volumes cumulés qui permet d'une part la comparaison de la quantité d'eau de pluie infiltrée entre les quatre planches d'enrobés et d'autre part la comparaison avec la pluviométrie. Pour adopter le mode de représentation classique des essais de percolation en laboratoire, les points discrets correspondant à la mesure du volume percolé ont été reliés. le volume d'eau de pluie est très supérieur au volume d'eau percolé. La représentation sur la même échelle de l'évolution de ces deux volumes nécessite de diviser par 100 le volume d'eau de pluie, qui se trouve exprimé en $1/10 \text{ m}^3$.

N'ayant aucune connaissance de la cinétique de percolation de l'eau et du temps nécessaire entre la tombée de l'eau de pluie et la restitution dans les bidons, chaque quantité d'eau est affectée au jour de collecte, ce qui induit nécessairement un léger décalage des courbes.

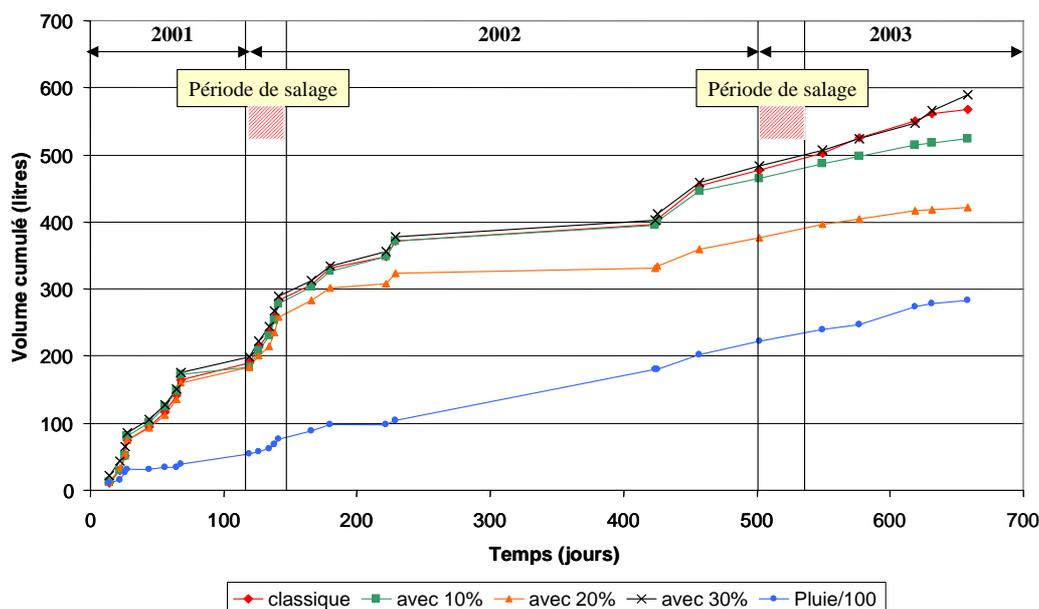


Figure 4 - 11. Évolutions temporelles des volumes d'eau cumulés

Les discontinuités de la courbe des volumes d'eau (Figure 4 - 11) sont caractéristiques d'une interruption entre les précipitations et, entre deux précipitations, d'une dé-saturation de la chaussée. La période de salage correspondant à l'hiver 2001/2002 s'accompagne d'une augmentation des quantités d'eau récupérées pour les 4 planches d'enrobé. Globalement, les résultats montrent que l'allure des courbes entre les quatre planches est la même. Ainsi, la cinétique de récupération de l'eau, pour chacune des planches d'enrobé, est identique.

Aucune entrée d'eau parasite due à un défaut du système de récupération (par exemple étanchéité) n'a été constatée.

Pour s'affranchir de la différence d'ordre de grandeur entre les quantités d'eau recueillies par le pluviomètre et par les capteurs, les volumes unitaires cumulés $V_{\text{capteur cumulé}}$ ont été rapportés au volume total $V_{\text{total cumulé}}$ selon :

$$V = 100 \times \frac{V_{\text{capteur cumulé}}}{V_{\text{total cumulé}}}$$

L'évolution temporelle de ces volumes relatifs V (%) est représentée sur la Figure 4 - 12. Pour la durée du suivi, les évènements pluvieux suivent une évolution globalement linéaire, alors que l'évolution des volumes percolés traduit, pour chaque planche concernée, une influence de la structure de la chaussée.

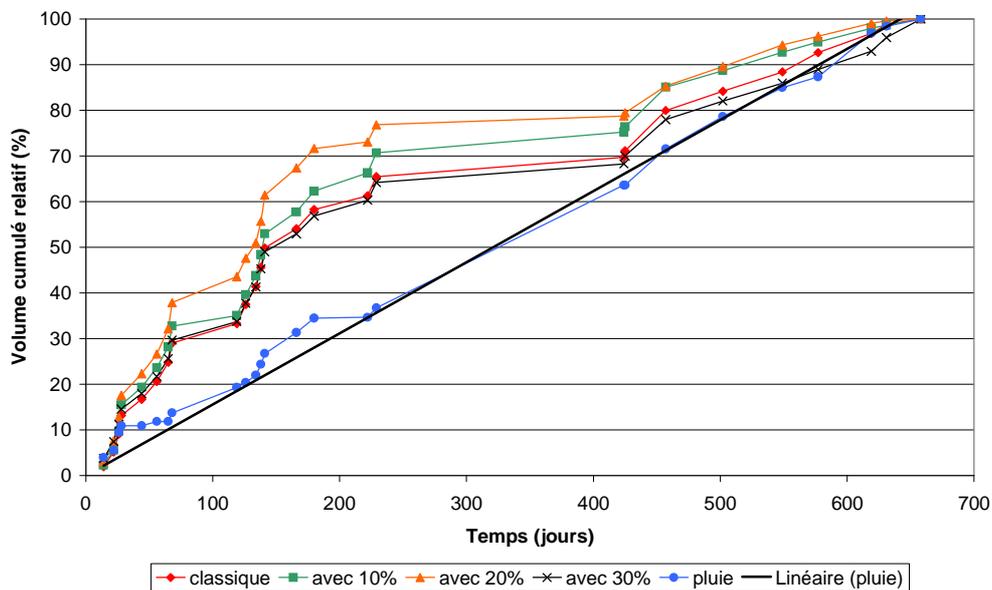


Figure 4 - 12. Évolution temporelle des volumes d'eau cumulés en relatif

Pour déterminer les pourcentages d'infiltration, on définit le débit Q (m^3/s) s'infiltrant dans la chaussée par :

$$Q = K \times S \times i \quad (1)$$

Avec

- K (m/s) la conductibilité hydraulique de l'ensemble des couches de la chaussée
- S en m^2 la surface offerte à l'infiltration
- i le gradient hydraulique, perte de charge par unité de longueur de la chaussée traversée.

Le débit réel sera évidemment fonction des caractéristiques de la pluie. L'infiltration (I) est définie, pour chaque prélèvement unitaire, comme étant la proportion d'eau ayant effectivement traversé les couches de chaussée par rapport à la quantité d'eau tombée sur cette chaussée soit :

$$I = 100 \times \frac{V_{\text{capteur}}}{V_{\text{pluie}}} \quad (2)$$

L'évolution de ce taux d'infiltration (I) en fonction de la durée du suivi (en jours), est présentée sur la Figure 4 - 13 pour les quatre planches étudiées.

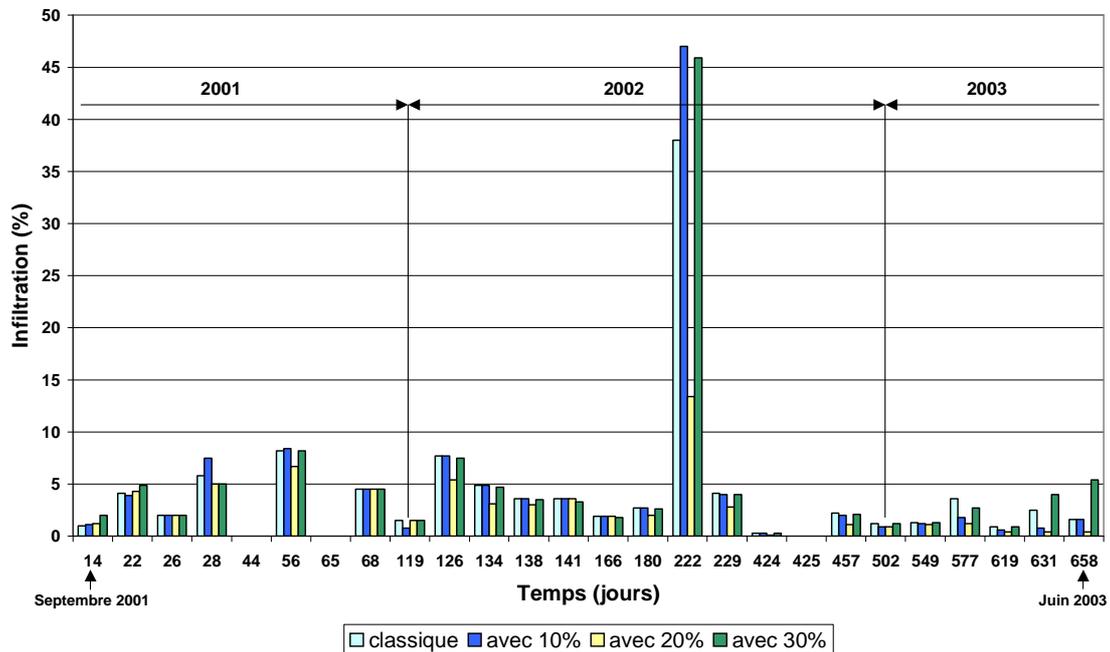


Figure 4 - 13. Évolution temporelle indicative des pourcentages d'infiltration

Nous observons deux anomalies :

- des valeurs anormalement élevées pour le prélèvement du 06/05/2002 (abscisse 222 sur la Figure 4 - 13). Compte tenu de l'ensemble des résultats (Annexe 4.E.)

sur les volumes d'eau récupérée et des connaissances préalables en matière d'infiltration de l'eau de pluie, l'estimation de la quantité de l'eau de pluie du prélèvement du 06/05/2002 semble erronée. De ce fait, ce prélèvement est donc considéré comme aberrant.

