

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Septembre 2013

Édition scientifique



anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs

Avis de l'Anses
Rapport d'expertise collective

Septembre 2013

Édition scientifique

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 3 septembre 2013

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à l'« Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs »

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont rendus publics.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

L'Anses a été saisie, en date du 19 novembre 2008, par la Fédération nationale des salariés de la construction - Confédération générale du travail (FNSC-CGT) afin de synthétiser les enquêtes menées sur les produits utilisés pour la réalisation des routes et d'évaluer les risques sanitaires sur l'Homme. Cette demande a été étendue par l'Anses, à tous les secteurs d'activité concernés par l'utilisation de ce type de matériau, en réalisant une évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs.

Les bitumes sont des résidus de raffinage du pétrole utilisés principalement pour les travaux routiers. Le bitume constitue l'ingrédient principal voire exclusif d'un liant, la partie continue qui assure la cohésion d'un revêtement (routier, d'étanchéité de toiture, etc.). Cette fonction de liant était aussi assurée par l'emploi de goudrons et autres produits issus de la houille qui ont été progressivement remplacés par les bitumes, et ne sont, d'après les industriels, plus utilisés en France depuis les années 2000.

La consommation moyenne annuelle française de bitume est estimée à plus de 3 millions de tonnes (entre 2000 et 2010), avec une part de plus de 90 % consacrée aux applications routières (majoritairement l'entretien des voies existantes), les 10 % restant concernant les applications industrielles (activités d'étanchéité et d'isolation).

Les domaines d'activités impliquant ce matériau comptent de nombreuses professions et emploient un nombre important de travailleurs. Dès lors, les acteurs industriels et ceux de la prévention sont attentifs aux impacts d'une exposition professionnelle aux produits bitumineux et à leurs additifs sur la santé des travailleurs. Certains signaux d'alerte observés récemment ont amené les représentants de la FNSC-CGT à prendre l'initiative de porter ce sujet à l'attention de l'Anses.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) ».

L'expertise relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux substances chimiques ». L'Anses a confié l'expertise à un groupe de travail *ad hoc*. Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires et ont été présentés régulièrement aux CES entre le 23 septembre 2010 et le 27 juin 2013, tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Ils ont été adoptés par le CES « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » réuni le 27 juin 2013. Le rapport produit par le groupe de travail tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

L'instruction s'est également appuyée sur les compétences de différentes unités de l'Anses : évaluation des dangers et des risques des substances, observatoire des substances et de leur substitution, REACH¹-CLP² ainsi que la mission du réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P).

Les travaux du groupe de travail de l'Anses sont basés sur une analyse critique de la littérature visant à dresser un état de l'art sur (i) la nature des composés contenus dans et émis par les produits bitumineux et leurs additifs au cours des différentes opérations de mise en œuvre, (ii) les données d'exposition des travailleurs à ces produits et (iii) les effets sanitaires associés. Ils ont porté en priorité sur la construction et l'entretien des routes en France, y compris en atmosphère confinée (tunnels, parkings souterrains, etc.). En parallèle, un focus a été réalisé sur les activités d'étanchéité dans le secteur du Bâtiment et des travaux publics (BTP).

L'Anses a été invitée, en tant qu'organisme représentatif, à assister aux travaux d'évaluation et aux délibérations du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) sur *le risque cancérigène pour l'Homme lié aux bitumes, à leurs fumées, et à quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)*, du 11 au 18 octobre 2011, dans le cadre de la réalisation de la monographie 103.

De septembre 2011 à avril 2012, l'Agence a procédé à de nombreuses auditions d'acteurs industriels (l'union des syndicats de l'industrie routière française (USIRF), l'association européenne des producteurs de bitumes (Eurobitume), la Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité (CSFE), et l'office des asphaltes), syndicaux (FNSC-CGT), médicaux et de prévention (La Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail (CARSAT) des Pays de Loire, la médecine du travail du secteur du bâtiment et des travaux publics, la faculté de médecine et santé au travail de Grenoble) ou encore techniques (l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFFSTAR)).

Par ailleurs, les visites d'une centrale d'enrobage et de trois chantiers ont été organisées afin de visualiser les conditions pratiques liées à ces activités.

Enfin, plusieurs conventions de recherche et de développement (CRD) ont été contractées dans le cadre de ces travaux :

- Avec l'Institut universitaire romand de Santé au Travail (IST) afin d'étudier l'interaction des HAP du bitume et des ultra-violets (UV) sur la peau humaine et le risque de cancer de la peau. Les résultats intermédiaires de cette étude ont été transmis en mai 2013.

¹ Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances.

² Règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) n° 1907/2006.

- Avec le centre hospitalo-universitaire (CHU) de Grenoble afin d'évaluer les niveaux actuels (atmosphériques et biologiques) d'exposition professionnelle aux HAP pendant la production et l'application des bitumes (routes et toitures) puis de comparer ces niveaux aux données plus anciennes publiées dans la littérature. Les résultats de cette étude réalisée en France, rendus en mai 2013, ont permis de compléter les données d'exposition atmosphériques et biologiques recensées dans le rapport d'expertise collective.

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DU CES

■ Résultat de l'expertise collective

- *Complexité de composition des liants bitumineux et de leurs émissions*

En tant que résidus de distillation, les bitumes sont des mélanges de composés chimiques nombreux et variés. Selon le brut d'origine et le procédé de fabrication employés, plusieurs types de bitumes aux propriétés différentes peuvent être obtenus. Ainsi, le soufflage d'air chaud dans le bitume permet une augmentation de sa dureté (bitume oxydé ou soufflé), la viscosité peut être diminuée par ajout de dérivés légers, appelés fluxants (bitumes fluxés), ou encore par emploi d'émulsions aqueuses, et la résistance mécanique améliorée par ajout de divers polymères (bitume modifié, bitume polymère).

Les bitumes présentent des propriétés d'adhésivité, de cohésion et un caractère hydrophobe qui en font un matériau idéal pour la fabrication, notamment, des revêtements routiers. Pour obtenir les propriétés physico-chimiques et mécaniques requises pour ce liant (stabilité, adhérence, durabilité, maniabilité, résistance chimique, etc.), il est parfois nécessaire d'ajouter au bitume un ou plusieurs additifs (fluxants pétroliers ou agrochimiques, dopes d'adhésivité, métaux et agents captant le sulfure d'hydrogène, polymères, fibres, émulsifiants, etc.) dans des proportions souvent faibles par rapport aux bitumes (moins de 1 % du liant). Les compositions précises de chaque formulation restent des données confidentielles et sont ajustées en fonction du revêtement souhaité. La formulation et la mise en œuvre de ce matériau sont très variées, et en constante évolution.

Dans le domaine de la construction et de l'entretien des routes, les bitumes sont classiquement mis en œuvre suivant 3 grandes techniques : les enrobés bitumineux, les enduits superficiels et l'asphaltage. Le secteur de l'étanchéité des toitures/terrasses implique également l'utilisation de produits bitumineux (matériaux isolants à base de bitume, procédés de collage au bitume, etc.). Ces différentes utilisations peuvent induire une exposition directe des travailleurs aux produits bitumineux mais surtout à leurs émissions lorsqu'ils sont chauffés pour leur manipulation. Les émissions ainsi générées varient grandement selon le procédé de mise en œuvre, la nature des produits utilisés ainsi que le type de travail effectué. Elles sont composées de particules en suspension dans l'air contenant des molécules organiques peu volatiles, de vapeurs contenant des molécules organiques plus volatiles et de gaz tels que le sulfure d'hydrogène.

La composition des liants bitumineux et de leurs émissions est par conséquent *de facto* très complexe ; l'identification et la quantification des composés présents dans les produits bitumineux sont techniquement très difficiles et ne sauraient être exhaustives. De nombreux composés aromatiques polycycliques (CAP) sont présents dans les liants bitumineux et leurs émissions. Parmi ces CAP, une attention particulière a longtemps été portée par la communauté scientifique sur les 16 HAP prioritaires définis par l'Agence américaine de protection de l'environnement (United States Environmental Protection Agency -US EPA) dont le benzo[a]pyrène (B[a]P), considérés historiquement comme représentatifs du danger cancérigène de ces liants et de leurs émissions. Les HAP

contenus dans les bitumes sont dans des ordres de concentration 1000 à 10 000 fois inférieurs à ceux mesurés dans les goudrons. Depuis les années 50, la disparition progressive de l'utilisation des produits dérivés de la houille (goudrons, brais et huiles) au profit des produits bitumineux a ainsi entraîné une diminution conséquente des émissions de HAP et notamment de B[a]P. Parmi les autres CAP identifiés dans ces produits, certains commencent à être étudiés tels que les HAP soufrés et méthylés. D'autres composés organiques volatils (COV) ou semi-volatils (COSV) reconnus pour leurs effets sanitaires délétères ont également été identifiés dans les bitumes et leurs émissions.

Compte tenu du nombre important de composés présents dans les bitumes et leurs émissions, lesquels n'ayant pour la plupart pas été identifiés, il n'est pas possible d'établir un profil type de composition. Ainsi, il n'est pas pertinent, en l'état actuel des connaissances, de caractériser les effets sanitaires d'une exposition à un tel mélange *via* une approche substance par substance. En conséquence, les experts ont réalisé l'évaluation des dangers et des risques sanitaires liés à la manipulation des produits bitumineux *via* une analyse des données disponibles dans la littérature considérant la substance « bitume » dans sa globalité.

- *Effets sanitaires liés à une exposition aux liants bitumineux et à leurs émissions*

Concernant les effets non cancérogènes, plusieurs études chez l'Homme ont décrit des effets aigus d'irritation oculaire et respiratoires liés à une exposition aux fumées de bitumes.

Des effets respiratoires liés à une exposition chronique ont été rapportés dans les études épidémiologiques chez les travailleurs de la construction routière : augmentation significative des risques d'asthme et de broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), augmentation des marqueurs inflammatoires au niveau pulmonaire. Une association significative entre l'exposition au B[a]P (évaluée en concentration atmosphérique cumulée sur un an) et une mortalité par pathologies respiratoires a été mise en évidence par l'étude de cohorte multicentrique européenne. Les études expérimentales, bien que manquant d'homogénéité quant aux conditions mises en œuvre (substances bitumineuses testées, doses utilisées, protocoles d'exposition, etc.) ou aux paramètres physiologiques étudiés, permettent néanmoins de confirmer que l'exposition aux émissions de bitumes peut être à l'origine d'effets délétères respiratoires. D'autres effets chroniques cardiovasculaires et immunotoxiques sont par ailleurs suspectés.

Concernant les effets cancérogènes, les experts ont fondé leur analyse sur les conclusions du CIRC. Le CIRC a récemment actualisé sa monographie concernant la cancérogénicité de l'exposition des travailleurs de différents groupes professionnels aux émissions de bitumes. L'exposition des travailleurs aux bitumes oxydés et leurs émissions lors de la *pose de produits d'étanchéité* a été classée par le CIRC en catégorie 2A, cancérogène probable. Il est à noter que, d'après les auditions menées auprès de la CSFE dans le cadre de l'instruction de la saisine, les travailleurs n'utilisent plus *a priori* ce type de produits en France actuellement. Les expositions des professionnels aux produits bitumineux et leurs émissions lors de la *pose d'enrobés* à base de bitumes routiers ou lors de l'*asphaltage* à base de bitumes durs ont été classées par le CIRC en catégorie 2B, cancérogène possible. Une association positive a été observée entre les expositions professionnelles aux liants bitumineux et à leurs émissions, et l'apparition de cancers du poumon et des voies aérodigestives supérieures (cavité buccale, pharynx, œsophage et larynx) chez les travailleurs lors de la pose de produits d'étanchéité ou lors de l'asphaltage.

Pour les effets cutanés, il existe peu de données concernant les effets non cancérogènes et aucune étude spécifique sur les cancers cutanés en lien avec des expositions aux liants bitumineux n'a été recensée. Si plusieurs études épidémiologiques présentent des données relatives aux cancers cutanés, aucune n'a mis en évidence

d'association statistiquement significative entre l'apparition de cancers chez les travailleurs et l'exposition aux émissions de bitumes. Cependant, il s'agit principalement d'études de mortalité, inadaptées pour évaluer le taux d'incidence de ce type de cancers souvent curables et sans pronostic létal (hors mélanomes). Il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'évaluer les effets conjugués liés à une co-exposition aux émissions de bitumes et aux rayonnements UV compte tenu de l'absence de données.

Aucune donnée toxicologique ne permet à l'heure actuelle d'estimer une relation dose-réponse entre les niveaux d'exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions, et les effets sanitaires décrits.

- *Evaluation des expositions - Effectifs concernés*

Aucune donnée consolidée n'a pu être recensée afin d'évaluer précisément le nombre de travailleurs exposés ou susceptibles de l'être aux liants bitumineux et à leurs émissions en France. Les chiffres varient considérablement pour le secteur de l'industrie de la construction et de l'entretien des routes (5000 d'après l'USIRF et 85000 d'après la FNESC-CGT). D'après la CSFE, 7000 à 8000 personnes actives du secteur de l'étanchéité des toitures/terrasses seraient concernées par une utilisation de produits d'étanchéité à base de bitumes (sans forcément les manipuler). L'exposition potentielle aux émissions de bitumes a lieu pendant le temps de soudage (au maximum 30 % du temps de travail).

- *Evaluation des expositions - Limites de la métrologie*

L'exposition des travailleurs aux liants bitumineux et à leurs émissions implique les voies :

- respiratoire, par inhalation des émissions ;
- cutanée, par contact direct avec les produits, par dépôt des émissions sur la peau ou par contact éventuel avec les vêtements souillés ;
- orale, via l'ingestion de produits ou de leurs émissions (contact main-bouche, notamment).

Les experts ont identifié de nombreuses limites à l'évaluation des expositions des travailleurs liées notamment à la métrologie atmosphérique ainsi qu'à la métrologie cutanée :

- Les méthodes de mesure atmosphérique actuellement disponibles sont multiples et ne font l'objet d'aucun consensus au niveau international. Deux stratégies d'analyse ont été développées par les hygiénistes pour évaluer l'exposition atmosphérique des travailleurs aux émissions de bitumes : l'une dite globale (concernant la quantité de fumées totales) et l'autre dite spécifique (concernant des composés individualisés). Ces deux stratégies apportent des informations incomplètes mais complémentaires pour l'évaluation de l'exposition totale aux émissions de bitumes.
- Peu de résultats exploitables permettent d'appréhender la part de l'exposition par voie cutanée.
- Afin d'appréhender l'exposition des travailleurs aux émissions de bitumes en intégrant toutes les sources ainsi que toutes les voies d'exposition dans l'organisme (en particulier les voies cutanée et orale), la surveillance biologique constitue une approche intéressante. La plupart des études sur le sujet sont centrées sur le dosage des métabolites des HAP, et peu d'entre elles ont mesuré à la fois ces métabolites et des marqueurs de toxicité. Aucune relation dose-effet n'a pu être mise en évidence pour les métabolites analysés.

- *Evaluation des expositions – Exploitation des données métrologiques*

D'une manière générale, les données d'exposition atmosphérique relevées dans la littérature sont parcellaires et la plupart du temps non représentatives des postes de travail. Les données de suivi des expositions des travailleurs aux produits bitumineux et à leurs émissions recensées à travers ces travaux d'expertise sont centrées sur les HAP.

Des résultats de campagnes de mesures des 16 HAP classés polluants prioritaires par l'US-EPA ont été recensés dans la littérature. Cependant, ces mesures sont difficilement comparables entre elles, car les bitumes, les conditions climatiques (vitesse du vent, humidité, etc.), la localisation des chantiers, les moyens de prélèvement ainsi que les techniques analytiques divergent. Une constante est néanmoins identifiable : il ressort de toutes ces études que parmi ces 16 HAP, les composés à 2 ou 3 cycles (en particulier le naphthalène) sont majoritairement présents par rapport aux composés à 5 ou 6 cycles. En effet, ces derniers, dont le B[a]P et le dibenzo[a,h]anthracène présentent des niveaux moyens de concentration de l'ordre du ng.m^{-3} alors que ceux de composés plus légers comme le naphthalène ou le fluorène dépassent régulièrement le ng.m^{-3} .

Les bases de données COLCHIC (Institut national de recherche et de sécurité - INRS) et CIMAROUT (USIRF) ont été interrogées. Ces bases regroupent les résultats d'études d'exposition des travailleurs pour différents paramètres mesurés dans le cadre de suivis professionnels. Il s'agit entre autres des concentrations atmosphériques de HAP (B[a]P, pyrène, etc.), des poussières totales, des poussières inhalables, des poussières alvéolaires, de la fraction soluble dans le dichlorométhane, des concentrations urinaires des métabolites de certains HAP (1-hydroxypyrene, 3-hydroxybenzo[a]pyrene, etc.). Le nombre de prélèvements est insuffisant pour permettre une analyse quantitative et représentative de l'exposition que ce soit par secteurs d'activité, par familles de tâches, par postes ou encore par types de liant. L'exploitation des données extraites de ces bases a donc été strictement qualitative. Les valeurs de B[a]P relevées sont largement inférieures (en moyenne 5 ng.m^{-3}) à la valeur recommandée par la Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (150 ng.m^{-3}) pour les deux périodes étudiées (1986-2000 et 2001-2011), avec des maxima beaucoup plus faibles pour la période de 2001 à 2011 par rapport à la période 1986 à 2000.

En revanche, malgré l'identification dans les émissions de produits bitumineux de nombreux autres composés de diverses familles telles les HAP soufrés ou azotés, les COV et COSV, les hydrocarbures aliphatiques et les additifs, les expositions des travailleurs à ces émissions restent à ce jour peu ou pas documentées.