- des valeurs nulles pour les prélèvements des 09/11/2001, 30/11/2001 et 25/10/2002 (abscisses 44, 65 et 425 sur la Figure 4 - 13). Pour le prélèvement du 25/10 l'impossibilité d'accéder au pluviomètre (fermeture du site industriel) explique l'absence de calcul des taux d'infiltration. Pour les deux autres prélèvements, nous avons obtenu de l'eau pour toutes les planches d'enrobé mais pas d'eau de pluie, rendant impossible le calcul du taux d'infiltration.

Le Tableau 4 - 17 regroupe à titre indicatif, compte tenu du caractère rudimentaire du pluviomètre, l'ensemble des valeurs obtenues des taux d'infiltration moyens, minimum et maximum. Les résultats montrent une baisse très significative des taux moyens d'infiltration. Cette évolution est présentée sur la Figure 4 - 14.

Année	Classique			Avec 10%			Avec 20%			Avec 30%		
	Moy	Min.	Max.	Moy	Min.	Max.	Moye n	Min.	Max.	Moy	Min.	Max.
2001	4,2	1	8,2	4,4	1,1	8,4	4,1	1,2	6,7	4,5	1,2	8,2
2002	1,7	0,3	7,7	1,6	0,3	7,7	1,2	0,1	5,4	1,7	0,3	7,5
2003	1,5	0,9	3,6	1	0,6	1,8	0,7	0,4	1,2	1,8	0,9	5,4
Total	2			1,9			1,5			2,1		

Tableau 4 - 17. Taux d'infiltration calculés pour chaque planche

Le Tableau 4 - 18 regroupe les quantités totales d'eau de pluie, le nombre de relevés et les taux d'infiltration calculés sur des périodes comparables en matière de découpage saisonnier, et que nous supposons comparables.

Période du	Nombre de relevés	% d'infiltration				Pluie cumulée litres
		classique	Avec 10%	Avec 20%	Avec 30%	
26/09/01 au 23/01/02	8	4,2	4,4	4,1	4,5	3889
23/01/02 au 13/05/02	3	1,9	1,7	1,1	1,9	4247
24/10/02 au 10/01/03	9	3,2	3,1	2,5	3,1	6482
10/01/03 au 06/06/03	5	1,5	1	0,7	1,8	6035

Tableau 4 - 18. pluie cumulée et % d'infiltration par période annuelle

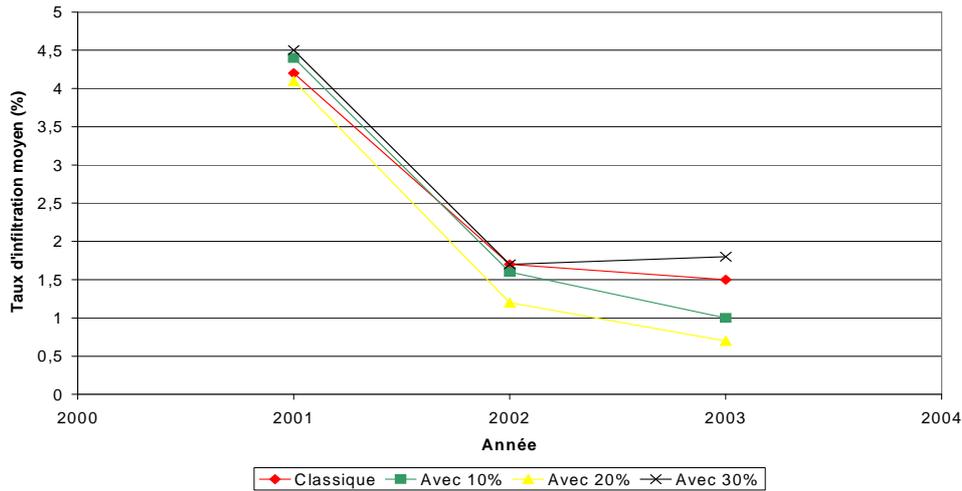


Figure 4 - 14. Evolution du taux d'infiltration moyen annuel

L'analyse précédente ne tient cependant pas compte des saisons, susceptibles d'influer fortement sur les conditions météorologiques. L'évolution de ces taux d'infiltration est présentée sur la Figure 4 - 15 par saison. Le calcul du pourcentage d'infiltration sur des périodes équivalentes, supposées comparables en matière de conditions météorologiques, conduit à la même conclusion que précédemment, une baisse dans le temps du taux d'infiltration.

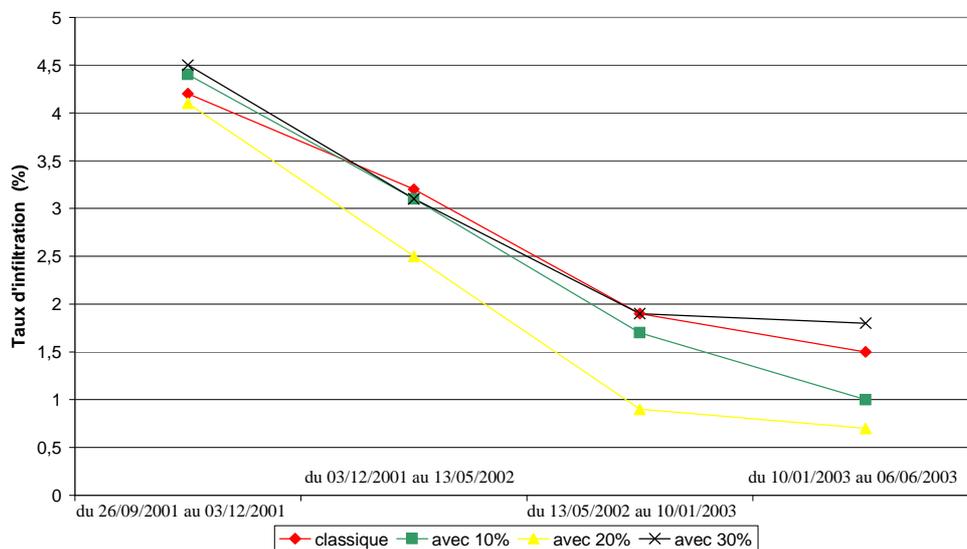


Figure 4 - 15. Evolution du taux d'infiltration par saison

A ce stade de l'étude, il apparaît clairement qu'il serait utile d'acquérir des connaissances plus poussées en matière de propriétés hydrodynamiques des couches de chaussées, saturées ou non en eau.

Résultats des analyses physico-chimiques

Onze échantillons moyens ont été prélevés pendant la période du 10 octobre 2001 au 10 janvier 2003 (Tableau 4 - 19). Les prélèvements d'eau de pluie du site ont également été analysés, mais certains ont été contaminés par la présence de feuilles ainsi que par des retombées sèches (DCO, MES). Une pollution en métaux due au système de fixation du flacon de prélèvement est également probable (Zn).

Tableau 4 - 19. Dates des prélèvements d'eaux de percolation

opérations de salage

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

Les résultats bruts sont présentés dans l'Annexe 4.E. Ils ne permettent pas de distinguer de différences nettes entre les 4 planches étudiées. Ainsi, les variations observées semblent plus liées aux périodes de salage qu'au taux de recyclage. La synthèse des résultats est présentée et comparée à différentes valeurs de référence dans le Tableau 4 - 20. Les valeurs de référence utilisées pour interpréter les résultats obtenus, proviennent des textes suivants :

- Le Système d'Evaluation de la Qualité des cours d'eaux (SEQ) utilisé par les Agences de l'Eau. Il permet de définir 5 classes de qualité des eaux, de très bonne (eaux « bleues ») à très mauvaise (eaux « rouges ») pour l'aptitude de l'eau à la biologie et aux usages liés à la santé humaine (production d'eau potable et loisirs et sports aquatiques).
- La norme hollandaise qui définit pour les sols et les eaux souterraines des valeurs de base et des valeurs d'intervention au-delà desquelles les fonctionnalités du sol et des eaux pour les hommes, les plantes et la vie animale sont sérieusement compromises ou menacées. Les concentrations qui dépassent les valeurs d'intervention correspondent à une sérieuse contamination.
- Le Décret 91.257 sur les eaux douces superficielles utilisées ou destinées à être utilisées pour la production d'eau destinée à la consommation humaine.
- La Directive CEE du 3 novembre 1998 sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.
- L'Arrêté du 2 février 1998 sur le rejet des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.
- Les études antérieures sur les eaux de ruissellement sur les chaussées, notamment sur l'autoroute A11 près de Nantes (Legret et al., 1997).

Paramètres	SEQ Eau verte	Directive CEE (3 nov. 98) Eau potable	ICPE Arrêté du 2 fév. 98	A11 (nantes)	RN76	
					hors salage	salage
Acidification pH	6.0-8.5	6.5-9	5.5-8.5	6.3-7.9	6.5-7.8	7.0-8.0
Matières organiques et oxydables DCO (mgO2/L)	30		125	21-507	<20 - 89	<20 - 75
Particules en suspension MES (mg/L)	25		35	16-267	2 - 63	9 - 139
Minéralisation						
conductivité (µS/cm)	3000	2500		60-17620	40 - 175	110 - 2832
Chlorures (mg/L)	125	250		2.7-6424	0.5 - 4.9	4.8 - 931
Sulfates (mg/L)	125	250		6.7-392	1.5 - 8.7	4.7 - 59.6
nitrates (mg/L)	10	50		0.8-27	<1 - 2.2	<1 - 2.8
Sodium (mg/L)	225	200			0.6 - 11	3.9 - 578
Calcium (mg/L)	18-230				7 - 25	15 - 66.6
Potassium (mg/L)	13,5				<0.6 - 2	<0.6 - 4.6
Magnésium (mg/L)	75				0.2 - 2	1 - 4.3
Micropolluants minéraux						
Pb (µg/L)	10-23	10	500	0.5-19	<1 - 9	<1 - 2.3
Zn (µg/L)	23-140		2000	57-1405	<10 - 64	<10 - 159
Cu (µg/L)	1.7-27	2000	500	7.3-139	7 - 203	11 - 51
Cr (µg/L)	3.6-36	50	500		<1 - 7	<1 - 5
Ni (µg/L)	20	20	500		<2 - 4	<2 - 10
Cd (µg/L)	0.1-0.85	5	200		<0.1 - 0.2	<0.1 - 0.3
Micropolluants organiques						
HAP (ng/L)	200	100		<11-474	2 - 423	24 - 176
HT (µg/L)			10000	140-4200	<10 - 150	50 - 550

Tableau 4 - 20. Synthèse des résultats des analyses physico-chimiques des eaux de percolation

L'examen des résultats obtenus fait apparaître les points suivants :

- Le pH est proche de la neutralité, il varie entre 6,5 et 7,8 et se situe en classe « bleue » du SEQ des cours d'eaux (eaux de très bonne qualité). Il est peu affecté par le salage hivernal.
- La valeur moyenne des M.E.S. en dehors des périodes de salage est de 11 mg/L avec une valeur à 63 mg/L. En période de salage, on note une valeur maximale de 139 mg/L. Les valeurs limites de référence sont de 5 mg/L en classe « bleue » et de 50 mg/L en classe « orange » (mauvaise qualité) selon le SEQ des cours d'eaux. La norme européenne pour le rejet des installations classées est de 35 mg/L.
- La DCO est comprise entre moins de 20 mg/L (limite de quantification et valeur limite des eaux « bleues » du SEQ) et 89 mg/L (eaux « oranges » de mauvaise qualité). La norme européenne pour les rejets des installations classées de 125 mgO2/L n'est jamais dépassée.
- Le NTK a été analysé jusqu'au 24/10/01. La valeur moyenne du NTK est de 1,3 mgN/L, inférieure à la valeur limite de 2 mgN/L des eaux de classe « verte » du SEQ.
- La conductivité est très faible en dehors des périodes de salage, comprise entre 40 et 175 µS/cm, les valeur limites pour les eaux « bleues » étant de 2500 µS/cm. Les concentrations en nitrates, sulfates et chlorures correspondent également à des eaux de bonne qualité selon le SEQ des cours d'eaux. En période de salage,

les valeurs de conductivité et de chlorures sont plus élevées, avec des maximum de 2832 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité et 930 mg/L pour les chlorures. Ces concentrations correspondent toutefois à la classe « verte » pour la conductivité, mais à la classe « rouge » pour les chlorures (très mauvaise qualité). De même, les concentrations en sodium se situent dans la classe « jaune » (qualité médiocre) et celles en sulfates dans la classe « bleue ».

- Les concentrations en métaux lourds sont souvent inférieures aux limites de quantification et toujours inférieures aux valeurs limites pour les eaux potables. L'entrée de l'eau de percolation dans les bidons de prélèvement se faisant par l'intermédiaire d'un tube de cuivre, les valeurs de ce métal sont à prendre avec réserve du fait d'une probable contamination par le système de prélèvement.
- Les hydrocarbures totaux et les HAP ont été dosés sur les eaux de percolation provenant des planches contenant 0 et 20 % d'enrobés recyclés. Les concentrations en hydrocarbures totaux sont toutes inférieures à la valeur d'intervention de la norme hollandaise pour les eaux souterraines (0,6 mg/L) et à la valeur limite des eaux douces superficielles destinées à la production d'eau de consommation (1 mg/L). La valeur maximale mesurée (0,55 mg/L) correspond à une période de salage. En ce qui concerne les HAP, seule une valeur dépasse 200 ng/L, valeur limite pour les eaux de bonne qualité, classe « verte » du SEQ des cours d'eaux. Toutes les valeurs sont inférieures à 1000 ng/L, valeur limite pour les eaux destinées à la production d'eau de consommation. Mis à part le prélèvement du 24/10/02 pour la planche contenant 0% d'enrobés recyclés (423 ng/L), les concentrations les plus élevées se situent pendant les périodes de salage.

Discussion

A chaque prélèvement d'eau pluviale, le volume récupéré est quasiment identique pour les quatre planches de 0 à 30% de recyclage. Le recyclage des agrégats d'enrobés est donc sans influence sur l'aptitude de l'eau de pluie à s'infiltrer dans une couche d'enrobé. Par ailleurs, l'évolution de ces quantités d'eau cumulées est comparable, pour les mêmes périodes de suivi, à l'évolution de la quantité d'eau de pluie récupérée, ce qui permet de penser que le système de récupération s'affranchit bien de l'eau de ruissellement.

Les taux d'infiltration restent modérés, de l'ordre de 4 à 4,5% pour les 6 premiers mois de suivi, et baisse rapidement. Après deux années de suivi, les taux d'infiltration sont de l'ordre de 1 à 1,5%. La percolation de l'eau de pluie peut ainsi être qualifiée de limitée. Ce taux d'infiltration est, durant toute la période de suivi, totalement indépendant du fait d'utiliser des agrégats d'enrobés, et ce quel que soit le taux de recyclage.

Les analyses physico-chimiques de l'eau d'infiltration in situ ont permis de mettre en évidence une pollution saisonnière: les pics de conductivité et de concentration en chlorure, sodium, sulfate et calcium montrent que l'eau récupérée dans les bidons s'est effectivement infiltrée à travers la couche de surface de la chaussée. Ces constituants, provenant massivement des sels routiers utilisés pendant la période hivernale, constituent des "traceurs".

Les eaux de percolation apparaissent très faiblement polluées. Les concentrations en métaux lourds sont faibles ainsi que les concentrations en hydrocarbures. La mauvaise qualité des eaux que nous avons pu rencontrer est due principalement aux

opérations de salage et concerne notamment la teneur en chlorures et en sodium. Des pics de pollution pour la DCO et les MES sont également apparus mais les teneurs sont généralement très faibles.

L'existence de nombreuses sources d'incertitudes ne permet pas de réaliser une étude statistique sur les résultats obtenus. En effet, les concentrations mesurées sont souvent proches ou inférieures des limites de quantification des méthodes analytiques utilisées et le dispositif expérimental lui-même a pu être la cause de différents biais : utilisation de goulottes en acier inoxydable, tubes de cuivre, temps de séjour des eaux de ruissellement prélevées sur le site et de transfert jusqu'au laboratoire d'analyse.

Néanmoins, il ne semble pas apparaître de différence de comportement significatif d'une part entre les différents taux de recyclage des enrobés, et d'autre part, par rapport à la planche réalisée avec des matériaux neufs.

4.4.5. Résultats des analyses de matériaux

Les résultats concernant les essais de lixiviation et de percolation simulé ont fait l'objet d'une publication [Legret et al, 2005].

Résultats des essais de lixiviation

Les résultats d'analyses obtenus sur les fraisats de « classe a » et de « classe b ou c » sont détaillés dans l'Annexe 4.E.