- *Caractérisation des expositions potentielles – Approche comparative*

Afin de réaliser une comparaison de l'exposition des travailleurs aux différents postes de travail identifiés selon les procédés de mise en œuvre des produits bitumineux, une matrice a été construite. A cet effet, les experts se sont attachés à recenser les paramètres qui semblent, d'après les résultats de l'expertise, être les plus influents. Parmi les paramètres identifiés, seuls 4 paramètres ont été retenus par les experts : la distance du travailleur par rapport à la source des émissions, la température d'application des produits, le débit ventilatoire du travailleur et la durée-fréquence d'exposition des travailleurs. Pour chaque couple procédé/poste de travail, des notes ont été attribuées à chacun de ces 4 paramètres suivant un jugement d'experts basé sur les informations disponibles. Cette matrice, dont la valeur est indicative, permet de comparer entre eux les différents postes pour un même procédé de mise en œuvre. D'autres paramètres influant sur les expositions, parfois même de manière prépondérante, ont été identifiés (la nature des produits bitumineux utilisés, les technologies mises en œuvre, les conditions météorologiques, etc.) mais n'ont pas pu être pris en compte étant donné leur variabilité et la difficulté à estimer leur contribution relative.

Cette analyse comparative des différents postes de travail a permis de faire ressortir, par grand type de procédé, certaines fonctions de travail dont les niveaux d'exposition semblent *a priori* être les plus importants :

- Chez les travailleurs de la pose d'enrobés, la manipulation d'enrobés à chaud dans les postes de conducteur de finisseur, de tireur au râteau et de régleur, apparaissent comme les activités les plus exposantes. Certains équipements des machines tels les cabines ventilées d'isolation du conducteur ou encore la mise en place de systèmes de captage des fumées permettent de diminuer les expositions pour le conducteur de finisseur.
- Chez les travailleurs chargés de l'application des enduits superficiels d'usure (ESU), les postes de gravillonneur, qui règle l'inclinaison de la benne verseuse de granulats, et d'opérateur-lance, chargé d'appliquer l'enduit à l'aide d'une lance manuelle aux endroits difficilement accessibles pour la répandeuse, seraient les postes les plus exposés, notamment dans le cas de l'utilisation de liants anhydres dont les températures d'utilisation sont supérieures à celles des émulsions.
- Chez les applicateurs de l'asphalte coulé, les postes d'aide asphaltteur, d'asphaltteur et de régleur finisseur seraient les plus exposés, quelle que soit la nature du liant mis en œuvre, du fait des températures élevées d'application qui génèrent une production importante de fumées et de la proximité de ces postes avec la source des émissions.
- Chez les travailleurs de l'étanchéité, les postes d'étancheur et d'aide étancheur utilisant la méthode de collage au bitume oxydé fondu représenteraient les postes les plus exposés.
- Chez les travailleurs affiliés aux travaux de petit entretien ou de réparation, le brouetteur et le ratisseur d'enrobés à chaud ainsi que le préparateur de fissure sembleraient être les postes les plus exposés.

■ Conclusions de l'expertise collective

En l'état actuel des connaissances, une démarche d'évaluation quantitative des risques sanitaires n'est pas réalisable. Le manque de données concernant la caractérisation du danger et la complexité du mélange constituent en effet un frein à cette démarche. Par ailleurs, les connaissances quantitatives disponibles liées à l'exposition ont été centrées principalement sur un indicateur relevant de la famille des HAP dont la pertinence a été discutée au cours de cette expertise. Le Health Council of the Netherlands a essayé en 2007 de calculer l'excès de risque de cancer du poumon lié à des expositions professionnelles au B[a]P à partir d'études menées spécifiquement chez les travailleurs du bitume, mais compte tenu du manque d'informations et des facteurs confondants, cette quantification n'a pu aboutir. Ainsi, les experts se sont attachés à mettre en perspective les données sanitaires dans une démarche qualitative globale d'évaluation des risques sanitaires, avec un recensement et une analyse des données d'exposition en considérant les postes de travail.

Parmi les composés identifiés dans les bitumes et leurs émissions, certains sont classés cancérigènes par le CIRC et/ou classés comme substances cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques (CMR) et/ou dangereuses par l'Union Européenne. Le CIRC a par ailleurs récemment classé l'exposition aux bitumes oxydés et à leurs émissions lors des *travaux d'étanchéité* comme cancérigène probable pour l'Homme (catégorie 2A) et l'exposition aux bitumes et leurs émissions lors de la *pose d'enrobés* et/ou lors de *travaux d'asphaltage* comme cancérigène possible (catégorie 2B). Au-delà du potentiel cancérigène des produits bitumineux et de leurs émissions, les études épidémiologiques ont mis en évidence l'existence d'effets respiratoires liés à une exposition des travailleurs. Des effets cardiovasculaires et immunotoxiques sont également suspectés.

Cependant, d'un point de vue réglementaire, il n'existe pas de classification harmonisée au niveau européen pour les substances bitumineuses, et dans chacun des dossiers d'enregistrement REACH disponibles en ligne sur le site de l'Agence européenne des produits chimiques (European Chemicals Agency – ECHA), aucune substance enregistrée n'a été classée dangereuse par le déclarant sur la base des critères tels que décrits par le règlement CLP. En revanche, l'inventaire des classifications de l'ECHA indique que plusieurs industriels ont classé certaines des substances considérées comme dangereuses.

Les données disponibles liées à l'exposition ont été principalement centrées sur les HAP dont certains sont reconnus pour leur caractère cancérigène. Les niveaux d'exposition des travailleurs aux HAP ont diminué ces dernières années notamment en lien avec la disparition de l'utilisation du goudron ainsi qu'avec l'évolution des techniques de mise en œuvre. Si les concentrations atmosphériques de B[a]P actuellement mesurées sur certains chantiers se situent quasiment au niveau du bruit de fond environnemental, certaines situations peuvent encore générer des émissions conséquentes de HAP (tunnel, rabotage et recyclage, utilisation de fluxants houillers ou pétrochimiques non recommandés). Par ailleurs, les travailleurs sont également exposés aux autres composés émis lors de la mise en œuvre des produits bitumineux tels les dérivés méthylés de HAP, les HAP hétérocycliques soufrés (S-HAP), les dérivés azotés de HAP (N-HAP) ainsi que les COV, les COSV et les composés organiques non volatils (CONV) dont les niveaux d'exposition sont à ce jour peu ou pas documentés.

Ainsi, le B[a]P historiquement mesuré ne semble plus être aujourd'hui le seul traceur pertinent du risque cancérigène. Pour les experts, il est sans doute nécessaire de maintenir le suivi de ce traceur, pour des questions de comparaison internationale, de référentiel historique et de niveaux encore élevés mesurés sur certains chantiers (en

milieu confiné ou lors de réfections/recyclages d'anciennes chaussées). Néanmoins, il paraît indispensable d'élargir les recherches et le suivi à d'autres traceurs, notamment pour prendre en compte les effets non cancérogènes et ainsi mieux appréhender le risque sanitaire.

L'analyse comparative des différents postes de travail, via l'exploitation des résultats de la matrice, a par ailleurs permis de faire ressortir, par grand type de procédé, certains postes pour lesquels les niveaux d'exposition semblent *a priori* être les plus importants. Il est également à noter que la température a un impact fort sur l'émission de fumée.

La tendance générale actuelle dans l'évolution des pratiques professionnelles est à la diminution des températures d'application des produits bitumineux. Ces pratiques émergentes permettraient de réduire l'exposition des travailleurs lors de l'application de ces produits en limitant la génération d'émissions. Néanmoins, ces diminutions d'exposition ne peuvent être corrélées directement avec une réduction du risque encouru par les travailleurs. En effet, pour compenser une partie des effets de cette baisse de température sur la maniabilité de la préparation, plusieurs procédés de fabrication innovants ont été développés par les industriels : l'incorporation d'agents plastifiants (additifs organiques fluidifiants), le moussage, *etc.* Or, les impacts potentiels sur la composition des émissions générées et sur l'intensité de transfert percutané en cas de contact, donc sur la santé des travailleurs, ne sont pas connus.

En conclusion, les données recensées ont permis d'identifier des situations d'exposition dont les impacts sanitaires pour les travailleurs concernés doivent être pris en compte. Ainsi, au regard de l'ensemble de ces données, les experts ont finalement conclu à l'existence d'un risque sanitaire associé à une exposition aux liants bitumineux et à leurs émissions. Il n'est en revanche pas possible, en l'état actuel des connaissances, de quantifier ce risque.

Il est également à souligner que les travailleurs sont exposés à d'autres facteurs de risque non étudiés dans le cadre de la saisine et potentiellement responsables d'effets sanitaires, parmi lesquels les rayonnements UV, la co-exposition avec des particules (notamment d'émissions de moteur diesel), le contact avec des matériaux ou pièces chaudes pouvant occasionner des brûlures, la manutention de charges, la répétitivité des gestes, les postures pénibles, l'exposition aux vibrations, le lavage des mains avec des solvants dangereux (gasoil ou autres), le bruit, *etc.*

Les experts soulignent par ailleurs que si l'exposition des travailleurs par voie cutanée est encore peu considérée dans les études comparativement à la voie respiratoire, le contact des émissions avec la peau des travailleurs suivi d'une résorption cutanée constitue une voie d'exposition non négligeable. Se pose donc la question du risque lié à l'exposition par voie cutanée, notamment à des produits appliqués tièdes ou à froid, en particulier les émulsions (40-60°C), comprenant des tensioactifs susceptibles d'augmenter la perméation cutanée.

Afin d'évaluer l'exposition atmosphérique des travailleurs aux émissions de bitumes, les méthodes de mesure nécessitent le prélèvement systématique des deux fractions inhalables : particules et vapeurs. Les experts soulignent la difficulté d'interprétation liée à l'utilisation des deux stratégies d'analyse, globale et spécifique, isolément l'une de l'autre, et encouragent donc la mise en œuvre systématique de ces deux méthodes dans la caractérisation de l'exposition des travailleurs aux émissions de bitumes. En effet, l'approche globale non « qualitative » est pertinente puisqu'elle s'inscrit dans une démarche préventive de réduction des expositions alors que l'approche spécifique demeure indispensable dans une démarche d'investigation toxicologique.

Les experts attirent également l'attention sur les activités de rabotage et de recyclage. Lors de ces opérations effectuées sur d'anciens revêtements routiers, il existe différentes sources d'émission de substances reconnues pour leur dangerosité et présentes dans les matériaux en place, notamment l'amiante susceptible de libérer des fibres, la silice, mais aussi les goudrons et ses dérivés, les matériaux secondaires, les fluxants, les polymères, les additifs, les anciens bitumes soufrés susceptibles d'émettre des CAP ou des COV. Ces deux activités sont donc susceptibles d'exposer les travailleurs à des émissions potentiellement dangereuses et doivent faire l'objet d'une surveillance particulière et renforcée.

■ **Recommandations**

Les experts, au regard de l'ensemble des éléments portés à leur connaissance au cours de la réalisation de cette expertise collective, établissent les recommandations suivantes :

- Mise en œuvre d'une stratégie préventive

Les expositions professionnelles aux liants bitumineux et leurs émissions nécessitent l'organisation par l'employeur des moyens adéquats de prévention collective et individuelle.

En termes de prévention en santé au travail, il est d'ores et déjà nécessaire au vu des conclusions de l'expertise de réduire les expositions aux émissions de liants bitumineux et d'assurer un suivi médical approprié des travailleurs.

En termes de prévention collective

- Encourager la mise en place sur le chantier de systèmes d'aspiration des fumées et/ou de systèmes de ventilation adéquats lors de travaux en espace confiné (tunnels, sous-sols) et préconiser l'utilisation d'engins de chantier avec systèmes intégrés de captage de fumées.
- Sélectionner les produits (bitumes, additifs, etc.) et procédés d'application les moins exposants (au regard des connaissances disponibles) :
 - Respecter les consignes de température propres à l'utilisation de chaque produit bitumineux ;
 - Privilégier les émulsions de bitume permettant la réduction des fumées émises en travaillant « à froid » en dessous de 60°C. Privilégier les températures d'application d'asphalte les plus faibles (inférieures à 200°C) ;
 - Substituer les produits de nettoyage des outils et/ou des mains dangereux (par exemple les solvants de type gasoil) ;
 - Eviter de mettre en œuvre le procédé de collage au bitume oxydé fondu dans le cadre des travaux d'étanchéité et privilégier l'utilisation des membranes collées à froid (auto-adhésives).
- Adapter l'organisation du travail :
 - Décaler les horaires plus tôt l'été de manière à réduire l'impact de la chaleur et minimiser la co-exposition entre le rayonnement solaire et les produits bitumineux ;

- Evaluer la faisabilité et la pertinence d'un système de rotation des postes de travail permettant aux travailleurs d'alterner différentes tâches.

En termes de prévention individuelle

- Préconiser, afin d'éviter la contamination cutanée, un renouvellement des vêtements de travail et la prise de douche sur le lieu du chantier.
- Adapter le port des équipements de protection individuelle à la protection de la peau et de l'appareil respiratoire :
 - Vêtements de travail propres avec manches et jambes longues, port de visière ou lunettes, chapeau ou casque, *etc.* ;
 - Port de protection respiratoire en cas d'exposition potentiellement importante comme en milieu confiné ou lors des opérations de rabotage.

Concernant le suivi des travailleurs

- Lors de la surveillance médicale régulière des travailleurs exposés aux liants bitumineux, inclure la réalisation d'explorations fonctionnelles respiratoires et une surveillance dermatologique. Ceci implique une communication ciblée auprès des médecins du travail concernant ces éléments de surveillance complémentaires.
- Poursuivre et développer le suivi des expositions par métrologie et biométrologie afin d'assurer une traçabilité de l'exposition des travailleurs.
- Encourager une veille active sur les effets sanitaires respiratoires mais également cardiovasculaires, immunotoxiques, neurotoxiques, *etc.*, en lien avec une exposition des travailleurs aux liants bitumineux.

En termes de prévention au titre du risque chimique

→ Pour les fabricants de produits bitumineux

- Encourager la réflexion sur les effets respiratoires et une éventuelle classification de la substance « bitume » avec l'objectif de parvenir *in fine* à une harmonisation de sa classification par les acteurs concernés.
- Encourager la mise à disposition de fiches de données de sécurité (FDS) actualisées.

→ Pour les utilisateurs de produits bitumineux

- Informer les travailleurs du risque chimique lié à la manipulation des produits bitumineux et/ou de leurs additifs (dont certains sont des produits chimiques dangereux).
- Actualiser le document unique d'évaluation des risques au vu des données sanitaires récentes et encourager la mise à disposition par les industriels de fiches de données de sécurité (FDS) actualisées.

- Dans le cadre de l'élaboration du document unique d'évaluation des risques, l'employeur doit caractériser l'exposition des travailleurs aux émissions de liants bitumineux par la mise en œuvre en parallèle de deux approches :
 - Une approche globale d'une part, quantifiant les grandes classes de polluants présents dans les émissions (COV, poussières, etc.), pertinente dans le cadre d'une démarche comparative de prévention des risques. La méthode en cours de développement par l'INRS pourra s'avérer un outil utile dans cette optique ;
 - Une approche spécifique d'autre part, ciblée sur certains polluants bien identifiés (B[a]P, HAP, etc.), et utile dans une démarche de caractérisation des profils toxicologiques des liants bitumineux et de leurs émissions. Dans l'attente de nouveaux traceurs complémentaires, la mesure des HAP reste la référence actuelle. Néanmoins, il est d'ores et déjà possible d'avoir une approche multi-résidus.

→ *Pour les pouvoirs publics*

- Réfléchir à une éventuelle classification de la substance « bitume » au vu des données sanitaires récentes.

Concernant le rabotage et le recyclage

- Renforcer la réglementation sur les activités de rabotage et de recyclage des anciens revêtements routiers en préconisant :
 - La recherche obligatoire et systématique de certains composants du matériau en place (amiante³ et goudrons principalement) avant toute opération de rabotage ou de recyclage ;
 - Une surveillance accrue des possibles émissions générées lors de ces opérations.
 - Mise en œuvre d'actions de recherche et développement

En termes de développement d'outils métrologiques de suivi des expositions

- Mettre en place une harmonisation des méthodes globales de mesure des expositions (travaux INRS en cours ainsi qu'au niveau international).
- Développer, en parallèle du suivi des HAP de référence, un ou d'autre(s) traceur(s) spécifique(s) des émissions de liants bitumineux afin d'apprécier les risques cancérogènes. Les experts proposent en premier lieu l'exploration des composés suivants :
 - Hétérocycles soufrés (benzo[b]naphto[2,1,d]thiophène, etc.) ;
 - Hétérocycles azotés (carbazole, etc.) ;
 - Naphtalène (en tenant compte de la spécificité liée à la mesure de ce HAP par rapport aux autres) ;

³Cf Circulaire du 15 mai 2013 portant instruction sur la gestion des risques sanitaires liés à l'amiante dans le cas de travaux sur les enrobés amiantés du réseau routier national non concédé - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ; Ministère de l'égalité des territoires et du logement - NOR : TRAT1311107C, texte paru au Bulletin Officiel le 25 juin 2013.

- HAP méthylés (5-méthylchrysène, *etc.*).
- Développer la recherche de traceurs pour l'évaluation des effets non-cancérogènes.