On obtient une faible conductivité ($< 50 \mu\text{S}/\text{cm}$) pour tous les essais, ce qui traduit la faible minéralisation des eaux des trois percolations successives. Cette information, confirmée par les faibles quantités extraites de chlorures et de sulfates, peut s'expliquer par la protection d'une partie importante des faces minérales des granulats par le film de liant bitumineux. En dehors du zinc, présent de façon significative dans la première extraction des fraisats de recyclage, la lixiviation des espèces métalliques est faible. Les valeurs de concentrations obtenues sont presque toujours inférieures aux seuils de détection analytique. Pour les paramètres organiques (HAP et PCB), le même constat peut être fait : les concentrations sont faibles et pour une grande partie inférieures aux seuils de détection analytique. Pour les HAP, seul le phénanthrène dépasse de façon significative le seuil de détection pour chacune des trois extractions. Une comparaison des quantités extraites, avec les seuils "déchets inertes", issus de la décision du conseil n°2003/33/CE du 19/12/2002 (critères d'admission des déchets en décharge) est présentée dans le ci-dessous :

Paramètres d'analyse	Fraisats de Recyclage « classe a » (total des 3 extractions)	Fraisats de Surface « classe b ou c »	Seuils décision n°2003/33/CE (lixiviation avec L/S=10)	
			déchets inertes	déchets non dangereux
COT (mg/kg)	65	60	< 500	< 800
Pb (mg/kg)	< 0.15	< 0.15	< 0.5	< 10
Hg (mg/kg)	< 0.004	< 0.005	< 0.01	< 0.2
Cu (mg/kg)	< 0.150	< 0.15	< 2	< 50
Zn (mg/kg)	< 1.3	< 0.3	< 4	< 50
Phénanthrène ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	7.9	5.7	-	-

Tableau 4 - 21. Comparaison des résultats aux valeurs seuils

Selon les seuils donnés, les fraisats étudiés (recyclage et surface) peuvent être assimilés à des déchets inertes, pour l'ensemble des paramètres recherchés. La décision du conseil n°2003/33/CE ne propose pas de seuils de lixiviation spécifiques au phénanthrène et aux autres HAP, qui doivent être fixés par les états membres. Pour la France seules des valeurs de constat d'impact (sur les sols et les eaux) existent pour certains HAP, mais pas pour le phénanthrène. Ce composé est référencé par l'US-EPA comme substance cancérigène, mais ne figure pas dans la liste des européenne des substances cancérigènes.

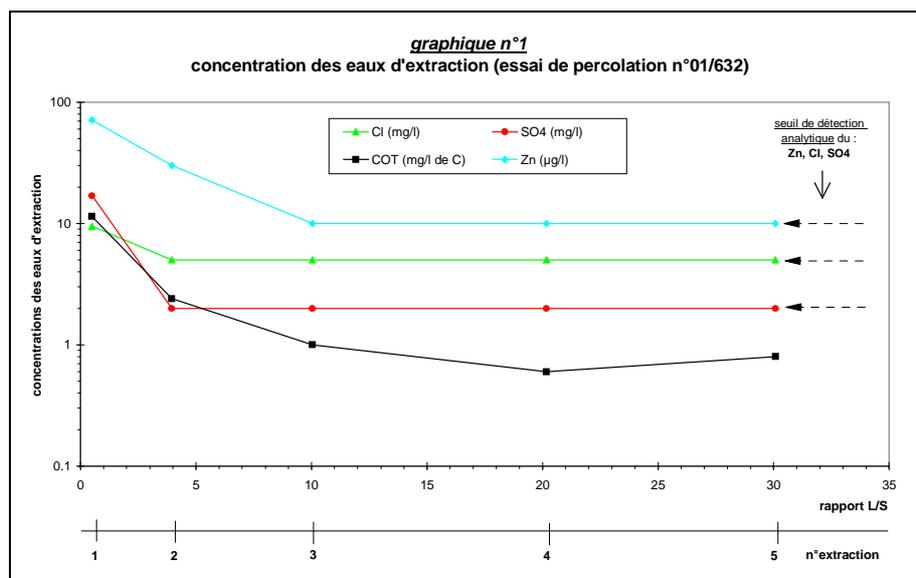
Contrairement à ce que l'on pouvait attendre, les fraisats de surface sont moins chargés en éléments polluants, d'origine métallique ou organique, que les fraisats de recyclage. L'accumulation de ces éléments polluants dans les premiers centimètres de la structure de chaussée ne semble pas se produire. Le lessivage plus important en surface de chaussée peut être avancé comme une première explication. Il est également possible que l'étape de fraisage qui se déroule sous arrosage ait entraîné la majorité des polluants avant le prélèvement. Une analyse des eaux de fraisage aurait été nécessaire pour le vérifier.

Résultats des essais de percolation sur fraisats

Compte tenu des résultats obtenus sur les essais de lixiviation aucun essai de percolation n'a été entrepris sur les fraisats de surface.

Les résultats, exprimés en quantités extraites, sont présentés dans l'annexe 4.F. en fonction des numéros des échantillons du Tableau 4 - 15. Les commentaires relatifs à l'évaluation de l'essai lui-même (répétabilité, influence de la variation du rapport L/S, influence de la variation de la granulométrie de l'échantillon), sont également présents dans l'annexe 4.F.

Concernant l'évaluation d'une mise en stock, les résultats, sont présentés sur la Figure 4 - 16 ci-dessous.



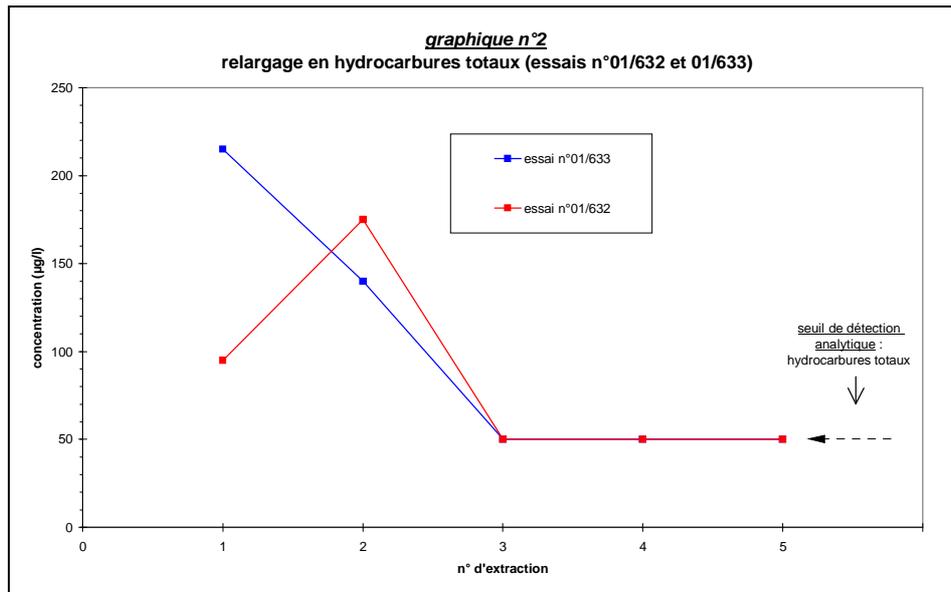


Figure 4 - 16. caractérisation des eaux d'extraction sous percolation

Pour les espèces salines le seuil de détection analytique est atteint dès la deuxième extraction (Figure 4 - 16 graphique n°1). Le pH, imposé principalement par les espèces alcalines, lessivées à la surface des granulats d'origine (carrière de la Noubleau), est neutre voire très légèrement basique.

Le graphique n°2 de la Figure 4 - 16, montre que l'évolution de la concentration en hydrocarbures totaux est assez différente entre les essais n°01/632 et 01/633. On constate une nette augmentation de la concentration totale en HAP, de l'essai n° 01/633 par rapport l'essai n°01/632, totalement identique du point de vue des paramètres de percolation (nature et granulométrie des fraisats, vitesse de percolation, mode de conservation et délai d'analyse des échantillons d'eau, ...). Cette augmentation a été considérée comme un artefact. Elle peut éventuellement s'expliquer un entraînement irrégulier de petites particules de bitume, dans le flux d'eau. La concentration en hydrocarbures étant déterminée par chromatographie après extraction au tétrachlorure de carbone, la solubilisation de ces petites particules avant analyse peut donc entraîner, des concentrations assez variables. Pour les deux essais, la concentration en hydrocarbures totaux est inférieure au seuil de détection analytique, pour la troisième extraction. Les résultats montrent que les composés organiques cycliques recherchés (HAP et PCB) sont presque tous inférieurs aux seuils de détection analytiques suivants :

- 0,010 µg/l (=> 3 HAP dont benzo(a)pyrène)
- 0,025 µg/l (=> 7 PCB; 11 HAP dont phénanthrène)
- 0,05 µg/l (=> 2 HAP dont acénaphène)
- 0,1 µg/l (=> 2 HAP dont naphthalène)