En termes de mise en œuvre d'études

- Mettre en place des études épidémiologiques concernant les cancers cutanés en lien avec une exposition aux émissions de liants bitumineux ou à défaut proposer au CIRC une évaluation spécifique de ce cancer à partir de l'étude de cohorte multi centrique européenne.
- Poursuivre les recherches concernant l'exposition conjointe aux émissions de bitumes et aux rayonnements UV de la peau humaine et le risque de cancer.
- Mettre en place des actions de recherche sur la composition et la toxicité des liants bitumineux mis en œuvre, avec le maximum de transparence de la part des professionnels afin de pouvoir évaluer l'impact sanitaire de certaines formulations (bitumes polymères, enrobés tièdes, émulsions, *etc.*) et des différents grades de bitumes utilisés.
- Mettre en place des études en populations professionnelles exposées aux liants bitumineux, couplant des aspects de biosurveillance (évaluation de la dose interne d'exposition par l'analyse de matrices biologiques) à des biomarqueurs d'effets sur les mêmes individus.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail endosse les conclusions et recommandations des experts du CES « Evaluation des risques liés aux substances chimiques ».

L'Anses souligne que l'expertise a conclu à l'existence d'un risque sanitaire associé à une exposition aux liants bitumineux et à leurs émissions sans toutefois le quantifier en l'état actuel des connaissances.

Concernant les effets respiratoires, ils sont plus particulièrement décrits avec d'une part, des effets d'irritation respiratoire (irritations laryngées, pharyngées et toux) rapportés dans plusieurs études chez l'Homme en lien avec une exposition aiguë et d'autre part, un accroissement du risque de développer un asthme ou une BPCO et une augmentation des marqueurs pulmonaires d'inflammation, rapportés dans plusieurs études épidémiologiques pour une exposition chronique. Certaines études expérimentales confirment également l'apparition d'effets délétères respiratoires en lien avec une exposition aux émissions de bitumes. Ainsi, l'agence recommande d'évaluer la faisabilité de l'élaboration d'une proposition de classification harmonisée des bitumes selon les dispositions du règlement européen (CE) n° 1272/2008 « CLP ».

Concernant les effets cutanés, il existe peu de données concernant les effets non cancérogènes. Le contact de la peau avec les liants bitumineux peut provoquer une agression de type chimique. Dans une première phase, la réaction de la peau est non-immunologique, liée aux propriétés irritantes des produits considérés, puis dans un second temps peuvent apparaître des réactions de type allergique.

Une analyse spécifique de la littérature n'a pas montré d'association statistiquement significative entre l'apparition de cancers cutanés chez les travailleurs et l'exposition aux émissions de bitumes. Néanmoins, l'Anses souligne qu'il n'est pas possible, en l'état actuel des connaissances, de tirer des conclusions définitives concernant l'existence ou non d'un risque cancérogène cutané en lien avec ce type d'exposition et que des données complémentaires sur cette question sont nécessaires. Pour rappel, aucune étude

spécifique sur les cancers cutanés en lien avec des expositions aux liants bitumineux n'a été réalisée et les études épidémiologiques disponibles sont principalement des études de mortalité, inadaptées pour évaluer le taux d'incidence des cancers cutanés les plus fréquents, les carcinomes, qui s'avèrent dans la plupart des cas sans pronostic légal et curables avec un traitement adapté. Concernant le risque de développement du cancer cutané en lien avec une exposition simultanée de la peau humaine aux émissions du bitume et aux rayonnements UV, aucune donnée n'a été recensée dans la littérature. Les premiers résultats originaux au niveau international de travaux de recherche initiés avec l'IST de Lausanne, n'ont pas permis de conclure à l'heure actuelle. L'Anses encourage le développement d'actions de recherche sur cette question.

Enfin, l'Anses souhaite également rappeler l'importance de la mise en place d'une surveillance étroite des émissions potentiellement dangereuses générées lors des opérations de recyclage et de rabotage des anciens revêtements routiers. Il s'agit en effet d'une problématique nationale émergente puisque dans le contexte économique actuel et dans une logique de réduction des coûts, la majorité des travaux routiers concernent aujourd'hui la rénovation et l'entretien du réseau existant.

Le directeur général

Marc Mortureux

MOTS-CLES

Bitumes, composition, danger, risque, exposition, additifs, recyclage, effets, respiratoire, émissions.

Évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs

Saisine « 2008-SA-0410 »

RAPPORT d'expertise collective

« Comité d'experts spécialisé en évaluation des risques liés aux substances chimiques »

« Groupe de travail : Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs »

Août 2013

Mots clés

Bitumes, composition, danger, risque, exposition, additifs, recyclage, effets, respiratoire, émissions.

Présentation des intervenants

PREAMBULE : Les experts externes, membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

GROUPE DE TRAVAIL

Président

M. Damien BOURGEOIS – Chargé de Recherche – Institut de Chimie Séparative de Marcoule - CNRS, compétent en chimie organique et physico-chimie.

Membres

Mme Isabelle STÜCKER – Directeur de recherche à l'Inserm, compétente en épidémiologie.

M. Michel LAFONTAINE – Retraité de l'INRS, compétent en santé au travail, évaluation des risques sanitaires, surveillance et méthodes d'analyse.

M. Jean-Pierre CESARINI – Docteur en Médecine / Anatomo-pathologiste, compétent en cancérologie cutanée - Retraité de l'Inserm.

M. Cong Khanh HUYNH – Docteur es Sciences - Ingénieur chimiste - Institut universitaire romand de Santé au Travail, compétent en évaluation des risques sanitaires, surveillance et méthodes d'analyse, analyse des risques.

M. Guillaume GARÇON – Professeur des Universités en toxicologie à l'Université de Lille 2, compétent en toxicologie chez l'homme et l'animal, évaluation des risques sanitaires, surveillance et méthodes d'analyse.

M. Brice APPENZELLER – Responsable de laboratoire au centre de recherche public en santé (Luxembourg), compétent en santé publique, évaluation des expositions, modélisation toxicologique et toxicologie chez l'homme, surveillance et méthodes d'analyse.

M. Henri SCHROEDER – Enseignant chercheur / Pharmacien – URAFPA, INRA USC 340, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Lorraine, compétent en sécurité sanitaire, neurotoxicologie, toxicologie chez l'animal et modélisation toxicologique.

M. Benjamin SUTTER – Responsable d'études à l'INRS, compétent en santé au travail, chimie organique, surveillance et méthodes d'analyse, génie des procédés.

COMITE D'EXPERTS SPECIALISE

- CES « Évaluation des risques liés aux substances chimiques » - 23 septembre 2010, 9 décembre 2010, 19 janvier 2012, 28 juin 2012, 20 septembre 2012, 28 mars 2013, 16 mai 2013 et 27 juin 2013.

Président

M. Michel GUERBET – Professeur de toxicologie à l'UFR médecine pharmacie de Rouen - Pharmacien toxicologue

Vice-président

Mme Béatrice SECRETAN-LAUBY – Docteur en toxicologie, Scientifique pour monographies su CIRC – groupe IMO, CIRC/ OMS

Membres

M. Luc BELZUNCES – Directeur de Recherche - Laboratoire de Toxicologie Environnementale, UR 406 A&E, INRA

Mme Nathalie BONVALLOT – Enseignant chercheur en toxicologie – EHESP Sorbonne Paris Cité, IRSET, INSERM. Démission en mars 2011

M. Damien BOURGEOIS – Chargé de Recherche – Institut de Chimie Séparative de Marcoule - CNRS

Mme Corinne CASSIER-CHAUVAT – Directrice de Recherche DR2 CNRS – iBiTecS/SBIGeM/LBI, unité mixte CEA-CNRS URA 2096

Mme Anne CHEVALIER – épidémiologiste retraitée - InVS

M. Pascal EMPEREUR-BISSONNET - Médecin, responsable de l'unité « Populations, Risques, Territoires » - Département Santé Environnement, InVS

Mme Brigitte ENRIQUEZ – Enseignant chercheur (Pr) Pharmacie – toxicologie / Responsable de la pharmacie centrale – Unité de Pharmacie Toxicologie, ENVA

Mme Dominique GUENOT – Chargée de recherche - CNRS

M. Cong Khanh HUYNH – Docteur es Sciences - Ingénieur chimiste – Institut universitaire romand de Santé au Travail

M. Kannan KRISHNAN – Professeur, enseignant chercheur - Santé publique et Toxicologie - Département de Santé environnementale et de santé au travail, Université de Montréal

M. Dominique LAFON – Médecin toxicologue, pilote de la thématique reproduction et travail – INRS

Mme Dominique LAGADIC-GOSSMANN – Directrice de Recherche CNRS – EA 4427 SeRAIC / IRSET, Université Rennes 1

Mme Annie LAUDET - Pharmacien toxicologue retraitée – INRS

Mme Florence MÉNÉTRIER – Responsable de l'unité Prositon / Pharmacien – DSV/Prositon, CEA

M. Fabrice MICHIELS – Médecin du travail, toxicologue – Service de santé des armées

Mme Odette PRAT - Chercheur Biologiste Toxicologue / Responsable Toxicogénomique - Institut de Biologie Environnementale et de Biotechnologie / DSV/ CEA

M. Henri SCHROEDER – Enseignant chercheur / Pharmacien – URAFPA, INRA USC 340, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Lorraine, compétent en sécurité sanitaire, neurotoxicologie, toxicologie chez l'animal et modélisation toxicologique.

Mme Sylvie TISSOT – Vétérinaire Toxicologue/Responsable de l'unité ETSC – INERIS. Démission en mars 2011.

PARTICIPATION ANSES

Coordination scientifique

Mme. Clémence FOURNEAU – Chargée de projet scientifique dans l'unité d'évaluation des risques liés à l'air - DER.

M. Guillaume BOURDEL – Chef de projet scientifique dans l'unité d'évaluation des risques liés à l'air - DER.

M. Guillaume BOULANGER – Adjoint au chef de l'unité d'évaluation des risques liés à l'air - DER.

Contribution scientifique

Mme Eléna NERRIERE-CATELINOIS – Chef de projet scientifique à la mission du réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles - DER.

Mme Marie-Laure COINTOT – Chargée de projet scientifique dans l'unité d'évaluation des risques liés aux substances - DER.

M. Geoffrey ARGILES – Chargé de projets scientifiques dans l'unité « observatoire des substances et de leur substitution » - DER.

Secrétariat administratif

Mme Sophia SADDOKI – DER.

AUDITION DE PERSONNALITES EXTERIEURES

CARSAT des pays de Loire

M. Jean-François CERTIN – Ingénieur de prévention à la CARSAT des pays de la Loire.

Médecine du travail de l'OPPBT

Mme Chantal VERHELST – Médecin du travail.

CGT FNSC

M. Frédéric MAU - Président du Comité Technique Régional 2 (CTR2) à la CARSAT de Bretagne.

M. Laurent ORLICH - Responsable en charge du secteur fédéral de la santé au travail.

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées CETE Méditerranée

Mme Virginie MOUILLET – Directrice de Recherche / Adjointe au Chef du Service Chimie.

IFFSTAR - Centre de Nantes, Département Matériaux / Groupe MIT

M. Vincent GAUDEFROY – Chargé de Recherche.

Faculté de Médecine de Grenoble, Equipe EPSP-Labo. TIMC, Médecine et Santé au Travail,

Mme Anne MAITRE – Toxicologie Professionnelle et Environnementale, Equipe EPSP, Laboratoire TIMC (UMR CNRS 5525), UJF, CHU de Grenoble.

USIRF - Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française

M. Jean-Louis MARCHAND – Président de l'USIRF.

M. Jean-Baptiste DE PREMARE – Délégué général de l'USIRF.

M. Henri MOLLERON – Directeur Environnement du Groupe Colas et représentant de l'USIRF au comité HSE de l'EAPA (European Asphalt Pavement Association).

M. Bernard HERITIER – Directeur technique du Groupe Eiffage Travaux Publics et membre de la Section des Techniques Routières de l'USIRF.

M. Michel MAZE – Directeur du laboratoire de recherche d'Eurovia.

M. Georges BALAVOINE – Expert du Comité Santé Sécurité de l'USIRF, ancien directeur de la Prévention du Groupe Eurovia.

Eurobitume

M. Philippe DEWEZ – Président directeur général - Eurobitume.

M. Bernard ANSELMINI – Président du Groupement Professionnel des Bitumes (GPB).

M. Anthony RILEY – Senior Technology Advisor, Toxicology & Product Stewardship - BP Downstream Product Stewardship.

M. Mathieu VAISSIERE – Toxicologue - TOTAL RM HSE.

M. Jan URBANUS – Senior Industrial Hygienist - SHELL.

M. Mike SOUTHERN – Directeur technique - Eurobitume.

Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité (CSFE)

M. Philippe DRIAT – Délégué général de la Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité.

M. Bruno FABVIER – Directeur Recherche et développement groupe - Société SIPLAST/ICOPAL.

M. Henri DESGOUILLES – Directeur technique - Société SOPREMA.

Office des asphaltes

M. Henri MOLLERON – Directeur Environnement du Groupe Colas et représentant de l'USIRF au comité HSE de l'EAPA (European Asphalt Pavement Association).

M. Georges BALAVOINE – Expert du Comité Santé Sécurité de l'USIRF, ancien directeur de la Prévention du Groupe Eurovia.

M. Jean Pierre DEAN - Directeur technique pour SMAC, entreprise adhérente à l'office des asphaltes.

M. Franck BOURCY - Président de l'Office des asphaltes et directeur régional pour SMAC région Ile-de-France, Nord, Normandie.

M. Julien BUISSON - Délégué général de l'Office des asphaltes.

M. Jean-Baptiste DE PREMARE – Délégué général de l'USIRF.

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Expertise collective – Synthèse et conclusions.....	11
Sigles et abréviations.....	23
Liste des tableaux	26
Liste des figures.....	29
1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine	31
1.1 Contexte.....	31
1.2 Objet de la saisine	31
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation	31
1.4 Champ d'expertise de l'étude.....	32
2 Définitions et historique	34
2.1 Base terminologique	34
2.1.1 Définition des liants hydrocarbonés.....	34
2.1.2 Confusions terminologiques	34
2.1.3 Les liants bitumineux naturels et pétroliers.....	35
2.1.4 Les goudrons et liants goudronneux.....	39
2.2 Historique des liants hydrocarbonés	41
2.2.1 Premières applications industrielles des liants hydrocarbonés : la fabrication et l'entretien des routes.....	41
2.2.2 Transition progressive et définitive du goudron au bitume	41
2.3 Quelques données sur la consommation et les utilisations du bitume	44
2.3.1 Consommation de bitume	44
2.3.2 Utilisations du bitume.....	45
3 Composition des liants bitumineux.....	46
3.1 Composition des bitumes.....	46
3.1.1 Présentation générale.....	46
3.1.2 Composition élémentaire du bitume	47
3.1.3 Composition chimique : une substance complexe	48
3.2 Les composés aromatiques polycycliques dans les bitumes	52
3.2.1 Généralités.....	52
3.2.2 HAP présents dans les bitumes.....	53
3.2.3 Bitumes et goudrons, différents produits, différentes compositions	55
3.3 Les additifs	56
3.3.1 Définition dans le cadre de l'expertise	56
3.3.2 Coupes Pétrolières – hydrocarbures : fluxants/fluidifiants.....	56
3.3.3 Fluxants agrochimiques	58
3.3.4 Dopes d'adhésivité.....	61
3.3.5 Métaux et agents captant l'hydrogène sulfuré (H ₂ S)	62
3.3.6 Polymères	63
3.3.7 Fibres	65
3.3.8 Emulsions de bitumes.....	66
3.4 Méthodes d'analyse et de caractérisation associées	68

3.5	Conclusions concernant la composition des liants bitumineux	68
4	Réglementation et spécifications liées à la fabrication et à l'utilisation des produits bitumineux et de leurs additifs	69
4.1	Règlementation REACH	69
4.1.1	Généralités.....	69
4.1.2	Cas des bitumes	70
4.2	Réglementation CLP.....	71
4.2.1	Cas des bitumes	71
4.2.2	Cas des mélanges	73
4.3	Fiches de données de sécurité	73
4.3.1	La Fiche de données de sécurité.....	73
4.3.2	La fiche de données de sécurité étendue.....	74
4.3.3	Recommandation de la profession	74
4.4	Valeurs guides	75
4.5	Dangers des additifs utilisés	76
5	Procédés de mise en œuvre des produits bitumineux.....	80
5.1	Le secteur de la construction et de l'entretien des routes.....	80
5.1.1	Généralités sur la profession	80
5.1.2	Structure des routes.....	81
5.1.3	Description des différentes couches composant la structure d'une route	81
5.1.4	Les enrobés	83
5.1.5	Les enduits superficiels d'usure (ESU).....	90
5.1.6	Les autres travaux (petit entretien, réparation, etc.)	92
5.1.7	L'asphalte coulé	93
5.1.8	Exemples de formulations (d'après audition USIRF, 2011).....	97
5.1.9	Centrales de production.....	98
5.2	L'étanchéité des toitures-terrasses	102
5.2.1	La profession	103
5.2.2	Le complexe d'étanchéité	103
5.2.3	Historique des produits et techniques utilisés	104
5.2.4	Les additifs.....	105
5.2.5	Les produits liquides	105
5.2.6	Le mode de collage.....	106
5.2.7	Quels produits pour quelles applications ?	106
5.2.8	Le Métier d'étancheur	107
6	Recyclage.....	108
6.1	Recyclage en place à froid.....	110
6.2	Recyclage à chaud en centrale	110
6.3	Recyclage en centrale à froid	111
6.4	Recyclage en place à chaud	111
6.5	Etudes préalables	111
6.6	Emission de polluants.....	112
6.6.1	Les HAP issus du goudron ou des fluxants houillers	112
6.6.2	Amiante.....	113
6.6.3	Soufre	114

6.6.4	Particules et silice	114
6.6.5	Autres matériaux.....	114
6.7	Réglementation associée au recyclage des produits routiers en France	115
6.8	Projets de recherche	116
6.9	Politiques de recyclage dans quelques pays européens	118
7	Evaluation des expositions professionnelles	119
7.1	Estimation des populations professionnelles concernées	119
7.1.1	Données issues de la littérature et des auditions	119
7.1.2	Données issues de l'enquête SUMER.....	119
7.2	Les émissions de bitume	120
7.2.1	Généralités.....	120
7.2.2	Composition chimique des fumées de bitume	122
7.2.3	Facteurs de variabilité de la composition des émissions.....	127
7.3	Métrologie atmosphérique.....	130
7.3.1	Méthodes de prélèvement	130
7.3.2	Méthodes d'analyse	131
7.4	Exploitation des données métrologiques issues de la littérature	132
7.4.1	Evaluation de l'exposition atmosphérique	132
7.4.2	Evaluation de l'exposition cutanée aux HAP	141
7.4.3	Autres voies d'exposition	142
7.4.4	Indicateurs biologiques d'exposition	143
7.5	Exploitation des données métrologiques issues des bases de données	152
7.5.1	La base de données COLCHIC	153
7.5.2	La base de données CIMAROUT	156
7.6	Caractérisation des expositions potentielles – Approche comparative	157
8	Effets sanitaires	162
8.1	Etudes considérées	162
8.2	Pathologies non cancéreuses	165
8.2.1	Pathologies cutanées.....	165
8.2.2	Irritations oculaires.....	166
8.2.3	Effets sur l'appareil respiratoire	168
8.2.4	Effets sur le système cardiovasculaire	183
8.2.5	Effets sur le tractus gastrointestinal.....	185
8.2.6	Effets hématologiques	185
8.2.7	Effets hépatiques	185
8.2.8	Effets rénaux.....	186
8.2.9	Effets endocriniens	186
8.2.10	Effets sur le système immunitaire.....	186
8.2.11	Effets neurologiques	188
8.2.12	Effets sur la reproduction	189
8.2.13	Effets sur le développement	189
8.2.14	Autres effets.....	189
8.3	Pathologies cancéreuses.....	190
8.3.1	Classement du CIRC	190
8.3.2	Revue des études épidémiologiques par le CIRC.....	190
8.3.3	Revue des études de cancérogénicité chez l'animal par le CIRC.....	193

8.3.4	Revue des données mécanistes par le CIRC.....	194
8.3.5	Autre revue récente des études de cancérogénicité	196
8.3.6	Cancers cutanés liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux	198
8.4	Limites d'interprétation des études	205
8.4.1	Limites des études épidémiologiques.....	205
8.4.2	Limites des études toxicologiques	205
8.5	Conclusions générales sur les effets sanitaires	206
8.5.1	Effets aigus	206
8.5.2	Effets chroniques non cancérogènes	206
8.5.3	Effets cancérogènes	207
9	Evaluation qualitative des risques sanitaires	208
10	Conclusions du groupe de travail	214
11	Recommandations.....	216
12	Bibliographie.....	220
	Annexe 1 : Lettre de saisine	237
	Annexe 2 : Fabrication des bitumes	238
	Annexe 3 : Tests et définitions.....	240
	Annexe 4 : Fluxants dont l'utilisation a été revue par le Sétra.....	242
	Annexe 5 : Méthodes d'analyse et de caractérisation de la composition des bitumes.....	243
	Annexe 6 : Informations présentes dans les enregistrements des substances bitumineuses dans le règlement REACH	245
	Annexe 7 : Liste des classes de danger du règlement CLP	246
	Annexe 8 : Le vannier	247
	Annexe 9 : Les HAP.....	250
	Annexe 10 : Tableaux de résultats des extractions COLCHIC	254
	Annexe 11 : USIRF – Synthèse des données CIMAROUT	265
	Annexe 12 : Réparations – Tableau de maladies professionnelles	270
	Annexe 13 : Résultats de l'extraction du RNV3P	272
	Annexe 14 : Les cancers cutanés	277
	Annexe 15 : Agents identifiés comme initiateurs ou promoteurs de cancers cutanés chez l'animal	279
	Annexe 16 : Mécanismes de la cancérogénèse induite par les UV.....	280
	Annexe 17 : Liens mentionnés dans les déclarations publiques d'intérêts des experts.....	281

Expertise collective – Synthèse et conclusions

EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

« Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts et du groupe de travail.

➤ **Présentation de la question posée**

L'Anses a été saisie, en date du 19 novembre 2008, par la Fédération nationale des salariés de la construction - Confédération générale du travail (FNSC-CGT) afin de synthétiser les enquêtes menées sur les produits utilisés pour la réalisation des routes et d'évaluer les risques sanitaires sur l'Homme. Cette demande a été étendue par l'Anses, à tous les secteurs d'activité concernés par l'utilisation de ce type de matériau, en réalisant une évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs.

➤ **Contexte scientifique**

Les bitumes sont des résidus de raffinage du pétrole utilisés principalement pour les travaux routiers. Le bitume constitue l'ingrédient principal voire exclusif d'un liant, la partie continue qui assure la cohésion d'un revêtement (routier, d'étanchéité de toiture, *etc.*). Cette fonction de liant était aussi assurée par l'emploi de goudrons et autres produits issus de la houille qui ont été progressivement remplacés par les bitumes, et ne sont, d'après les industriels, plus utilisés en France depuis les années 2000.

La consommation moyenne annuelle française de bitume est estimée à plus de 3 millions de tonnes (entre 2000 et 2010), avec une part de plus de 90 % consacrée aux applications routières (majoritairement l'entretien des voies existantes), les 10 % restant concernant les applications industrielles (activités d'étanchéité et d'isolation).

Les domaines d'activités impliquant ce matériau comptent de nombreuses professions et emploient un nombre important de travailleurs. Dès lors, les acteurs industriels et ceux de la prévention sont attentifs aux impacts d'une exposition professionnelle aux produits bitumineux et à leurs additifs sur la santé des travailleurs. Certains signaux d'alerte observés récemment ont amené les représentants de la FNSC-CGT à prendre l'initiative de porter ce sujet à l'attention de l'Anses.

➤ **Organisation de l'expertise**

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » en septembre 2010, l'instruction de cette saisine. L'Agence a également mandaté le groupe de travail (GT) « Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs » pour cette instruction. Le CES « Evaluation des risques liés à l'air » a également été consulté.

La réalisation des travaux pour ce rapport s'est également appuyée sur les compétences de différentes unités de l'Anses : évaluation des dangers et des risques des substances,

observatoire des substances et de leur substitution, REACH¹-CLP² ainsi que la mission du réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P).

Les travaux d'expertise du GT ont été soumis régulièrement au CES « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le GT tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

➤ Description de la méthode

Les travaux du GT de l'Anses sont basés sur une analyse critique de la littérature visant à dresser un état de l'art sur la nature des composés contenus dans et émis par les produits bitumineux et leurs additifs au cours des différentes opérations de mise en œuvre, les données d'exposition des travailleurs à ces produits ainsi que les effets sanitaires associés. Ils ont porté en priorité sur la construction et l'entretien des routes en France, y compris en atmosphère confinée (tunnels, parkings souterrains, etc.). En parallèle, un focus a été réalisé sur les activités d'étanchéité dans le secteur du Bâtiment et des travaux publics (BTP).

L'Anses a été invitée, en tant qu'organisme représentatif, à assister aux travaux d'évaluation et aux délibérations du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) sur *le risque cancérigène pour l'Homme lié aux bitumes, à leurs fumées, et à quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)*, du 11 au 18 octobre 2011, dans le cadre de la réalisation de la monographie 103.

De septembre 2011 à avril 2012, l'Agence a procédé à de nombreuses auditions d'acteurs industriels (L'union des syndicats de l'industrie routière française (USIRF), l'association européenne des producteurs de bitumes (Eurobitume), la Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité (CSFE), et l'office des asphaltes), syndicaux (FNSSC-CGT), médicaux et de prévention (La Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail (CARSAT) des Pays de Loire, la médecine du travail du secteur du bâtiment et des travaux publics, la faculté de médecine et santé au travail de Grenoble) ou encore techniques (l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFFSTAR)).

Par ailleurs, les visites d'une centrale d'enrobage et de trois chantiers ont été réalisées afin de visualiser les conditions pratiques liées à ces activités.

Plusieurs conventions de recherche et de développement (CRD) ont été contractées dans le cadre de ces travaux :

- Avec l'Institut universitaire romand de Santé au Travail (IST) afin d'étudier l'interaction des HAP du bitume et des ultra-violets (UV) sur la peau humaine et le risque de cancer

¹ Règlement (CE) n° 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances.

² Règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) n° 1907/2006.

de la peau. Les résultats intermédiaires de cette étude, rendus en mai 2013, ne permettent pas de conclure quant à l'existence de cette interaction.

- Avec le centre hospitalo-universitaire (CHU) de Grenoble afin d'évaluer les niveaux actuels (atmosphériques et biologiques) d'exposition professionnelle aux HAP pendant la production et l'application des bitumes (routes et toitures) puis de comparer ces niveaux aux données plus anciennes publiées dans la littérature. Les résultats de cette étude, rendus en mai 2013, ont permis de compléter les données d'exposition atmosphériques et biologiques recensées dans le rapport d'expertise collective.

➤ Résultat de l'expertise collective

Le comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets du présent rapport lors de sa séance du 27 juin 2013 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Complexité de composition des liants bitumineux et de leurs émissions

En tant que résidus de distillation, les bitumes sont des mélanges de composés chimiques nombreux et variés. Selon le brut d'origine et le procédé de fabrication employés, plusieurs types de bitumes aux propriétés différentes peuvent être obtenus. Ainsi, le soufflage d'air chaud dans le bitume permet une augmentation de sa dureté (bitume oxydé ou soufflé), la viscosité peut être diminuée par ajout de dérivés légers, appelés fluxants (bitumes fluxés), ou encore par emploi d'émulsions aqueuses, et la résistance mécanique améliorée par ajout de divers polymères (bitume modifié, bitume polymère).

Les bitumes présentent des propriétés d'adhésivité, de cohésion et un caractère hydrophobe qui en font un matériau idéal pour la fabrication, notamment, des revêtements routiers. Pour obtenir les propriétés physico-chimiques et mécaniques requises pour ce liant (stabilité, adhérence, durabilité, maniabilité, résistance chimique, etc.), il est parfois nécessaire d'ajouter au bitume un ou plusieurs additifs (fluxants pétroliers ou agrochimiques, dopes d'adhésivité, métaux et agents captant le sulfure d'hydrogène, polymères, fibres, émulsifiants, etc.) dans des proportions souvent faibles par rapport aux bitumes (moins de 1 % du liant). Les compositions précises de chaque formulation restent des données confidentielles et sont ajustées en fonction du revêtement souhaité. La formulation et la mise en œuvre de ce matériau sont très variées, et en constante évolution.

Dans le domaine de la construction et de l'entretien des routes, les bitumes sont classiquement mis en œuvre suivant 3 grandes techniques : les enrobés bitumineux, les enduits superficiels et l'asphaltage. Le secteur de l'étanchéité des toitures/terrasses implique également l'utilisation de produits bitumineux (matériaux isolants à base de bitume, procédés de collage au bitume, etc.). Ces différentes utilisations peuvent induire une exposition directe des travailleurs aux produits bitumineux mais surtout à leurs émissions lorsqu'ils sont chauffés pour leur manipulation. Les émissions ainsi générées varient grandement selon le procédé de mise en œuvre, la nature des produits utilisés ainsi que le type de travail effectué. Elles sont composées de particules en suspension dans l'air contenant des molécules organiques peu volatiles, de vapeurs contenant des molécules organiques plus volatiles et de gaz tels que le sulfure d'hydrogène.

La composition des liants bitumineux et de leurs émissions est par conséquent *de facto* très complexe ; l'identification et la quantification des composés présents dans les produits bitumineux sont techniquement très difficiles et ne sauraient être exhaustives. De nombreux composés aromatiques polycycliques (CAP) sont présents dans les liants bitumineux et leurs émissions. Parmi ces CAP, une attention particulière a longtemps été portée par la communauté scientifique sur les 16 HAP prioritaires définis par l'Agence américaine de

protection de l'environnement (United States Environmental Protection Agency -US EPA) dont le benzo[a]pyrène (B[a]P), considérés historiquement comme représentatifs du danger cancérigène de ces liants et de leurs émissions. Les HAP contenus dans les bitumes sont dans des ordres de concentration 1000 à 10 000 fois inférieurs à ceux mesurés dans les goudrons. Depuis les années 50, la disparition progressive de l'utilisation des produits dérivés de la houille (goudrons, brais et huiles) au profit des produits bitumineux a ainsi entraîné une diminution conséquente des émissions de HAP et notamment de B[a]P. Parmi les autres CAP identifiés dans ces produits, certains commencent à être étudiés tels que les HAP soufrés et méthylés. D'autres composés organiques volatils (COV) ou semi-volatils (COSV) reconnus pour leurs effets sanitaires délétères ont également été identifiés dans les bitumes et leurs émissions.

Compte tenu du nombre important de composés présents dans les bitumes et leurs émissions, lesquels n'ayant pour la plupart pas été identifiés, il n'est pas possible d'établir un profil type de composition. Ainsi, il n'est pas pertinent, en l'état actuel des connaissances, de caractériser les effets sanitaires d'une exposition à un tel mélange *via* une approche substance par substance. En conséquence, les experts ont réalisé l'évaluation des dangers et des risques sanitaires liés à la manipulation des produits bitumineux *via* une analyse des données disponibles dans la littérature considérant la substance « bitume » dans sa globalité.

Effets sanitaires liés à une exposition aux liants bitumineux et à leurs émissions

Concernant les effets non cancérigènes, plusieurs études chez l'Homme ont décrit des effets aigus d'irritation oculaire et respiratoires liés à une exposition aux fumées de bitumes.

Des effets respiratoires liés à une exposition chronique ont été rapportés dans les études épidémiologiques chez les travailleurs de la construction routière : augmentation significative des risques d'asthme et de broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO), augmentation des marqueurs inflammatoires au niveau pulmonaire. Une association significative entre l'exposition au B[a]P (évaluée en concentration atmosphérique cumulée sur un an) et une mortalité par pathologies respiratoires a été mise en évidence par l'étude de cohorte multicentrique européenne. Les études expérimentales, bien que manquant d'homogénéité quant aux conditions mises en œuvre (substances bitumineuses testées, doses utilisées, protocoles d'exposition, etc.) ou aux paramètres physiologiques étudiés, permettent néanmoins de confirmer que l'exposition aux émissions de bitumes peut être à l'origine d'effets délétères respiratoires. D'autres effets chroniques cardiovasculaires et immunotoxiques sont par ailleurs suspectés.

Concernant les effets cancérigènes, les experts ont fondé leur analyse sur les conclusions du CIRC. Le CIRC a récemment actualisé sa monographie concernant la cancérigénicité de l'exposition des travailleurs de différents groupes professionnels aux émissions de bitumes. L'exposition des travailleurs aux bitumes oxydés et leurs émissions lors de la *pose de produits d'étanchéité* a été classée par le CIRC en catégorie 2A, cancérigène probable. Il est à noter que, d'après les auditions menées auprès de la CSFE dans le cadre de l'instruction de la saisine, les travailleurs n'utilisent plus *a priori* ce type de produits en France actuellement. Les expositions des professionnels aux produits bitumineux et leurs émissions lors de la *pose d'enrobés* à base de bitumes routiers ou lors de l'*asphaltage* à base de bitumes durs ont été classées par le CIRC en catégorie 2B, cancérigène possible. Une association positive a été observée entre les expositions professionnelles aux liants bitumineux et à leurs émissions, et l'apparition de cancers du poumon et des voies aérodigestives supérieures (cavité buccale, pharynx, œsophage et larynx) chez les travailleurs lors de la pose de produits d'étanchéité ou lors de l'asphaltage.

Pour les effets cutanés, il existe peu de données concernant les effets non cancérogènes et aucune étude spécifique sur les cancers cutanés en lien avec des expositions aux liants bitumineux n'a été recensée. Si plusieurs études épidémiologiques présentent des données relatives aux cancers cutanés, aucune n'a mis en évidence d'association statistiquement significative entre l'apparition de cancers chez les travailleurs et l'exposition aux émissions de bitumes. Cependant, il s'agit principalement d'études de mortalité, inadaptées pour évaluer le taux d'incidence de ce type de cancers souvent curables et sans pronostic léthal (hors mélanomes). Il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'évaluer les effets conjugués liés à une co-exposition aux émissions de bitumes et aux rayonnements UV compte tenu de l'absence de données.

Aucune donnée toxicologique ne permet à l'heure actuelle d'estimer une relation dose-réponse entre les niveaux d'exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions, et les effets sanitaires décrits.

Evaluation des expositions - Effectifs concernés

Aucune donnée consolidée n'a pu être recensée afin d'évaluer précisément le nombre de travailleurs exposés ou susceptibles de l'être aux liants bitumineux et à leurs émissions en France. Les chiffres varient considérablement pour le secteur de l'industrie de la construction et de l'entretien des routes (5000 d'après l'USIRF et 85000 d'après la FNESC-CGT). D'après la CSFE, 7000 à 8000 personnes actives du secteur de l'étanchéité des toitures/terrasses seraient concernées par une utilisation de produits d'étanchéité à base de bitumes (sans forcément les manipuler). L'exposition potentielle aux émissions de bitumes a lieu pendant le temps de soudage (au maximum 30 % du temps de travail).