Les concentrations, en dehors des extractions n°1 et 3 des essais 01/632 et 01/633, sont comparées dans le Tableau 4 - 22, et sont trouvées inférieures, aux deux seuils HAP, définis dans la réglementation "eau potable" (décret n°2001-1220 du 20/12/01, relatif aux eaux destinées à la consommation humaine, à l'exclusion des eaux minérales naturelles, annexe I partie B).

paramètres	essai 01/632 extraction n°1	essai 01/633 extraction n°3	limite de qualité des eaux destinés à la consommation humaine (décret n°2001- 1220)
benzo-a-pyrène (µg/l)	0.020	0.145	0.010
total 4 HAP (µg/l) ⁽¹⁾	0.170	< 0.390	0.1

Tableau 4 - 22. Comparaison des seuils réglementaires aux résultats de HAP en percolation simulée -(1) somme des composés suivants : benzo-b-fluoranthène, benzo-k-fluoranthène, benzo-ghi-pérylène, indéno-1,2,3-pyrène

Pour l'ensemble des paramètres qu'ils soient de nature métallique, organique ou saline, on constate une baisse globale des concentrations, suffisante pour atteindre rapidement, dans la plupart des cas, les seuils de détection analytique. Cette baisse de concentration est logiquement plus rapide pour les espèces salines les plus solubles (chlorures, sulfates) que pour les espèces organiques moins solubles (Carbone Organique Total, hydrocarbures totaux). L'évolution de la concentration en zinc, qui constitue le seul élément métallique dont la teneur dépasse de façon significative le seuil de détection analytique, correspond à une baisse plutôt lente.

Résultats des essais de percolation sur carottes de chaussées

Les résultats sont regroupés et comparés à la référence « eau bleue » du Système d'Evaluation de la Qualité des cours d'eaux (SEQ) utilisé par les Agences de l'Eau. dans le Tableau 4 - 23.

Paramètres physico- chimiques	Taux de recyclage (%)	10%		20%		Référence eau « bleue »	
		Carotte n°		6			
		Eau	4	brute	filtrée		brute
pH			6,9		6,9		6,5 - 8,2
conductivité	µS/cm		21		23		2500
DCO	mg/L O ₂		18	18	23	18	20
MES	mg/L		1		1		5
HT	mg/L		0,12		0,13		-
HAP	ng/L		35		36		100
Cl	mg/L		0,9		0,8		62,5
NO ₃	mg/L		0,9		< 0,5		2
SO ₄	mg/L		1,5		< 1		62,5
Ca	mg/L		2,4	2,5	2,7	2,7	-
K	mg/L		< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6	-
Mg	mg/L		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	-
Na	mg/L		0,3	0,4	0,3	0,4	-
Al	µg/L		58	23	29	15	-
Fe	µg/L		95	< 10	102	< 10	-
Mn	µg/L		15	14	14	14	-
Zn	µg/L		250	234	317	292	2,3 - 14
Cr	µg/L		5	2	8	2	
Cu	µg/L		20	15	21	14	0.17 - 2,7
Ni	µg/L		11	11	11	14	0.17 - 2,7
Pb	µg/L		0,6	< 0,5	1,4	< 0,5	2,1 - 10
Cd	µg/L		1,6	1,5	1,0	0,9	0,01 - 0,09

Tableau 4 - 23. Résultats des analyses physico-chimiques sur les eaux de percolation des carottes à 10 et 20%

Les échantillons ont un pH très proche de la neutralité (6.9) et une conductivité faible (<25µS/cm) ce qui traduit la faible minéralisation. De même, les concentrations de la DCO et des espèces salines (Cl, SO₄) sont faibles. L'ensemble des concentrations des espèces recherchées sont inférieures aux limites des eaux de rivières "bleue" à l'exception d du cadmium (Cd > 0.09 µg/L), du chrome dans les eaux brutes (Cr brut > 3.6 µg/L), du cuivre (Cu > 2.7µg/L), et du zinc (Zn > 14 µg/L). Ces concentrations ne dépassent pas toutefois celles des eaux superficielles. L'eau récupérée des essais de perméabilité des carottes est donc peu polluée. Il apparaît que la plupart des espèces sont essentiellement présentes sous forme soluble, c'est-à-dire dans l'eau filtrée, exceptés l'aluminium (Al) le fer (Fe) et le chrome (Cr) qui sont essentiellement présents sous forme particulaire.

Parmi les HAP analysés, seul le fluoranthène est détecté. Les carottes ayant été prélevées peu de temps après la mise en service de la nouvelle chaussée (le 04/10/2001), elles n'ont été soumises au trafic que pendant quelques jours. La pollution observée dans les échantillons analysés provient donc probablement de l'appareillage d'essai, ou des matériaux de carotte. Ainsi le fluoranthène pourrait provenir du l'enrobé. Il n'apparaît par contre aucune distinction claire en fonction du taux de recyclage de 10% et 20%.

Discussion sur la caractérisation des matériaux

Les deux techniques d'extraction utilisées (essai de lixiviation et de percolation simulée), permettent de considérer les relargages des fraisats étudiés comme faibles, pour la plupart des paramètres recherchés (espèces solubles, métaux, hydrocarbures).

- Les quantités extraites, via l'essai de lixiviation NF EN 12457-2, sont comparables aux seuils définis pour les déchets inertes (décision du conseil n°2003/33/CE du 19/12/2002 établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges).
- Les calculs de relargages "court terme" (les plus vraisemblables, compte tenu du scénario "mise en stock" testé) permettent de considérer les concentrations des eaux issues des stocks de fraisats, comme de proches du niveau de potabilité. Ces résultats sont d'autant plus satisfaisants, qu'aucun facteur de dilution n'a été pris en compte dans le calcul. Dans la réalité, les eaux de percolation issues des stocks de fraisats seront diluées dans une proportion qui va dépendre du volume collecté sur la surface du bassin versant de la plate-forme, sur laquelle se trouve le(s) stock(s).

Aucune des analyses de matériaux ne laissent apparaître de différence nette entre les taux de recyclage.

4.5. DONNEES SUR LES NUISANCES

4.5.1. Nuisances acoustiques

Contexte réglementaire

Bruit global des chantiers

La prise en compte du bruit global émis par les chantiers de réalisation des aménagements et des infrastructures de transports terrestres, apparaît à l'article 12 de la loi n°92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit. Le décret

d'application n°95-22 du 9 janvier 1995 précise, dans son article 8, que le maître d'ouvrage devra, préalablement au démarrage du chantier et ce, au moins un mois avant celui-ci, fournir au(x) Préfet(s) et au(x) Maire(s) tous les éléments d'informations utiles : nature du chantier, durée prévisible, nuisances sonores attendues et les mesures prises pour en limiter les effets. Le(s) Préfet(s) peut, après avis du (des) maire(s) concerné(s), si les nuisances attendues paraissent importantes, prescrire, par arrêté motivé, des mesures particulières sur le fonctionnement du chantier, notamment sur les horaires de travail et sur les accès. Le maître d'ouvrage doit alors en informer le public par tout moyen approprié. La référence aux chantiers existe également dans le décret n° 95-408 du 18 avril 1995 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage, modifiant le code de la santé publique en son livre 1er – chapitre VI. En résumé, cette réglementation s'attache à faire respecter des règles "d'emploi normal" des matériels sur les chantiers. Des arrêtés préfectoraux ou municipaux peuvent apporter des prescriptions complémentaires. La loi n° 90-1067 du 28 novembre 1990 confie au Maire les compétences pour pouvoir prendre des mesures individuelles d'application concernant les bruits de voisinage (articles L 131-1, L 131-2 et L 131-8 du code des communes).

En conclusion, si la législation française introduit la prise en compte, en amont, des problèmes de nuisances sonores des chantiers avec la possibilité d'établir des prescriptions particulières par arrêté préfectoral motivé, il n'existe pas aujourd'hui de texte réglementaire fixant des valeurs limites admissibles pour le bruit global émis par les chantiers. Etant donnée cette réglementation, la réalisation de mesures d'émissions acoustiques pour chaque engin afin des les intégrer à l'ICV de la RN76 était donc justifiée.

Bruit des matériels et des engins de chantier

Les engins doivent respecter les règles définies par la réglementation à la date de leur mise en service et de ce fait, suivre, pour les plus anciens, certaines prescriptions d'utilisation, notamment de distance minimum vis-à-vis des bâtiments d'habitation ou d'activités humaines.

Les méthodes de mesure pour les différents types d'engins et matériels de chantier sont définies en annexe de chaque arrêté concerné, en conformité avec l'arrêté du 3 juillet 1979. Pour certains d'entre eux, les méthodes d'essais sont précisées dans des normes AFNOR spécifiques. Il en est de même pour la détermination des niveaux de puissance acoustique LWA. Les essais d'homologation sont assurés en France par le Laboratoire National d'Essais (L.N.E.) et par la Station Nationale d'Essais des Matériels de Génie civil (S.N.E.M.A.G.).