Evaluation des expositions - Limites de la métrologie

L'exposition des travailleurs aux liants bitumineux et à leurs émissions implique les voies :

- respiratoire, par inhalation des émissions ;
- cutanée, par contact direct avec les produits, par dépôt des émissions sur la peau ou par contact éventuel avec les vêtements souillés ;
- orale, via l'ingestion de produits ou de leurs émissions (contact main-bouche, notamment).

Le GT a identifié de nombreuses limites à l'évaluation des expositions des travailleurs liées notamment à la métrologie atmosphérique ainsi qu'à la métrologie cutanée :

- Les méthodes de mesure atmosphérique actuellement disponibles sont multiples et ne font l'objet d'aucun consensus au niveau international. Deux stratégies d'analyse ont été développées par les hygiénistes pour évaluer l'exposition atmosphérique des travailleurs aux émissions de bitumes : l'une dite globale (concernant la quantité de fumées totales) et l'autre dite spécifique (concernant des composés individualisés). Ces deux stratégies apportent des informations incomplètes mais complémentaires pour l'évaluation de l'exposition totale aux émissions de bitumes.
- Peu de résultats exploitables permettent d'appréhender la part de l'exposition par voie cutanée.
- Afin d'appréhender l'exposition des travailleurs aux émissions de bitumes en intégrant toutes les sources ainsi que toutes les voies d'exposition dans l'organisme (en particulier les voies cutanée et orale), la surveillance biologique constitue une approche intéressante. La plupart des études sur le sujet sont centrées sur le dosage des métabolites des HAP, et peu d'entre elles ont mesuré à la fois ces métabolites et des marqueurs de toxicité. Aucune relation dose-effet n'a pu être mise en évidence pour les métabolites analysés.

Evaluation des expositions – Exploitation des données météorologiques

D'une manière générale, les données d'exposition atmosphérique relevées dans la littérature sont parcellaires et la plupart du temps non représentatives des postes de travail. Les données de suivi des expositions des travailleurs aux produits bitumineux et à leurs émissions recensées à travers ces travaux d'expertise sont centrées sur les HAP.

Des résultats de campagnes de mesures des 16 HAP classés polluants prioritaires par l'US-EPA ont été recensés dans la littérature. Cependant, ces mesures sont difficilement comparables entre elles, car les bitumes, les conditions climatiques (vitesse du vent, humidité, etc.), la localisation des chantiers, les moyens de prélèvement ainsi que les techniques analytiques divergent. Une constante est néanmoins identifiable : il ressort de toutes ces études que parmi ces 16 HAP, les composés à 2 ou 3 cycles (en particulier le naphthalène) sont majoritairement présents par rapport aux composés à 5 ou 6 cycles. En effet, ces derniers, dont le B[a]P et le dibenzo[a,h]anthracène présentent des niveaux moyens de concentration de l'ordre du ng.m^{-3} alors que ceux de composés plus légers comme le naphthalène ou le fluorène dépassent régulièrement le $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Ont été interrogées et analysées les bases de données COLCHIC (Institut national de recherche et de sécurité - INRS) et CIMAROUT (USIRF), qui regroupent les résultats d'études d'exposition des travailleurs pour différents paramètres mesurés dans le cadre de suivis professionnels. Il s'agit entre autres des concentrations atmosphériques de HAP (B[a]P, pyrène, etc.), des poussières totales, des poussières inhalables, des poussières alvéolaires, de la fraction soluble dans le dichlorométhane, des concentrations urinaires des métabolites de certains HAP (1-hydroxypyrene, 3-hydroxybenzo[a]pyrene, etc.). Le nombre de prélèvements est insuffisant pour permettre une analyse quantitative et représentative de l'exposition que ce soit par secteurs d'activité, par familles de tâches, par postes ou encore par types de liant. L'exploitation des données extraites de ces bases a donc été strictement qualitative. Les valeurs de B[a]P relevées sont largement inférieures (en moyenne 5 ng.m^{-3}) à la valeur recommandée par la Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés (150 ng.m^{-3}) pour les deux périodes étudiées (1986-2000 et 2001-2011), avec des maxima beaucoup plus faibles pour la période de 2001 à 2011 par rapport à la période 1986 à 2000.

En revanche, malgré l'identification dans les émissions de produits bitumineux de nombreux autres composés de diverses familles telles les HAP soufrés ou azotés, les COV et COSV, les hydrocarbures aliphatiques et les additifs, les expositions des travailleurs à ces émissions restent à ce jour peu ou pas documentées.

Caractérisation des expositions potentielles – Approche comparative

Afin de réaliser une comparaison de l'exposition des travailleurs aux différents postes de travail identifiés selon les procédés de mise en œuvre des produits bitumineux, une matrice a été construite. A cet effet, les experts se sont attachés à recenser les paramètres qui semblent, d'après les résultats de l'expertise, être les plus influents. Parmi les paramètres identifiés, seuls 4 paramètres ont été retenus par les experts : la distance du travailleur par rapport à la source des émissions, la température d'application des produits, le débit ventilatoire du travailleur et la durée-fréquence d'exposition des travailleurs. Pour chaque couple procédé/poste de travail, des notes ont été attribuées à chacun de ces 4 paramètres suivant un jugement d'experts basé sur les informations disponibles. Cette matrice, dont la valeur est indicative, permet de comparer entre eux les différents postes pour un même procédé de mise en œuvre. D'autres paramètres influant sur les expositions, parfois même de manière prépondérante, ont été identifiés (la nature des produits bitumineux utilisés, les

technologies mises en œuvre, les conditions météorologiques, *etc.*) mais n'ont pas pu être pris en compte étant donné leur variabilité et la difficulté à estimer leur contribution relative.

Cette analyse comparative des différents postes de travail a donc permis de faire ressortir, par grands types de procédés, certaines fonctions de travail dont les niveaux d'exposition semblent *a priori* être les plus importants :

- Chez les travailleurs de la pose d'enrobés, la manipulation d'enrobés à chaud dans les postes de conducteur de finisseur, de tireur au râteau et de régleur, apparaissent comme les activités les plus exposantes. Certains équipements des machines tels les cabines ventilées d'isolation du conducteur ou encore la mise en place de systèmes de captage des fumées permettent de diminuer les expositions pour le conducteur de finisseur.
- Chez les travailleurs chargés de l'application des enduits superficiels d'usure (ESU), les postes de gravillonneur, qui règle l'inclinaison de la benne verseuse de granulats, et d'opérateur-lance, chargé d'appliquer l'enduit à l'aide d'une lance manuelle aux endroits difficilement accessibles pour la répandeuse, seraient les postes les plus exposés, notamment dans le cas de l'utilisation de liants anhydres dont les températures d'utilisation sont supérieures à celles des émulsions.
- Chez les applicateurs de l'asphalte coulé, les postes d'aide asphaltteur, d'asphaltteur et de régleur finisseur seraient les plus exposés, quelle que soit la nature du liant mis en œuvre, du fait des températures élevées d'application qui génèrent une production importante de fumées et de la proximité de ces postes avec la source des émissions.
- Chez les travailleurs de l'étanchéité, les postes d'étancheur et d'aide étancheur utilisant la méthode de collage au bitume oxydé fondu représenteraient les postes les plus exposés.
- Chez les travailleurs affiliés aux travaux de petit entretien ou de réparation, le brouetteur et le ratisseur d'enrobés à chaud ainsi que le préparateur de fissure sembleraient être les postes les plus exposants.

➤ Conclusions de l'expertise collective

En l'état actuel des connaissances, une démarche d'évaluation quantitative des risques sanitaires n'est pas réalisable. Le manque de données concernant la caractérisation du danger et la complexité du mélange constituent en effet un frein à cette démarche. Par ailleurs, les connaissances quantitatives disponibles liées à l'exposition ont été centrées principalement sur un indicateur relevant de la famille des HAP dont la pertinence a été discutée au cours de cette expertise. Le Health Council of the Netherlands a essayé en 2007 de calculer l'excès de risque de cancer du poumon lié à des expositions professionnelles au B[a]P à partir d'études menées spécifiquement chez les travailleurs du bitume, mais compte tenu du manque d'informations et des facteurs confondants, cette quantification n'a pu aboutir. Ainsi, les experts se sont attachés à mettre en perspective les données sanitaires dans une démarche qualitative globale d'évaluation des risques sanitaires, avec un recensement et une analyse des données d'exposition en considérant les postes de travail.

Parmi les composés identifiés dans les bitumes et leurs émissions, certains sont classés cancérigènes par le CIRC et/ou classés comme substances cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques (CMR) et/ou dangereuses par l'Union Européenne. Le CIRC a par ailleurs

récemment classé l'exposition aux bitumes oxydés et à leurs émissions lors des travaux d'étanchéité comme cancérigène probable pour l'Homme (catégorie 2A) et l'exposition aux bitumes et leurs émissions lors de la pose d'enrobés et/ou lors de travaux d'asphaltage comme cancérigène possible (catégorie 2B). Au-delà du potentiel cancérigène des produits bitumineux et de leurs émissions, les études épidémiologiques ont mis en évidence l'existence d'effets respiratoires liés à une exposition des travailleurs. Des effets cardiovasculaires et immunotoxiques sont également suspectés.

Cependant, d'un point de vue réglementaire, il n'existe pas de classification harmonisée au niveau européen pour les substances bitumineuses, et dans chacun des dossiers d'enregistrement REACH disponibles en ligne sur le site de l'Agence européenne des produits chimiques (European Chemicals Agency – ECHA), aucune substance enregistrée n'a été classée dangereuse par le déclarant sur la base des critères tels que décrits par le règlement CLP. En revanche, l'inventaire des classifications de l'ECHA indique que plusieurs industriels ont classé certaines des substances considérées comme dangereuses.

Les données disponibles liées à l'exposition ont été principalement centrées sur les HAP dont certains sont reconnus pour leur caractère cancérigène. Les niveaux d'exposition des travailleurs aux HAP ont diminué ces dernières années notamment en lien avec la disparition de l'utilisation du goudron ainsi qu'avec l'évolution des techniques de mise en œuvre. Si les concentrations atmosphériques de B[a]P actuellement mesurées sur certains chantiers se situent quasiment au niveau du bruit de fond environnemental, certaines situations peuvent encore générer des émissions conséquentes de HAP (tunnel, rabotage et recyclage, utilisation de fluxants houillers ou pétrochimiques non recommandés). Par ailleurs, les travailleurs sont également exposés aux autres composés émis lors de la mise en œuvre des produits bitumineux tels les dérivés méthylés de HAP, les HAP hétérocycliques soufrés (S-HAP), les dérivés azotés de HAP (N-HAP) ainsi que les COV, les COSV et les composés organiques non volatils (CONV) dont les niveaux d'exposition sont à ce jour peu ou pas documentés.

Ainsi, le B[a]P historiquement mesuré ne semble plus être aujourd'hui le seul traceur pertinent du risque cancérigène. Pour les experts, il est sans doute nécessaire de maintenir le suivi de ce traceur, pour des questions de comparaison internationale, de référentiel historique et de niveaux encore élevés mesurés sur certains chantiers (en milieu confiné ou lors de réfections/recyclages d'anciennes chaussées). Néanmoins, il paraît indispensable d'élargir les recherches et le suivi à d'autres traceurs, notamment pour prendre en compte les effets non cancérigènes et ainsi mieux appréhender le risque sanitaire.

L'analyse comparative des différents postes de travail, via l'exploitation des résultats de la matrice, a par ailleurs permis de faire ressortir, par grand type de procédé, certains postes pour lesquels les niveaux d'exposition semblent a priori être les plus importants. Il est également à noter que la température a un impact fort sur l'émission de fumée.

La tendance générale actuelle dans l'évolution des pratiques professionnelles est à la diminution des températures d'application des produits bitumineux. Ces pratiques émergentes permettraient de réduire l'exposition des travailleurs lors de l'application de ces produits en limitant la génération d'émissions. Néanmoins, ces diminutions d'exposition ne peuvent être corrélées directement avec une réduction du risque encouru par les travailleurs. En effet, pour compenser une partie des effets de cette baisse de température sur la maniabilité de la préparation, plusieurs procédés de fabrication innovants ont été développés par les industriels : l'incorporation d'agents plastifiants (additifs organiques fluidifiants), le moussage, etc. Or, les impacts potentiels sur la composition des émissions générées et sur l'intensité de transfert percutané en cas de contact, donc sur la santé des travailleurs, ne sont pas connus.

En conclusion, les données recensées ont permis d'identifier des situations d'exposition dont les impacts sanitaires pour les travailleurs concernés doivent être pris en compte. Ainsi, au regard de l'ensemble de ces données, les experts ont finalement conclu à l'existence d'un risque sanitaire associé à une exposition aux liants bitumineux et à leurs émissions. Il n'est en revanche pas possible, en l'état actuel des connaissances, de quantifier ce risque.

Il est également à souligner que les travailleurs sont exposés à d'autres facteurs de risque non étudiés dans le cadre de la saisine et potentiellement responsables d'effets sanitaires, parmi lesquels les rayonnements UV, la co-exposition avec des particules (notamment d'émissions de moteur diesel), le contact avec des matériaux ou pièces chaudes pouvant occasionner des brûlures, la manutention de charges, la répétitivité des gestes, les postures pénibles, l'exposition aux vibrations, le lavage des mains avec des solvants dangereux (gasoil ou autres), le bruit, etc.

Les experts soulignent par ailleurs que si l'exposition des travailleurs par voie cutanée est encore peu considérée dans les études comparativement à la voie respiratoire, le contact des émissions avec la peau des travailleurs suivi d'une résorption cutanée constitue une voie d'exposition non négligeable. Se pose donc la question du risque lié à l'exposition par voie cutanée, notamment à des produits appliqués tièdes ou à froid, en particulier les émulsions (40-60°C), comprenant des tensioactifs susceptibles d'augmenter la perméation cutanée.

Afin d'évaluer l'exposition atmosphérique des travailleurs aux émissions de bitumes, les méthodes de mesure nécessitent le prélèvement systématique des deux fractions inhalables : particules et vapeurs. Les experts soulignent la difficulté d'interprétation liée à l'utilisation des deux stratégies d'analyse, globale et spécifique, isolément l'une de l'autre, et encouragent donc la mise en œuvre systématique de ces deux méthodes dans la caractérisation de l'exposition des travailleurs aux émissions de bitumes. En effet, l'approche globale non « qualitative » est pertinente puisqu'elle s'inscrit dans une démarche préventive de réduction des expositions alors que l'approche spécifique demeure indispensable dans une démarche d'investigation toxicologique.

Les experts attirent également l'attention sur les activités de raboutage et de recyclage. Lors de ces opérations effectuées sur d'anciens revêtements routiers, il existe différentes sources d'émission de substances reconnues pour leur dangerosité et présentes dans les matériaux en place, notamment l'amiante susceptible de libérer des fibres, la silice, mais aussi les goudrons et ses dérivés, les matériaux secondaires, les fluxants, les polymères, les additifs, les anciens bitumes soufrés susceptibles d'émettre des CAP ou des COV. Ces deux activités sont donc susceptibles d'exposer les travailleurs à des émissions potentiellement dangereuses et doivent faire l'objet d'une surveillance particulière et renforcée.

➤ **Recommandations**

Les experts, au regard de l'ensemble des éléments portés à leur connaissance au cours de la réalisation de cette expertise collective, établissent les recommandations suivantes :

Mise en œuvre d'une stratégie préventive

Les expositions professionnelles aux liants bitumineux et leurs émissions nécessitent l'organisation par l'employeur des moyens adéquats de prévention collective et individuelle.

En termes de prévention en santé au travail, il est d'ores et déjà nécessaire au vu des conclusions de l'expertise de **réduire les expositions aux émissions de liants bitumineux** et d'assurer un suivi médical approprié des travailleurs.

En termes de prévention collective

- Encourager la mise en place sur le chantier de systèmes d'aspiration des fumées et/ou de systèmes de ventilation adéquats lors de travaux en espace confiné (tunnels, sous-sols) et préconiser l'utilisation d'engins de chantier avec systèmes intégrés de captage de fumées.

- Sélectionner les produits (bitumes, additifs, *etc.*) et procédés d'application les moins exposants (au regard des connaissances disponibles) :
 - Respecter les consignes de température propres à l'utilisation de chaque produit bitumineux ;
 - Privilégier les émulsions de bitume permettant la réduction des fumées émises en travaillant « à froid » en dessous de 60°C. Privilégier les températures d'application d'asphalte les plus faibles (inférieures à 200°C) ;
 - Substituer les produits de nettoyage des outils et/ou des mains dangereux (par exemple les solvants de type gasoil) ;
 - Eviter de mettre en œuvre le procédé de collage au bitume oxydé fondu dans le cadre des travaux d'étanchéité et privilégier l'utilisation des membranes collées à froid (auto-adhésives).

- Adapter l'organisation du travail :
 - Décaler les horaires plus tôt l'été de manière à réduire l'impact de la chaleur et minimiser la co-exposition entre le rayonnement solaire et les produits bitumineux ;
 - Evaluer la faisabilité et la pertinence d'un système de rotation des postes de travail permettant aux travailleurs d'alterner entre différentes tâches.

En termes de prévention individuelle

- Préconiser, afin d'éviter la contamination cutanée, un renouvellement des vêtements de travail et la prise de douche sur le lieu du chantier.

- Adapter le port des équipements de protection individuelle à la protection de la peau et de l'appareil respiratoire :
 - Vêtements de travail propres avec manches et jambes longues, port de visière ou lunettes, chapeau ou casque, *etc.* ;
 - Port de protection respiratoire en cas d'exposition potentiellement importante comme en milieu confiné ou lors des opérations de rabotage.

Concernant le suivi des travailleurs

- Lors de la surveillance médicale régulière des travailleurs exposés aux liants bitumineux, inclure la réalisation d'explorations fonctionnelles respiratoires et une surveillance dermatologique. Ceci implique une communication ciblée auprès des médecins du travail concernant ces éléments de surveillance complémentaires.

- Poursuivre et développer le suivi des expositions par métrologie et biométrie afin d'assurer une traçabilité de l'exposition des travailleurs.

- Encourager une veille active sur les effets sanitaires respiratoires mais également cardiovasculaires, immunotoxiques, neurotoxiques, *etc.*, en lien avec une exposition des travailleurs aux liants bitumineux.

En termes de prévention au titre du risque chimique**→ Pour les fabricants de produits bitumineux**

- Encourager la réflexion sur les effets respiratoires et une éventuelle classification de la substance « bitume » avec l'objectif de parvenir *in fine* à une harmonisation de sa classification par les acteurs concernés.
- Encourager la mise à disposition de fiches de données de sécurité (FDS) actualisées.

→ Pour les utilisateurs de produits bitumineux

- Informer les travailleurs du risque chimique lié à la manipulation des produits bitumineux et/ou de leurs additifs (dont certains sont des produits chimiques dangereux).
- Actualiser le document unique d'évaluation des risques au vu des données sanitaires récentes et encourager la mise à disposition par les industriels de fiches de données de sécurité (FDS) actualisées.
- Dans le cadre de l'élaboration du document unique d'évaluation des risques, l'employeur doit caractériser l'exposition des travailleurs aux émissions de liants bitumineux par la mise en œuvre en parallèle de deux approches :
 - Une approche globale d'une part, quantifiant les grandes classes de polluants présents dans les émissions (COV, poussières, etc.), pertinente dans le cadre d'une démarche comparative de prévention des risques. La méthode en cours de développement par l'INRS pourra s'avérer un outil utile dans cette optique ;
 - Une approche spécifique d'autre part, ciblée sur certains polluants bien identifiés (B[a]P, HAP, etc.), et utile dans une démarche de caractérisation des profils toxicologiques des liants bitumineux et de leurs émissions. Dans l'attente de nouveaux traceurs complémentaires, la mesure des HAP reste la référence actuelle. Néanmoins, il est d'ores et déjà possible d'avoir une approche multi-résidus.

→ Pour les pouvoirs publics

- Réfléchir à une éventuelle classification de la substance « bitume » au vu des données sanitaires récentes.

Concernant le rabotage et le recyclage

- Renforcer la réglementation sur les activités de rabotage et de recyclage des anciens revêtements routiers en préconisant :
 - La recherche obligatoire et systématique de certains composants du matériau en place (amiante³ et goudrons principalement) avant toute opération de rabotage ou de recyclage ;
 - Une surveillance accrue des possibles émissions générées lors de ces opérations.

³Cf Circulaire du 15 mai 2013 portant instruction sur la gestion des risques sanitaires liés à l'amiante dans le cas de travaux sur les enrobés amiantés du réseau routier national non concédé - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ; Ministère de l'égalité des territoires et du logement - NOR : TRAT1311107C, texte paru au Bulletin Officiel le 25 juin 2013.

Mise en œuvre d'actions de recherche et développement

En termes de développement d'outils métrologiques de suivi des expositions

- Mettre en place une harmonisation des méthodes globales de mesure des expositions (travaux INRS en cours ainsi qu'au niveau international).
- Développer, en parallèle du suivi des HAP de référence, un ou d'autre(s) traceur(s) spécifique(s) des émissions de liants bitumineux afin d'apprécier les risques cancérigènes. Les experts proposent en premier lieu l'exploration des composés suivants :
 - Hétérocycles soufrés (benzo[b]naphto[2,1,d]thiophène, *etc.*) ;
 - Hétérocycles azotés (carbazole, *etc.*) ;
 - Naphtalène (en tenant compte de la spécificité liée à la mesure de ce HAP par rapport aux autres) ;
 - HAP méthylés (5-méthylchrysène, *etc.*).
- Développer la recherche de traceurs pour l'évaluation des effets non-cancérigènes.

En termes de mise en œuvre d'études

- Mettre en place des études épidémiologiques concernant les cancers cutanés en lien avec une exposition aux émissions de liants bitumineux ou à défaut proposer au CIRC une évaluation spécifique de ce cancer à partir de l'étude de cohorte multi centrique européenne.
- Poursuivre les recherches concernant l'exposition conjointe aux émissions de bitumes et aux rayonnements UV de la peau humaine et le risque de cancer.
- Mettre en place des actions de recherche sur la composition et la toxicité des liants bitumineux mis en œuvre, avec le maximum de transparence de la part des professionnels afin de pouvoir évaluer l'impact sanitaire de certaines formulations (bitumes polymères, enrobés tièdes, émulsions, *etc.*) et des différents grades de bitumes utilisés.
- Mettre en place des études en populations professionnelles exposées aux liants bitumineux, couplant des aspects de biosurveillance (évaluation de la dose interne d'exposition par l'analyse de matrices biologiques) à des biomarqueurs d'effets sur les mêmes individus.

Maisons-Alfort, le 23/07/2013,

Au nom des experts du CES « Évaluation des risques liés aux substances chimiques »,



M. GUERBET

M Guerbet
Le président du CES

Sigles et abréviations

3OHB[a]P : 3-hydroxybenzo[a]pyrène

ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists

ADN : Acide désoxyribonucléique

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

anti-K : anti-kérosène

B[a]P : Benzo[a]pyrène

BBM : Béton bitumineux mince

BBME : Béton bitumineux à module élevé

BBSG : Béton bitumineux semi-grenu

BBTM : Béton bitumineux très mince

BCC : Carcinomes basocellulaires

BO : Bitume oxydé

BPCO : Broncho-pneumopathie chronique obstructive

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

CAP : Composés aromatiques polycycliques

CARSAT : Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail

CAS : Chemical Abstract Service

CER : Collège des entreprises routières

CES : Comité d'experts spécialisé

CGT : Confédération générale du travail

CIMAROUT : Centre d'information sur les matériaux routiers

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

CLP : Classification, Labelling, Packaging

CMR : Cancérogène, Mutagène ou toxique pour la Reproduction

CNAMTS : Caisse nationale de l'Assurance maladie des travailleurs salariés

CONCAWE : Conservation of Clean Air and Water in Europe

COSV : Composé organique semi-volatile

COV : Composé organique volatil

CRRMP : Comités Régionaux de Reconnaissance des Maladies Professionnelles

CSFE : Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité

CVF : Capacité vitale forcée

CYP : Cytochrome P450

DARES : Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques

DEM50 : Débit expiratoire forcé à 50 %

DEP : Débit expiratoire de pointe

DP : Début de poste

EAC : Enduit d'application à chaud

EAPA : European asphalt pavement association

ECF : Enrobé coulé à froid

ECHA : Agence européenne des produits chimiques (European Chemicals Agency)
EME : Enrobé à module élevé
ERN : Espèces réactives de l'azote
ERO : Espèces réactives de l'oxygène
EVA : Ethylène vinyle acétate
FDS : Fiche de données de sécurité
FID : Détecteur à ionisation de flamme
FNSC : Fédération nationale des salariés de la construction
FP : Fin de poste
FTIR : Infrarouge à Transformée de Fourier
GB : Grave bitume
GC : Chromatographie en phase gazeuse
GE : Grave-Emulsion
GPC : Chromatographie de perméation sur gel
H₂S : Hydrogène sulfuré
HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HAPS : Hydrocarbures aromatiques polycycliques hétérocycliques soufrés
HPLC : Chromatographie liquide haut performance
IBE : Indicateur biologique d'exposition
IC95% : Intervalle de confiance à 95 %
IFFSTAR : L'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
IgM : Immunoglobuline M
IL-1 β : Interleukine 1 β
IL-6 : Interleukine 6
IL-8 : Interleukine 8
INERIS : Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRS : Institut national de recherche et de sécurité
IST : Institut universitaire romand de Santé au Travail
LBA : Lavage broncho-alvéolaire
LDH : Lactate déshydrogénase
LT : Lymphocyte T
MA : Macrophages alvéolaires
MEDDTL : Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement
Micro-CRP : Micro-protéines C-réactives
MS : Spectrométrie de masse
NIOSH : National Institute of Occupational Safety and Health
OR : Odds ratio
PAT : Point à temps
PE : Polyéthylène
PmB : Bitumes polymères

PNN : Polynucléaires neutrophiles
PRGC : Peptide relié au gène de la calcitonine
REACH : Registration, evaluation, authorisation and restriction of chemical substances
RMN : Résonance magnétique nucléaire
RNV3P : Réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles
SARA : Saturés, Aromatiques, Résines et Asphaltènes
SBS : Styrène-Butadiène-Styrène
SCC : Carcinomes spinocellulaires
Sétra : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
SMR : Ratio standardisé de mortalité (Standardized Mortality Ratio)
SPRIR : Syndicat Professionnel Régional de l'Industrie Routière
TBA : Température bille et anneau
TSE : Tambour sécheur enrobeur
US EPA : United States Environmental Protection Agency
USIRF : Union des syndicats de l'industrie routière française
UVs : Ultra-violets
VADS : Voies aéro-digestives supérieures
VEMS : Volume expiratoire maximum seconde
VLB : Valeur limite biologique
VLEP : Valeur limite d'exposition professionnelle

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tonnage d'huile de houille depuis 2004 (d'après audition USIRF, 2011).....	43
Tableau 2 : Exemple de propriétés physico-chimiques d'un bitume pur (Eurobitumes and Asphalt Institute 2011; World Health Organization 2005).....	47
Tableau 3 : Composition élémentaire moyenne, exprimée en pourcentage de la masse totale des bitumes d'après la littérature (ACGIH 2011; Gasthauer, Maze <i>et al.</i> 2008; Speight 1992).....	47
Tableau 4 : Concentration en éléments métalliques dans certains bitumes (d'après audition Eurobitume, 2012)	48
Tableau 5 : Exemple de concentrations de HAP et de HAP soufrés dans un bitume	54
Tableau 6 : Concentrations en HAP (ppm ou $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) dans du bitume et du brai de houille (en ppm de BSM) (Brandt, de Groot <i>et al.</i> 1985).....	55
Tableau 7 : Principales coupes pétrolières potentiellement utilisées comme fluxants	58
Tableau 8 : Composition des principales huiles végétales potentiellement utilisées pour la fabrication de fluxants (Pinzi, Gandia <i>et al.</i> 2011; Singh and Singh 2010).....	59
Tableau 9 : Principaux polymères potentiellement employés dans la fabrication de liants bitumineux modifiés (LCPC 1999)	64
Tableau 10 : Notifications de classification disponibles sur le site de l'ECHA	72
Tableau 11 : Valeurs limites d'exposition professionnelle pour les fumées de bitumes (base GESTIS, 2013).....	75
Tableau 12 : Classifications UE et CIRC des 16 HAP classés polluants prioritaires par l'US EPA.....	76
Tableau 13 : Classifications harmonisées des principaux additifs utilisés dans les formulations de bitume	77
Tableau 14 : Auto-classifications des principaux additifs utilisés dans les formulations de bitume.....	78
Tableau 15 : Répartition de la nature des travaux entre 2008 et 2010 (USIRF 2012).....	80
Tableau 16 : Principales entreprises distributrices de bitume et de construction routière (d'après site internet USIRF)	80
Tableau 17 : Principaux enrobés utilisés actuellement	84
Tableau 18 : Quantités d'enrobés tièdes et semi-tièdes mises en œuvre	86
Tableau 19 : Les enrobés coulés à froid (d'après audition USIRF, 2011)	87
Tableau 20 : Production industrielle française des enrobés (USIRF 2012)	90
Tableau 21 : Les trois grandes familles d'asphalte coulé	94
Tableau 22 : Types de chantiers	95
Tableau 23 : Composition des revêtements en 1960.....	104
Tableau 24 : Evolution des produits et des techniques d'application.....	105
Tableau 25 : Les principaux types de collage	106
Tableau 26 : Tableau bilan des principaux produits et techniques	107
Tableau 27 : Evolution des quantités d'agrégats recyclés entre 2007 et 2010.....	108
Tableau 28 : Statistiques pour l'année 2006 sur le recyclage au niveau européen.....	109
Tableau 29 : Usage des matériaux recyclés en France pour l'année 2000	115
Tableau 30 : Classification des composés chimiques contenus dans les fumées de bitume (NIOSH 2000).....	123
Tableau 31 : Synthèse des émissivités des composés étudiés par Binet, Bonnet <i>et al.</i> (2002) calculées pour la concentration en fumées totale de $6,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	125
Tableau 32 : Concentrations des HAP (ppm ou $\mu\text{g}/\text{g}$) dans du bitume, du brai de houille et dans les fumées (en ppm de BSM) à partir du bitume et de brai de houille	129
Tableau 33 : Concentration (en $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$) des HAP dans les échantillons prélevés au cours des différentes études.	134

Tableau 34 : Niveaux d'exposition au naphtalène dans le secteur routier (ng.m^{-3}) (Maître 2013)	137
Tableau 35 : Niveaux d'exposition au pyrène total dans le secteur routier (ng.m^{-3}) (Maître 2013)	138
Tableau 36 : Niveaux d'exposition au benzo(a)pyrène dans le secteur routier (ng.m^{-3}) (Maître 2013)	138
Tableau 37 : Concentration de COV en mg.g^{-1} de condensats de fumées de bitume recueillies lors de génération de fumées à 170 °C (Vu-Duc, Huynh <i>et al.</i> 2007)	140
Tableau 38 : Concentrations de HAPS (en ppm ou $\mu\text{g/g}$) dans le bitume brut (origine Arabain) et dans les fumées générées à 170°C ($\mu\text{g/g}$ de vapeurs recueillies)	141
Tableau 39 : Indicateurs biologiques d'exposition identifiés dans la littérature	143
Tableau 40 : Synthèse des concentrations urinaires de pyrène inchangé et 1-hydroxypyrene mesurées dans des études de terrain et en population générale	145
Tableau 41 : Synthèse des concentrations urinaires du phénanthrène inchangé et des phénanthrènes monohydroxylés mesurées dans des études de terrain et en population générale	147
Tableau 42 : Synthèse des concentrations urinaires du naphtalène inchangé et des naphtalènes monohydroxylés mesurées dans des études de terrain et en population générale	149
Tableau 43 : Synthèse des concentrations urinaires du fluorène inchangé et des fluorènes monohydroxylés mesurées dans des études de terrain et en population générale	150
Tableau 44 : Synthèse des concentrations urinaires de 3-hydroxybenzo[a]pyrène mesurées dans des études de terrain et en population générale	151
Tableau 45 : Tableau récapitulatif des données exploitées	154
Tableau 46 : Synthèse des résultats d'extraction de la base de données COLCHIC.....	155
Tableau 47 : Approche comparative des postes de travail rapportés par grands types de procédés de mise en œuvre des produits bitumineux, suivant la nature des liants classiquement utilisés....	158
Tableau 48 : Concentrations atmosphériques (mg.m^{-3} pour les particules totales et solubles dans le benzène et $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les composés aromatiques polycycliques) mesurées individuellement d'après Tepper, Burr <i>et al.</i> (2006).....	167
Tableau 49 : Concentrations atmosphériques mesurées lors de travaux de construction routière d'après Norseth, Waage <i>et al.</i> (1991).....	169
Tableau 50 : Concentrations atmosphériques (mg.m^{-3}) en particules totales, particules alvéolaires, composés solubles dans le benzène et composés organiques volatils mesurés individuellement d'après Gamble, Nicolich <i>et al.</i> (1999).....	170
Tableau 51 : Risque de mortalité par troubles pulmonaires et pathologies respiratoires non malignes chez les travailleurs de la construction routière (pavers) d'après Burstyn, Boffetta <i>et al.</i> (2003a)	172
Tableau 52 : Résultats des paramètres biologiques mesurés dans les sécrétions nasales et les crachats des professionnels exposés ou non aux émissions de bitume d'après Raulf-Heimsoth, Pesch <i>et al.</i> (2007).....	175
Tableau 53 : Concentrations atmosphériques (mg.m^{-3} pour les particules totales et solubles dans le benzène et $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les HAP) mesurées individuellement d'après Ulvestad, Randem <i>et al.</i> (2007).....	176
Tableau 54 : Synthèse des données concernant les affections respiratoires chez l'homme en fonction des différentes expositions rapportées dans les études.....	177
Tableau 55 : Résultats des paramètres mesurés dans les 8 groupes d'animaux étudiés d'après Ma, Rengasamy <i>et al.</i> (2003)	180
Tableau 56 : Effets respiratoires non-néoplasiques.....	182
Tableau 57 : risque de mortalité par troubles cardiovasculaires (d'après Burstyn, Kromhout <i>et al.</i> (2005))	184
Tableau 58 : Protocole d'exposition utilisé par Anderson, Munson <i>et al.</i> (2008).....	187
Tableau 59 : Niveaux de preuve de cancérogénicité selon la nature du produit et le type d'application et classement du CIRC du potentiel cancérogène (IARC 2013)	190
Tableau 60 : caractérisation histologique et évolution des différents cancers cutanés	199