La loi du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit a conforté cette réglementation, notamment l'article 2 qui précise les diverses procédures d'homologation, certification, vérification... Le décret n° 95-79 du 23 janvier 1995, pris en application de cet article 2 cite, entre autres, les engins et matériels utilisés sur les chantiers de travaux publics ou non, à l'entretien des voiries (article 1). Ainsi « à chaque type ou famille d'objets bruyants retenus, sont associées des caractéristiques acoustiques et des valeurs limites admissibles » .

Par ailleurs, certaines installations spécifiques présentes sur les chantiers peuvent être soumises, au titre des installations classées, aux spécifications de l'arrêté du 23 janvier 1997. Ce dernier fixe, en limite de propriété, pour les installations nouvelles ou modifiées, des règles d'émergence selon la nature de la zone concernée (bruit ambiant) et la période (jour, nuit).

Indicateurs de bruit utilisés : bibliographie

Afin de restituer les mesures d'émissions sonores réalisées, quelques rappels élémentaires en matière d'acoustique sont décrits au début de l'annexe 4D.

Puissance acoustique

Pour déterminer les nuisances sonores produites durant le chantier RN76, nous avons caractérisé les émissions sonores des différents engins de chantier présents à différentes phases du chantier telles que la fabrication en centrale et la mise en oeuvre des enrobés. Ainsi, pour chaque engin et/ou phases de chantier, un niveau de puissance acoustique L_w a été déterminé.

Si l'on intègre l'intensité sur toute une surface fermée S entourant une source de bruit, on obtiendra la puissance acoustique de cette source défini par

$$L_w = 10 \log \frac{W_1}{W_0}$$

avec : L_w le niveau de puissance acoustique (dB), W_1 puissance acoustique de la source, W_0 puissance acoustique de référence (10-12 W).

Quelle que soit l'enveloppe choisie, la puissance acoustique reste la même (Figure 4 - 17).

L'énergie acoustique traversant une surface élémentaire (dS) décroît quand on s'éloigne de la source, mais intégrée sur toute la surface, elle reste constante.

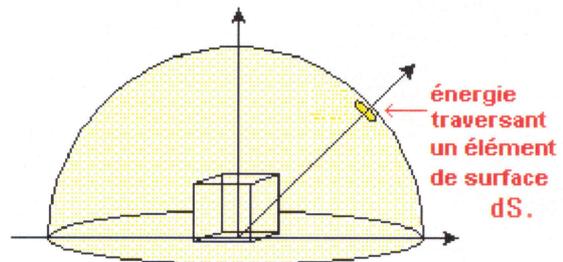


Figure 4 - 17. énergie acoustique

Ainsi, le niveau de pression acoustique L_p dépend de l'environnement et de la distance entre la source et le récepteur contrairement au niveau de puissance acoustique L_w qui est une caractéristique acoustique propre de la source.

Analyse statistique des bruits :

La représentation temporelle permet d'accéder à une information statistique du signal acoustique ; les indicateurs statistiques les plus utilisés sont précisés ci-après.

Le L_{50} est le niveau de pression acoustique atteint ou dépassé pendant 50 % du temps de prélèvement; il a été utilisé à une époque comme valeur de base pour caractériser un bruit, Le L_1 est le niveau de pression acoustique atteint ou dépassé pendant 1 % du temps de prélèvement; ce niveau donne une idée de la valeur crête du signal, Le L_{95} est le niveau de pression acoustique atteint ou dépassé pendant 95 % du temps de prélèvement; ce niveau donne une idée du bruit de fond.

Indice énergétique et niveau équivalent :

Dans le cas d'un bruit stable, le sonomètre indiquera une valeur en dB(A) constante dans le temps. En revanche, si le niveau varie, l'indication sera évidemment fluctuante. Pour caractériser le bruit, on peut avoir recours aux paramètres statistiques vus précédemment, mais ceux-ci n'ont pas de signification physique très représentative et ne donnent qu'une information partielle. On utilise alors le niveau

énergétique pendant une durée T qui correspond au niveau énergétique qu'aurait un bruit continu stable pendant la même durée T et contenant la même énergie ; c'est en fait l'énergie efficace du signal. On appelle ce niveau le niveau équivalent L_{eq} , il a pour expression :

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L}{10}} dt$$

On peut accéder à cet indice soit par l'intermédiaire d'appareils réalisant numériquement l'opération ci-dessus, soit en analysant un signal en classant le temps t_i pendant lequel le signal s'est tenu dans un intervalle de niveau L_i donnant :

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N t_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

C'est cet indice énergétique qui est actuellement le plus employé. Notons que cet indice L_{eq} peut ou non être pondéré (A). En général, on effectue la pondération (cf annexe 4D), et le niveau équivalent de pression acoustique d'un bruit fluctuant s'exprime en $L_{eq}(A)$.

Analyse fréquentielle des bruits :

On peut, à partir d'une représentation temporelle d'un signal, accéder à la représentation fréquentielle de ce même signal par transformation de Fourier. On obtient alors l'analyse spectrale de ce signal. Dans ce cas, le signal est représenté dans le système de coordonnées amplitude/fréquence. On voit que ce type de représentation est extrêmement utile pour reconnaître la répartition de l'énergie acoustique. En pratique, l'analyse spectrale se fait de deux façons distinctes

- en bande fine à largeur constante on obtient ainsi un spectre d'une excellente résolution qui permet de déterminer l'origine des bruits à fréquence pure si l'on connaît par exemple les fréquences de rotation de machines tournantes ;
- en bande d'octave (ou de fraction d'octave) qui donne plus globalement la répartition de l'énergie acoustique en fonction de la fréquence; c'est la représentation la plus classique en acoustique qui permet de savoir dans quelles grandes bandes de fréquence le bruit est prépondérant.

Méthodes des mesures d'émission acoustique lors du chantier

Site du chantier RN 76

L'instrumentation utilisée pour effectuer des mesures acoustiques liées à la fabrication de l'enrobé et sur le site RN76 est décrite ci-après : pour les 3 mesures en continu (1 à la centrale et 2 sur le chantier) des sonomètres de classe 1 ACLAN ont été utilisés, de type SIP 95 ; ainsi qu'un calibre BRUEL et KJAER de type 4231, un enregistreur magnétique de type NAGRA et un enregistreur numérique de type DAT – TASCAM. Toutes les mesures de bruit ont été réalisées suivant la norme NFS 31-010 "caractérisation et mesurage des bruits dans l'environnement". Les mesures de bruit effectuées pendant les deux jours ont permis de caractériser acoustiquement les engins au cours des phases suivantes (Tableau 4 - 24).

MATERIELS	PHASES ETUDIEES
centrale de fabrication	fabrication des 4 enrobés
fraiseuse	fraisage de l'enrobé existant à des épaisseurs et vitesses différentes
balayeuse	nettoyage de la chaussée
répandeuse	dépôt du liant sur la chaussée
finisseur	mise en place des enrobés sur les 4 planches
compacteur à pneus	compactage de la chaussée sur les 4 planches
compacteur à cylindres	

Tableau 4 - 24. Matériel pris en compte et phases de travail associées

Sur le site RN76, les 4 planches d'enrobés ont été testées acoustiquement à l'aide d'un appareillage mobile. De plus, pendant les deux jours de travaux, deux sonomètres fonctionnaient en continu et de part et d'autre du site afin de pouvoir dissocier le bruit propre du chantier et celui de la circulation routière. La position des différents points de mesure est indiquée en Figure 4 - 18.