Tableau 61 : Synthèse des études de cohorte recensant des cancers cutanés chez des travailleurs exposés aux bitumes (CIRC 2011)..... 201

Liste des figures

Figure 1 : Catégories de produits composant les liants hydrocarbonés	34
Figure 2 : Bitume et dérivés.....	36
Figure 3 : Schéma récapitulatif de fabrication des bitumes et dérivés bitumineux (USIRF 2001)	39
Figure 4 : Goudrons, liants goudronneux et leurs dérivés (AFNOR 2007)	40
Figure 5 : Evolution de la consommation française estimée de bitume et de goudron pour le secteur routier sur la période 1910 – 1970 (Vaniscote 1993)	42
Figure 6 : Périodes d'utilisation des liants hydrocarbonés et de leurs dérivés.....	43
Figure 7 : Consommation mondiale de bitume en 2007	44
Figure 8 : Evolution de la consommation française métropolitaine globale de bitume depuis 1914 (d'après audition USIRF, 2011)	45
Figure 9 : Proportions de différentes fractions pétrolières obtenues à partir de différents pétroles bruts en fonction de leur gisement d'origine (d'après audition Eurobitume, 2012)	46
Figure 10 : Chromatogramme GC/MS comparatif entre les analyses d'un échantillon de fumées de bitume et d'un étalon contenant les 16 HAP de l'EPA.....	49
Figure 11 : Séparation des constituants du bitume par la méthode SARA	50
Figure 12 : Structures types des composés du bitume classés selon la méthode SARA (Gasthauer, Maze <i>et al.</i> 2008; Islas-Flores, Buenrostro-Gonzalez <i>et al.</i> 2006).	51
Figure 13 : Représentations schématiques des structures type « SOL » et « GEL » d'un bitume (Lombardi 2007a).....	52
Figure 14 : Structures et points d'ébullition à pression atmosphérique des 16 HAP classés par l'US EPA comme polluants prioritaires.....	53
Figure 15 : Structure des fluxants agrochimiques	59
Figure 16 : Principe de la siccation de l'acide oléique.....	60
Figure 17 : Principe de réticulation des acides gras hydroxylés par des époxydes ou des anhydrides.....	60
Figure 18 : Effet d'un dope d'adhésivité sur la cohésion granulat-liant.....	61
Figure 19 : Structures des principales classes d'amines employées en tant que dopes d'adhésivité..	62
Figure 20 : Imidazolines et pyrimidines employées en tant que dopes d'adhésivité	62
Figure 21 : Molécules à caractère tensio-actif et micelles de bitume dans l'eau	67
Figure 22 : Structures chimiques des principales amines employées pour la fabrication d'émulsions cationiques.....	67
Figure 23 : Principe schématique de la formation du film de liant à partir d'une émulsion aqueuse	68
Figure 24 : Structure d'une chaussée (d'après audition USIRF, 2011).....	81
Figure 25 : Température de fabrication des enrobés tièdes et semi tièdes (d'après audition USIRF, 2011).....	85
Figure 26 : Utilisation des enrobés en France et en Europe (GPB 2005).....	87
Figure 27 : Mise en œuvre d'un enrobé à chaud (d'après audition USIRF, 2011)	88
Figure 28 : Mise en œuvre des enrobés coulés à froid (d'après audition USIRF, 2011)	89
Figure 29 : Les divers types de structures d'enduit superficiel	91
Figure 30 : Mise en œuvre d'un enduit superficiel (d'après audition USIRF, 2011)	92
Figure 31 : Exemple de centrale d'enrobage discontinue (classique) (Sebben Paranhos 2007)	99
Figure 32 : Exemple de centrale de type TSE équilibrant (Sebben Paranhos 2007)	100
Figure 33 : Centrale d'enrobage de type TSE contre-courant (Sebben Paranhos 2007)	101
Figure 34 : Le complexe d'étanchéité	103
Figure 35 : Modélisation des émissions de bitume étudiées en laboratoire	121

Figure 36 : Emissivité de chaque HAP en fonction de leur point d'ébullition, d'après Binet, Bonnet <i>et al.</i> (2002).....	126
Figure 37 : Caractérisation par Fh-ITEM des fractions aérosols et vapeurs.....	127
Figure 38 : Système d'échantillonnage des HAP dans les émissions de bitumes.....	130
Figure 39 : Relation dose-réponse entre l'activité IgM et les doses de condensat appliquées sur la peau (d'après Anderson, Munson <i>et al.</i> (2008)).	188

1 Contexte, objet et modalités de traitement de la saisine

1.1 Contexte

Les bitumes sont des résidus de raffinage du pétrole utilisés principalement pour les travaux routiers. Le bitume constitue l'ingrédient principal voire exclusif d'un liant, la partie continue qui assure la cohésion d'un revêtement (routier, d'étanchéité de toiture...). La formulation et la mise en œuvre de ce matériau sont très variées, et en constante évolution.

La consommation moyenne annuelle française de bitume est estimée à plus de 3 millions de tonnes (entre 2000 et 2010), avec une part de plus de 90 % consacrée aux applications routières (majoritairement l'entretien des voies existantes), les 10 % restant concernant les applications industrielles (activités d'étanchéité et d'isolation).

Les domaines d'activités qui exposent à ce matériau comptent de nombreuses professions et emploient un nombre important de salariés. Dès lors, les acteurs industriels et ceux de la prévention sont attentifs au risque sanitaire lié aux produits bitumineux et leurs additifs sur les travailleurs. Certains signaux d'alerte observés récemment ont amené les représentants de la Fédération nationale des salariés de la construction - Confédération générale du travail (FNSC-CGT) à prendre l'initiative de porter ce sujet à l'attention de l'Anses.

1.2 Objet de la saisine

L'Anses a été saisie, en date du 19 novembre 2008, par la Fédération nationale des salariés de la construction - Confédération générale du travail (FNSC-CGT) afin de synthétiser les enquêtes menées sur les produits utilisés pour la réalisation des routes et d'évaluer les risques sanitaires sur l'Homme.

Cette demande a été jugée recevable par l'Anses qui, au vu du nombre de salariés concernés par l'utilisation de ce type de matériau, a décidé d'étendre le champ d'expertise ciblé par la FNSC-CGT en réalisant une évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs.

Les travaux du GT de l'Anses se sont organisés suivant deux phases distinctes. La première phase est basée sur une analyse critique de la littérature visant à dresser un état de l'art sur la nature des composés contenus dans et émis par les produits bitumineux et leurs additifs au cours des différentes opérations de mise en œuvre (décrites également), les données d'exposition des travailleurs à ces produits ainsi que les effets sanitaires associés.

Dans une seconde phase, les experts se sont attachés, sur la base des informations disponibles, à mettre en perspective les données sanitaires dans une démarche qualitative globale d'évaluation des risques sanitaires, avec un recensement et une analyse des données d'exposition en considérant les postes de travail.

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au GT « Evaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs », rattaché au comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » l'instruction de cette saisine.

Le CES « Evaluation des risques liés à l'air » a également été consulté.

La réalisation des travaux pour ce rapport s'est également appuyée sur les compétences de différentes unités de l'Anses : évaluation des dangers et des risques des substances, observatoire des substances et de leur substitution, REACH-CLP ainsi que la mission du réseau national de vigilance et de prévention des pathologies professionnelles (RNV3P).

L'Anses a été autorisée, en tant qu'organisme représentatif, à assister aux travaux d'évaluation et aux délibérations du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) sur *le risque cancérigène pour l'Homme lié aux bitumes, à leurs fumées, et à quelques hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)*, du 11 au 18 octobre 2011, dans le cadre de la réalisation de la monographie 103.

L'agence a respectivement auditionné les représentants de :

- La Caisse d'Assurance Retraite et de la Santé au Travail (CARSAT) des Pays de Loire, le 23 septembre 2011 ;
- La médecine du travail du secteur du bâtiment et des travaux publics, le 6 octobre 2011 ;
- La Fédération nationale des salariés de la construction (FNSC-CGT), le 6 octobre 2011 ;
- L'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFFSTAR), le 9 novembre 2011 ;
- La faculté de médecine et santé au travail de Grenoble, le 9 novembre 2011 ;
- L'union des syndicats de l'industrie routière française (USIRF), le 16 décembre 2011 ;
- L'association européenne des producteurs de bitumes (Eurobitume), le 17 janvier 2012 ;
- La Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité (CSFE), le 3 février 2012 ;
- L'office des asphaltes, le 5 avril 2012.

Une convention de recherche et de développement (CRD) a été contractée avec l'Institut universitaire romand de Santé au Travail (IST) afin d'étudier l'interaction des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) du bitume et des ultra-violets (UV) sur la peau humaine et le risque de cancer de la peau.

Une CRD a été contractée avec le centre hospitalo-universitaire (CHU) de Grenoble afin d'évaluer les niveaux actuels (atmosphériques et biologiques) d'exposition professionnelle aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) pendant la production et l'application des bitumes (routes et toitures) puis de comparer ces niveaux aux données plus anciennes publiées dans la littérature.

Les travaux d'expertise du GT ont été soumis régulièrement au CES « Evaluation des risques liés aux substances chimiques », tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques. Le rapport produit par le GT tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux d'expertise sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (Mai 2003) »

1.4 Champ d'expertise de l'étude

Les travaux du GT de l'Anses ont porté en priorité sur la construction et l'entretien des routes, y compris en atmosphère confinée (tunnels, parkings souterrains, etc.). Les cas particuliers tels que les ouvrages d'art (ponts, viaducs, etc.), les stations-services et les tarmacs d'aéroport ont également été abordés. Seuls les chantiers menés en France sont concernés.

Concernant les chantiers routiers, le champ d'expertise considère les activités professionnelles depuis la centrale d'enrobage jusqu'à la pose du revêtement. Les opérations de recyclage des matériaux ont également été prises en compte.

En parallèle, un focus a été réalisé sur les activités d'étanchéité dans le secteur du Bâtiment et des travaux publics (BTP), hormis les procédés de production des enrobés bitumineux et des matériaux utilisés dans le domaine de l'étanchéité.

Les produits étudiés comprennent :

- Les liants hydrocarbonés, pétroliers ou non-pétroliers, présents dans les activités professionnelles précitées, toutes techniques confondues, avec un historique de l'évolution des pratiques et des produits utilisés ;
- Les additifs chimiques ou physiques présents dans ces produits lors de l'arrivée en centrale d'enrobage, ainsi que ceux rajoutés avant utilisation sur chantier.

2 Définitions et historique

Le champ du vocabulaire technique employé autour des produits hydrocarbonés est vaste et complexe. L'objectif du présent chapitre est double. Il est destiné d'une part à fournir au lecteur les éléments terminologiques, tirés d'ouvrages normatifs et professionnels, nécessaires à la compréhension de ce rapport, et utilisés par les experts de l'Anses pour le traitement de la présente étude. Il permettra également de se familiariser avec les usages des matériaux décrits et d'appréhender les différences de composition des liants hydrocarbonés auxquels les travailleurs sont actuellement exposés ou ont pu l'être par le passé. En effet, le champ de cette saisine ne se réduit pas à une seule substance bien identifiée (par une structure, un numéro CAS, un numéro EINECS ou autre), mais cible une famille de composés dont la dénomination commune « bitumes » masque une importante variabilité dans les substances chimiques considérées.

2.1 Base terminologique

2.1.1 Définition des liants hydrocarbonés

Le terme liant hydrocarboné désigne une substance organique composée majoritairement d'assemblages d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact de particules solides, développe des forces d'adhésion et de cohésion conférant au matériau qui la contient un comportement rigide, résistant à la déformation mécanique (USIRF 2001). Les liants hydrocarbonés peuvent contenir du bitume, du goudron de houille, ou un assemblage des deux (Figure 1) (AFNOR 2002a).



Figure 1 : Catégories de produits composant les liants hydrocarbonés

2.1.2 Confusions terminologiques

Les termes « asphalte », « bitume » et « goudron » sont communément confondus dans la langue française, notamment en raison de l'aspect similaire du produit qu'ils désignent, et parce que notre langue a utilisé par le passé le mot « goudron de pétrole » pour désigner le bitume ou l'asphalte. Pour illustration, nombre d'entreprises indépendantes dites de « goudronnage » sont sollicitées en France pour déposer un « enrobé d'asphalte » ou de bitume dans l'allée d'un particulier...

En effet, les similitudes dans l'aspect physique du goudron de houille et du bitume induisent facilement en erreur. Bien que toutes deux brun-noir, visqueuses et collantes, ce sont des substances très différentes de par leur composition chimique, leur origine et leurs propriétés. Il existe des différences majeures entre ces produits, notamment en termes de concentrations en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dont certains sont des cancérogènes suspectés voire avérés.

La confusion ne s'arrête pas à nos frontières et l'utilisation anglo-saxonne de ces termes est également ambiguë puisque le terme « asphalt » ou « cement asphalt » est utilisé pour

qualifier le bitume employé dans les travaux routiers. En revanche, l'appellation du goudron se traduit plus clairement par « coal tar ». Ces termes rendent parfois difficile l'interprétation des différentes publications dans lesquelles il n'est pas toujours simple de savoir exactement quel type de produit est effectivement considéré.

Il existe également des définitions différentes associées au même mot : la terminologie française du mot « asphalte » est utilisée à la fois en géologie pour décrire une roche calcaire contenant du bitume, ainsi qu'en milieu routier comme raccourci de l'asphalte coulé, mélange de gravillons, sable, filler et bitume, qui est utilisé comme matériau de revêtement mais ne provient pas forcément d'un gisement naturel d'asphalte au sens géologique.

2.1.3 Les liants bitumineux naturels et pétroliers

2.1.3.1 Généralités

Le terme liant bitumineux définit un matériau adhésif contenant du bitume (AFNOR 2002a). Ce dernier, de couleur brun-foncé à noir et de viscosité variable, peut être soit d'origine naturelle, le plus souvent associé à des substances minérales, soit d'origine industrielle après raffinage et traitement de pétroles bruts.

A l'état naturel, le bitume est présent dans l'asphalte, roche le plus souvent calcaire imprégnée à cœur d'hydrocarbures lourds dans des proportions variant de 5 % à 20 % suivant les gisements (Lombardi 2007b). La poudre d'asphalte s'utilise par ailleurs dans l'industrie routière comme additif physique des enrobés bitumineux afin de donner un rendu lisse. Il arrive également que des bitumes naturels remontent à la surface pour s'accumuler et constituer des « sources » (voir illustration ci-après).



Source naturelle de la Poix, Puy-de-Dôme

Les propriétés des bitumes pétroliers dépendent fortement de leur constitution, elle-même liée à l'origine des bruts et aux traitements effectués lors de leur fabrication en raffinerie. Les bitumes ainsi obtenus seront classés en deux catégories principales : les bitumes routiers ou « purs » et les bitumes industriels.

Les autres catégories regroupent les bitumes dont les propriétés physiques ont été modifiées par ajout d'un ou plusieurs additifs chimiques (Figure 2).

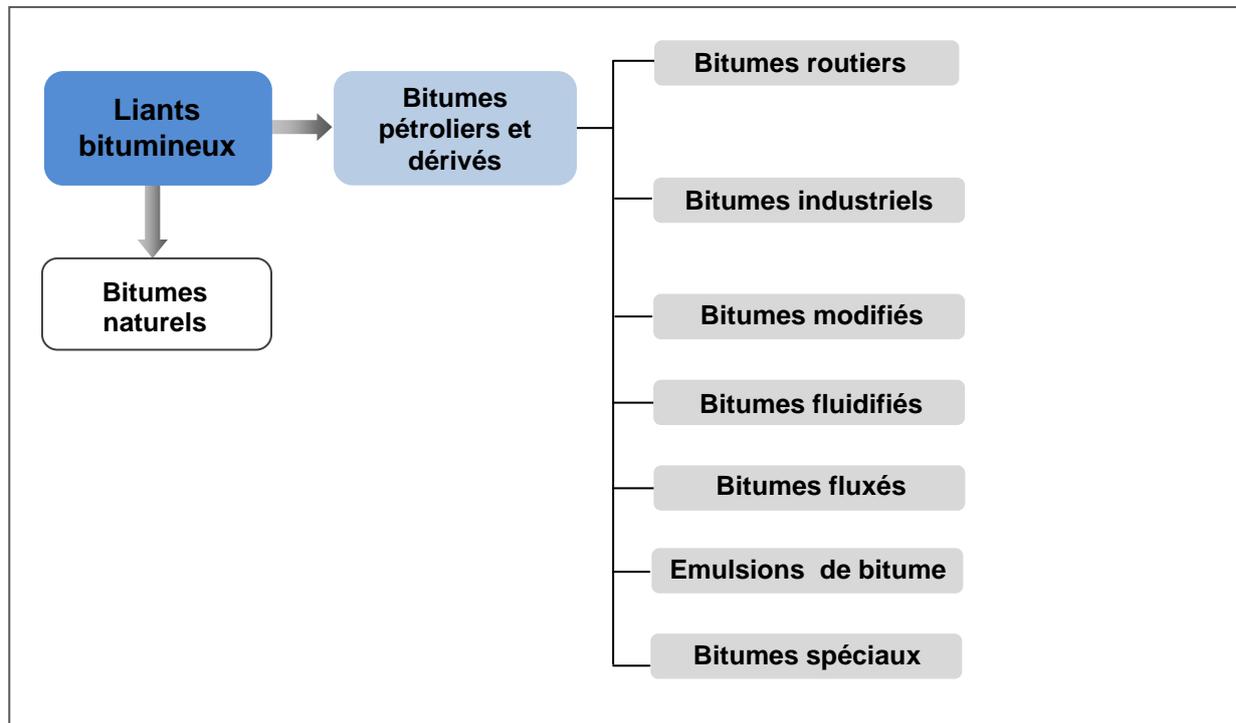


Figure 2 : Bitume et dérivés

2.1.3.2 Les bitumes pétroliers

Différents types de bitumes peuvent être obtenus selon le brut d'origine et le procédé de fabrication employés ; le référencement au Chemical Abstract Service (CAS) des bitumes découle de ces différents procédés. A titre indicatif, l'origine des numéros CAS des principaux types de bitumes utilisés sont données en Annexe 2.