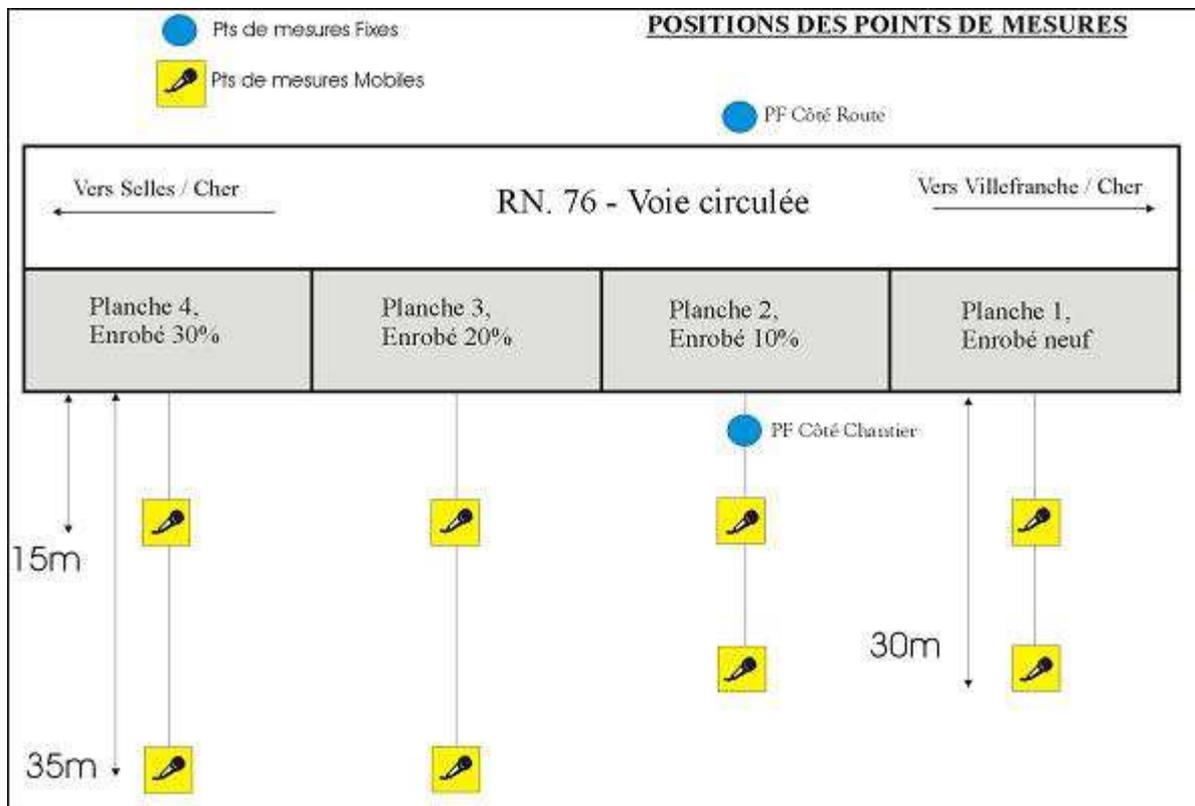


Figure 4 - 18. situation des points de mesure sur le site RN76.

Comme énoncé précédemment, deux points de mesure en continu sont présents sur le chantier (à 4 m du bord de chaussée) et situés au milieu environ de la zone d'étude (hauteur du micro : 1,2 m par rapport au sol). Pour les 4 planches d'enrobés, des mesures de courte durée ont été effectuées respectivement à 15 m et à 35 m du bord de planche et au milieu de chacune. Pour deux des planches, faute de dégagement suffisant, les points de mesure sont situés à 15 m et 30 m du bord de chaussée. La veille des mesures, les planches expérimentales avaient été balisées à l'aide de cônes afin de repérer plus facilement le passage des engins sur les enregistrements et donc de déterminer précisément les distances sources-récepteurs.

Site centrale d'enrobage

En ce qui concerne la centrale de fabrication, des mesures en continu ont été réalisées le mercredi 26 septembre 2001 (Figure 4 - 19). La mesure des niveaux sonores du point fixe (situé à 40 m de la centrale) était accompagnée d'une analyse par bandes de fréquences afin de déterminer le spectre sonore de la source.

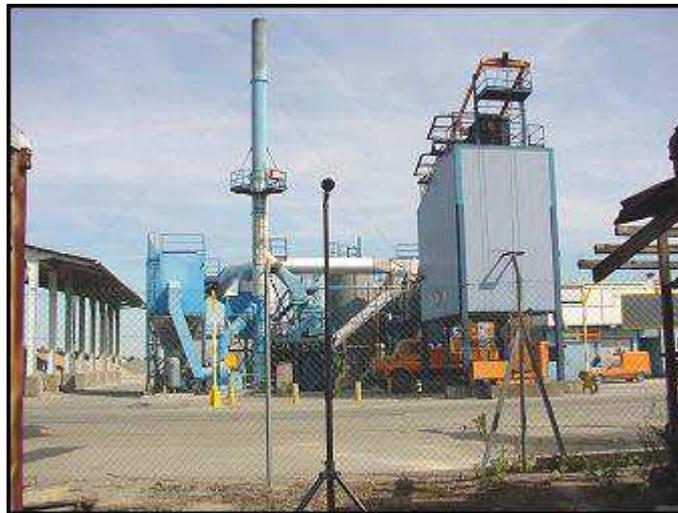


Figure 4 - 19. localisation des points de mesure à la centrale d'enrobage

Résultats des mesures acoustiques

Site du chantier : mesures à partir des points fixes

Les périodes retenues dans les résultats vont de 8h45 à 16h pour les deux journées de chantier. Les deux points fixes du chantier situés de part et d'autre de la RN.76 ont permis de relever les niveaux sonores sur les deux journées. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4 - 25. Les évolutions temporelles figurent en annexe 4.D.

Journée	Point côté chantier	Point côté route
Fraisage (25/09/01)	72,1 dB(A)	72,5 dB(A)
Mise en œuvre (26/09/01)	70,1 dB(A)	70,7 dB(A)

Tableau 4 - 25. niveaux sonores sur le chantier RN76

Côté voie circulée et côté chantier, il n'y a pas de différence significative en terme de Leq mesuré, et ce, pour les deux journées : 72 dB(A) mesuré pour la journée de déconstruction de la chaussée et 71 dB(A) pour la journée de mise en œuvre. Par contre, en relevant les niveaux sonores pendant l'arrêt du chantier en mi-journée (12h30 – 13h30 pour la 1ère journée et 12h15 – 13h15 pour la deuxième), on peut estimer l'augmentation des niveaux de bruit due à la présence du chantier. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4 - 26. La journée de déconstruction de la chaussée est la plus bruyante avec une augmentation de 6 dB(A) contre 4 dB(A) pour la journée de reconstruction.

date	trafic RN.76 seul	trafic RN.76+ chantier	augmentation
25/09/01	67 dB(A)	73 dB(A)	+6 dB(A)
26/09/01	67 dB(A)	71 dB(A)	+4 dB(A)
<i>Points de mesure à 4 mètres du bord de chaussée</i>			

Tableau 4 - 26. Augmentation des bruits due au chantier

Sites du chantier : mesures sur les planches d'enrobés

Sur les 4 planches mises en œuvre, plusieurs prises de mesures de courte durée ont été réalisées durant les 2 jours de chantier. Au total, en considérant les différents passages des engins devant les microphones, nous avons pu réaliser près de 200 mesures. Le détail de ces résultats, planche par planche, est donné en annexe 4.D. Le nombre important de mesures a permis ainsi de voir l'influence de plusieurs paramètres. C'est notamment le cas pour la fraiseuse où plusieurs critères entrent en jeu, et son cas est traité à part.

La fraiseuse

Les critères primordiaux dans l'étude de cet engin sont la vitesse de déplacement, l'épaisseur de fraisage et la directivité de la source. Nous avons tout d'abord essayé de déterminer l'influence de la vitesse et de l'épaisseur de fraisage sur le niveau de bruit. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau 4 - 27.

CAS	EPAISSEUR	VITESSE	Lw en dB(A)
1	7 cm	10,9 m/mn	~109
2	4 cm	9,23 m/mn	~110
3	3 cm	31 m/mn	~112
4	4 cm	12 m/mn	~109
5	3 cm	14,3 m/mn	~110

Tableau 4 - 27. bruit de la fraiseuse en fonction des conditions de fraisage

Ainsi, on se rend compte que l'épaisseur de fraisage n'est pas le paramètre le plus influent. En effet, en comparant les cas 1 et 4 où la vitesse est comparable et où seule l'épaisseur fraisée varie, on obtient les mêmes niveaux de puissance acoustique. Par contre, si la vitesse d'avance de la fraiseuse augmente sensiblement, l'augmentation du niveau de bruit est plus nette. C'est le cas n° 3 où la vitesse a presque triplé par rapport aux autres configurations. Les mesures ont aussi permis de mettre en évidence une certaine directivité de la fraiseuse. Suivant l'angle de vue entre les prises de mesures et les dents du tambour, les niveaux pouvaient varier légèrement (c'est le cas notamment d'un angle de 90° entre le point de mesure et l'engin) (Figure 4 - 20). En résumé, les niveaux de bruit obtenus pendant le fraisage sont sensiblement identiques sur les 4 planches. Les variations les plus importantes sont obtenues lorsque la vitesse augmente et non quand l'épaisseur fraisée augmente.

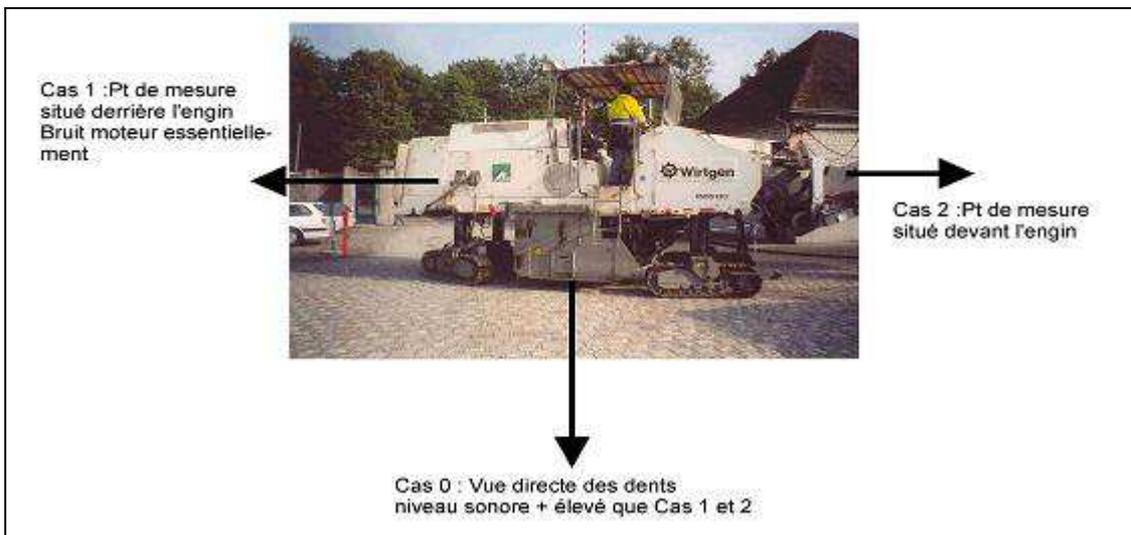


Figure 4 - 20. incidence de la position du capteur pour la mesure de bruit

Les autres engins de chantier

Les niveaux de bruit obtenus pour les différents engins sont assez homogènes d'une planche à l'autre. Le taux recyclage de l'enrobé choisi n'a donc que peu d'influence sur les résultats obtenus.

La fraiseuse et la balayeuse sont les deux engins les plus bruyants du chantier [Lw ~110 dB(A)]. Ces deux matériels sont présents lors de la même journée, à savoir lors de la déconstruction de la chaussée. Cela explique que la 1^{ère} journée de manipulation soit la plus bruyante. Lors de la journée de mise en place des enrobés, seul le compacteur à cylindre émerge à un niveau de puissance acoustique de plus de 105 dB(A). Les autres engins présents ce jour là voient leurs niveaux sonores rester en deçà de cette valeur. De plus, durant cette journée, les coups de klaxon du finisseur ont été fréquents, atteignant un niveau de 85 dB(A) à 15 m de la source. Les résultats obtenus sur les 4 planches d'enrobés sont présentés, par engin, dans le Tableau 4 - 28.

engins	Classique 0%	Taux de 10 %	Taux de 20 %	Taux de 30 %
	L _w en dB(A)			
fraiseuse	111	109	109	111
camion	-	-	-	101
balayeuse	110	109	109	111
finisseur	105	104.5	104	104
finisseur au ralenti	97	98.5	96	98.5
finisseur avec chargement de camion	-	-	-	101.5
compacteur cylindre	105	106	109	109
compacteur pneus	100	102	101	102
répandeuse	-	101	-	-

Tableau 4 - 28. mesures de bruit (L_w) par engin

Les analyses fréquentielles des six principaux engins du chantier sont présentées en annexe 4.D. Pour la fraiseuse, le spectre est riche en basses fréquences (< 125 Hz). En ce qui concerne le finisseur et la répandeuse, le spectre est homogène sur toute la gamme de fréquences (pas de fréquence dominante). Ce n'est pas le cas des spectres des deux compacteurs et de la balayeuse où l'on constate des fréquences dominantes soit :

- des fréquences basses inférieures à 125 Hz ;
- autour de la fréquence 1000 Hz.

On peut toutefois remarquer que cette prédominance autour de 1000 Hz est plus remarquée sur le compacteur à cylindre et la balayeuse que sur le compacteur à pneus. C'est cette particularité qui confère au compacteur à cylindre un aspect plus "désagréable" que le compacteur à pneus. De même, cette fréquence particulière des brosses de la balayeuse rend également l'engin plus désagréable que le finisseur par exemple, dont le spectre est homogène.

Centrale d'enrobage : mesures à partir des points fixes

Les mesures du point fixe (situé à 40 m de la centrale) ont fourni les résultats présentés dans le Tableau 4 - 29. Les courbes d'évolutions temporelles ainsi que les spectres fréquentiels pour chaque période de fabrication sont fournis en annexe 4.D.

Type d'enrobé	Horaires de fabrication	Leq (A) mesuré	L _w en dB (A)
Classique	07h30 – 08h40	68,9	108,9
Taux de 10%	09h12 – 10h20	68,5	108,5
Taux de 20%	10h50 – 11h50	68,2	108,2
Taux de 30%	14h00 – 15h00	68,4	108,4

Tableau 4 - 29. Mesures de bruit à la centrale d'enrobage

On constate que les niveaux sonores moyens [Leq(A)] sont constants sur chaque période de fabrication. Au démarrage de la centrale et donc pour la première fabrication (7h30-8h40), il faut signaler que des perturbations dues aux lavages des camions à proximité du microphone sont intervenues jusqu'à 7h55. Sur cette période,

le bruit intrinsèque de la centrale a pu tout de même être isolé, il a atteint le niveau de 68,9 dB(A) ; le L_{aeq} étant de ~ 72 dB(A). Pour les autres fabrications, le niveau sonore à 40 m atteint aussi cette valeur de 68 dB(A). En considérant le niveau de puissance acoustique, on obtient un $L_w = 108$ dB(A) pour la fabrication des enrobés. Concernant l'analyse fréquentielle, le spectre est un peu plus riche en basses fréquences (de 50 à 500 Hz) avec une fréquence de 200 Hz qui prédomine légèrement. Cette fréquence se retrouve sur les 4 graphes et correspond au fonctionnement de la centrale proprement dit et non à la fabrication des enrobés. En résumé, à la centrale de fabrication, le changement d'enrobé n'a donc pas eu d'influence sur les niveaux sonores observés.

4.5.2. Nuisances odorantes

Principe de mesure d'émissions odorantes : bibliographie

Concernant les odeurs, il est unanimement reconnu qu'aucun appareillage ne remplace le nez humain [Benoit et al, 1982; Rognon et Pourtier, 1999]. En effet, l'inhalation de produits malodorants peut avoir une action nuisible sur le bien être des personnes, bien que l'odorat soit considéré comme un sens mineur. Or, une tendance naturelle de l'être humain consiste à assimiler, à tort, dans certains cas la notion de danger, de toxicité et de mauvaise odeur. L'autre caractéristique des odeurs est que, contrairement au goût pour lequel on distingue quatre fondamentaux (salé, sucré, acide et amer), il est impossible de définir une liste d'odeurs fondamentales [Rognon et Pourtier, 1999]. Ainsi, les caractéristiques des odeurs sont matérialisées par : l'intensité (exprimée en ppm), la qualité (pouvant s'exprimer comme parfumée, acide, de brûlé, fruitée), l'acceptabilité (agréable, acceptable, désagréable, intolérable). Des évaluations d'odeurs proposées dans la littérature (AIHA, 1999) sont typiquement déterminées pour un seul constituant, ce qui n'est pas le cas dans la situation réelle qui nous préoccupe. De plus, les caractéristiques odorantes des différents constituants composant l'odeur n'ont pas tendance à se combiner de manière additive, alors que la gêne occasionnée par ces substances peut agir de façon additive, surtout en présence de concentrations élevées (COMETTO-MUNIZ, 1989). Enfin, l'analyse chimique seule, bien que pratique pour mettre en évidence les constituants responsables de l'odeur, ne permet pas de quantifier une nuisance olfactive, car il faudrait pour cela disposer d'une corrélation statistique entre la concentration d'odeur et la concentration chimique du constituant dans le mélange gazeux testé.

Les techniques de prélèvement pour olfactométrie en ligne ou en différé s'appliquent au cas des atmosphères odorantes provenant de sources canalisées. Certaines sources diffuses sont canalisables (selon la norme NF X 43-104- annexe A) de manière à permettre la réalisation d'un prélèvement représentatif du flux odorant rejeté à l'atmosphère. Dans le cas d'émissions odorantes surfaciques [Rognon et Pourtier, 2000], des mesures à la source visant à isoler une portion de surface émettrice avec une chambre à flux sont préconisées [Rognon et Pourtier, 2000]. Deux solutions sont proposées pour réaliser des prélèvements : l'emploi d'une chambre à flux de type cheminée simple ou avec vent contrôlé.

Mesures d'émissions odorantes à la mise en œuvre

La phase de collecte d'émissions odorantes a été réalisée sur la mini-planche en enrobé (§ 4.3.2) en même temps que celle qui consistait à évaluer les émissions gazeuses. La poche de prélèvement mise en place pour échantillonner les HAP a aussi été utilisée pour la caractérisation des odeurs.

4.6. CONCLUSIONS

La collecte de données environnementales a été réalisée simultanément ou en différé sur différents sites et différents procédés, en vue d'obtenir des valeurs de consommations (matériaux, énergies) et d'émissions (gazeuses, liquides, solides) utilisables dans la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie.

Pour certains procédés, les données collectées sont directement utilisables dans un Inventaire de Cycle de Vie, car elles correspondent à un flux massique exprimable simplement en fonction de l'unité fonctionnelle. Pour d'autres procédés, les données collectées ne sont pas directement utilisables, pour différentes raisons et une étape de transformation est nécessaire avant la réalisation de l'inventaire de cycle de vie fondé sur les flux.

Enfin, hormis quelques valeurs expérimentales erronées, l'ensemble des mesures prévues a été réalisé.