Les bitumes routiers

Ce sont les bitumes utilisés pour l'enrobage des granulats destinés à la construction et l'entretien des routes, ainsi que des structures assimilées (USIRF 2001). Le type de bitume le plus couramment rencontré subito après distillation un désasphaltage, c'est-à-dire un durcissement par l'extraction au propane de sa fraction huileuse. Ce type de bitume est associé au numéro CAS 8052-42-4 (Annexe 2).

Les bitumes routiers sont classés en fonction de leur pénétrabilité (test à l'aiguille décrit en Annexe 3) qui en caractérise la dureté. A une température donnée, plus la valeur de sa pénétrabilité est faible, plus un bitume va être dur. Ainsi, un bitume classé 20/30 sera considéré comme dur et un 160/220 comme mou.

En jouant sur les paramètres de température, de débit et de pression du procédé de distillation, le fabricant est en mesure d'obtenir toutes les classes de bitumes.

Le mélange, dans les bonnes proportions, de bitumes de pénétrabilités différentes issus de deux distillations distinctes, permet aussi d'obtenir toutes les classes intermédiaires de bitumes afin de répondre au mieux aux demandes des futurs chantiers.

Dans certains cas, la distillation directe ainsi que le désasphaltage du résidu sous vide ne permettent pas de fabriquer des bitumes aux caractéristiques requises en raison de la nature des bruts à bitume utilisés ou suivant le type de colonne de distillation utilisée. Le raffineur complètera le processus de transformation en pratiquant une rectification à l'air (semi-soufflage) consistant à faire buller de l'air dans du bitume mou à haute température pour rendre ce dernier plus dur (numéro CAS 64742-93-4). (cf Annexe 2) (USIRF 2001)

Les bitumes industriels

Ce sont généralement des bitumes classés en fonction de leur point de ramollissement (défini dans l'Annexe 3). Ils sont fabriqués de la même façon que les bitumes routiers mais ont des valeurs de pénétrabilité plus faibles et des points de ramollissement plus élevés. Ils sont destinés à des applications autres que celles intervenant dans l'activité de construction et d'entretien des routes, et autres structures assimilées (AFNOR 2002a; CONCAWE 1992), telles que l'étanchéité des toitures ou l'isolation.

Les dérivés bitumineux

Les liants dérivés du bitume possèdent, en général, une viscosité inférieure à celle du bitume seul et sont destinés à des applications à température plus basse.

Les bitumes fluidifiés (cut backs) : Ce sont des bitumes dont la viscosité a été réduite par l'addition d'un solvant assez volatil dérivé du pétrole (AFNOR 2002a) (fluidifiant, généralement du kérosène). Ils sont de ce fait plus fluides et plus facile à manipuler. Une fois l'application terminée, ils reprennent leurs caractéristiques physico-chimiques initiales après l'évaporation du solvant. Certains d'entre eux peuvent même être appliqués à température ambiante (GPB 2005).

Avant les années 1960, le bitume a été principalement utilisé sous cette forme permettant de réaliser principalement des enduits superficiels (USIRF 2001). Cependant, la volatilité du fluidifiant posant des problèmes environnementaux et de sécurité (inflammabilité), les bitumes fluidifiés ont en principe aujourd'hui disparu du marché français.

Les bitumes fluxés : Ce sont des bitumes dont la viscosité a été réduite par l'ajout d'une huile de fluxage dite « fluxant » (AFNOR 2002a). Ce type de bitume est mis en œuvre à une température supérieure à 100 °C. La partie la plus légère du fluxant s'évapore tandis que la plus lourde a pour rôle de plastifier le liant (GPB 2005).

Ces huiles de fluxage, longtemps d'origine carbochimique (coupes de distillation de goudron de houille), sont actuellement pétrolières (distillats éventuellement hydrotraités), pétrochimiques (résidus de vapocraquage redistillés) ou agrochimiques (huiles végétales ou synthétiques) (Sétra 2006b).

Les bitumes fluxés sont utilisés essentiellement pour les enduits superficiels ainsi que dans un grand nombre d'applications ponctuelles et de faibles surfaces en travaux d'entretien.

Les bitumes composés : Ce sont les bitumes-goudrons et bitumes-brais (généralement 60 % de bitume) alliant les qualités du goudron (adhésivité aux granulats) et celles du bitume (meilleur vieillissement) (LCPC 1975).

Les bitumes modifiés : Il s'agit des bitumes dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées pendant la fabrication par l'emploi d'un ou plusieurs agents chimiques. Plus précisément, ces agents chimiques comprennent le caoutchouc naturel, les polymères synthétiques (élastomères et plastomères), le soufre et certains composés organométalliques (AFNOR 2002a).

En pratique, le liant est toujours majoritaire dans la composition finale. On parlera ainsi de bitume-soufre, bitume-polymère, etc.

Les bitumes modifiés peuvent être, comme les bitumes purs, utilisés sous forme fluidifiée, fluxée ou en émulsion.

Les émulsions bitumineuses : Ce sont de fines gouttelettes de bitume dispersées dans un milieu aqueux, stabilisées par un émulsifiant (tensioactif). Après épandage, la disparition de l'eau par évaporation et ruissellement entraîne la rupture de l'émulsion et le liant reste seul au contact des agrégats (GPB 2009).

Leur formulation chimique a évolué au cours du temps : initialement anioniques, parfois non ioniques, elles sont actuellement quasi exclusivement cationiques. La majorité d'entre elles sont formulées à partir de bitume pur mais celui-ci peut être aussi modifié voire fluxé. Elles sont utilisées pour la réalisation de couche d'accrochage, d'enduit superficiel, d'enrobé coulé à froid, etc (GPB 2006). Leur mise en œuvre s'effectue à des températures modérées (< 80 °C) voire ambiantes (GPB 2005).

Les bitumes spéciaux : Les bitumes spéciaux sont fabriqués au moyen de procédés et, à partir de bases choisies, afin de leur conférer des propriétés particulières les rendant aptes à répondre à certaines exigences plus rigoureuses imposées pour des applications routières ou industrielles (Lombardi 2007b). Cette définition inclut, de façon non limitative (AFNOR 2002a) :

- Les bitumes multigrades : leurs propriétés rhéologiques apportent une réponse au risque d'orniérage (déformations permanentes) tout en assurant une bonne résistance à la fissuration thermique (Lombardi 2007b) ;
- Les bitumes émulsionnables : ce sont des bitumes qui permettent de fabriquer une émulsion, cationique ou anionique suivant le cas, de bonne qualité, dans des conditions normales de formulation et de dispersion (Lombardi 2007b) ;
- Les bitumes pigmentables : ce sont des liants de couleur claire permettant de réaliser des enrobés colorés par ajout de pigment.

Tous ces bitumes ne font pas l'objet d'une norme de spécifications (Lombardi 2007b). Ainsi, il est possible de rencontrer d'autres bitumes présentés comme étant des bitumes spéciaux. Par exemple, les bitumes purs de pénétration 10/20 ou 15/25 ou encore les bitumes à résistance améliorée aux hydrocarbures (antikérosènes) qui sont utilisés à des endroits soumis à des agressions importantes dues aux épandages accidentels d'hydrocarbures (tarmacs, stations services) (BP Bitumes France 28/07/2012).

La Figure 3 illustre les différents procédés de fabrication des bitumes et dérivés bitumineux précédemment cités.

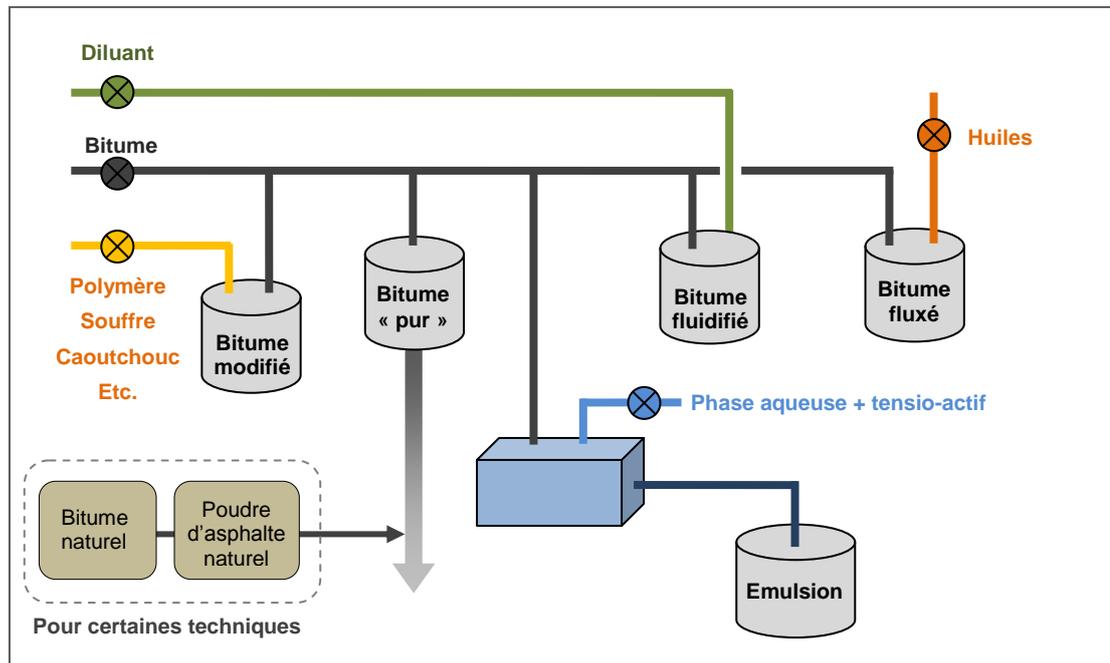


Figure 3 : Schéma récapitulatif de fabrication des bitumes et dérivés bitumineux (USIRF 2001)

2.1.4 Les goudrons et liants goudronneux

La seconde grande famille de produits qui composent les liants hydrocarbonés comprend essentiellement les goudrons de houille et leurs dérivés.

Dans le cas des travaux routiers et autres activités industrielles présentes ou passées utilisatrices de goudron, cinq types de produits sont particulièrement concernés (Figure 4). Dans le cadre de la présente expertise, ne seront pris en compte que les goudrons bruts, les huiles de fluxage issues du goudron et les liants routiers à base de goudron ou de son résidu de distillation, le brai de houille.

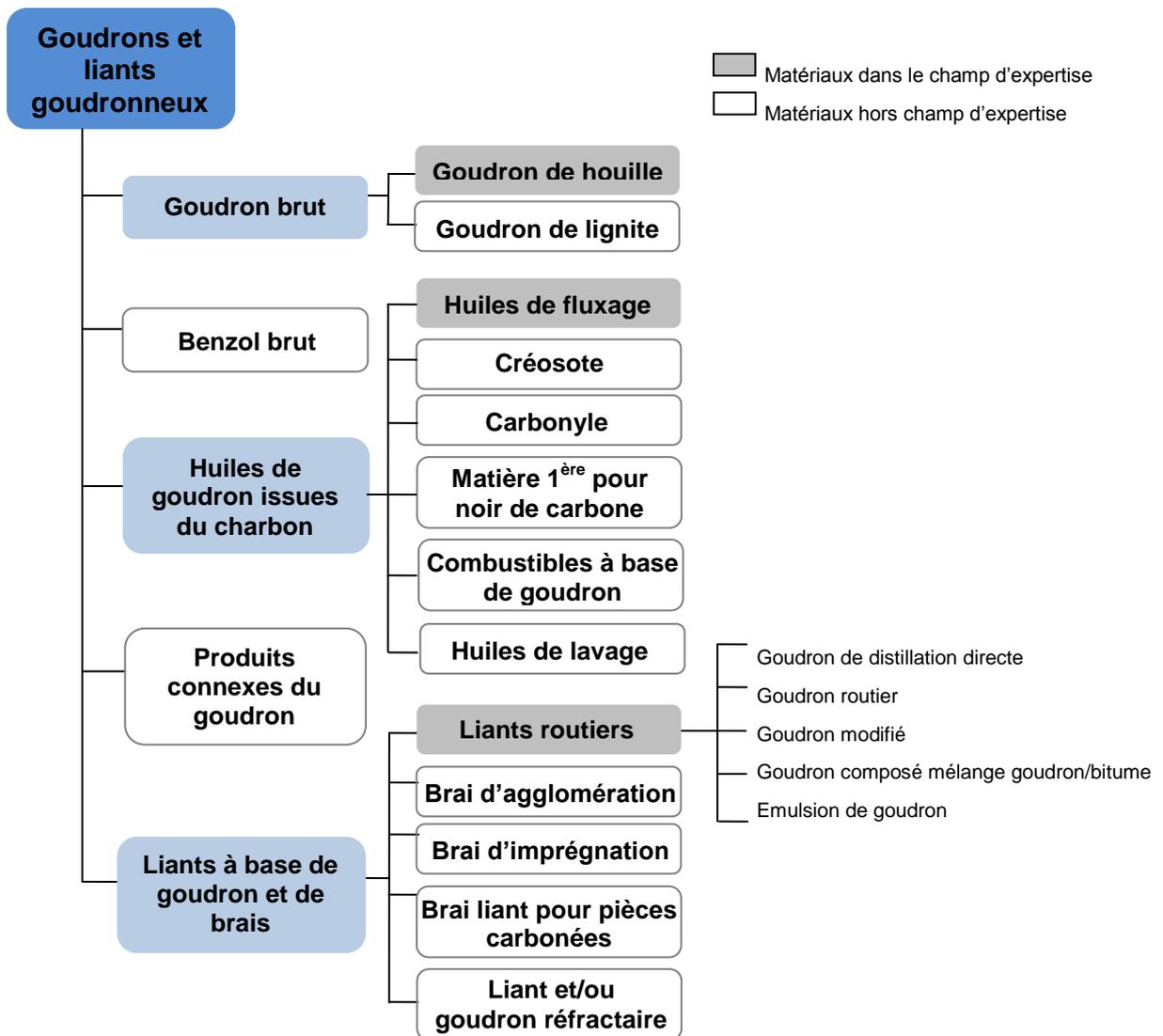


Figure 4 : Goudrons, liants goudronneux et leurs dérivés (AFNOR 2007)

Les goudrons

Le goudron de houille, appelé aussi communément goudron, est un sous-produit de la transformation, à des températures extrêmement élevées (> 1000 °C), de la houille en coke. Il a été largement utilisé comme agent liant dans l'asphalte de route de 1900 à 1930, d'abord comme revêtement anti-poussière, avant d'être communément employé dans l'entretien des routes.

Le goudron de houille a été systématiquement utilisé quel que soit le type de chaussée en France, notamment en raison de ses caractéristiques techniques de visco-élasticité, adhésivité et cohésion. Bien qu'aucun document ne fasse état des quantités et types de matériaux goudronnés utilisés à l'époque dans la construction et l'entretien du réseau routier français, il est probable que les tronçons de route construits sur la première moitié du siècle dernier contiennent actuellement du goudron dans leurs couches inférieures.

Les huiles de fluxage

Elles sont issues de coupes de distillation du goudron plus ou moins lourdes (distillats allant de 200 à 350 °C) et comprenant les huiles dites « acénaphéniques », « anthracéniques » et « chryséniques » utilisées seules ou en mélange.

La teneur de ces huiles, de dénominations techniques bien spécifiques (Huile F1B, Huile 200-300, Huiles V ou E) est d'environ 10 % du liant prêt à l'emploi.

Les liants routiers à base de goudrons et de brais

Ces liants, sont en fait des goudrons "reconstitués" (appelés aussi "brais fluides") : brais fluxés par des huiles de houille issues de coupes de distillation plus ou moins visqueuses pour obtenir un goudron de la qualité désirée (LCPC 1975).

Ce goudron reconstitué peut être utilisé pur, modifié par ajouts divers (polymères par ex. goudron-vinyle, goudron-époxy), ou composé (mêlé à une proportion moindre de bitume) (Beck 1950).

Sa mise en œuvre se fait sous forme d'émulsion, principalement pour les enduits superficiels, ou sous forme d'enrobés (tarmacadam) : agrégats type laitier de haut-fourneaux liés avec 5 à 7 % de goudron.

2.2 Historique des liants hydrocarbonés

Les origines des premières utilisations des liants hydrocarbonés remontent à l'antiquité. Nombre d'ouvrages rédigés par les historiens décrivent les usages et l'évolution de ces produits au cours du temps. Dans le cas présent, sont évoquées uniquement les grandes étapes de la période précédant la seconde guerre mondiale jusqu'à nos jours. Cette période est synonyme d'évolutions technologiques majeures et constitue un élément clef dans la compréhension de la transition progressive de l'utilisation des produits issus de la pyrolyse de la houille (goudron et dérivés) vers les produits issus de la distillation du pétrole (bitume et dérivés).

2.2.1 Premières applications industrielles des liants hydrocarbonés : la fabrication et l'entretien des routes

L'année 1862 marque l'invention du moteur à explosion qui donnera naissance à l'automobile. La poussière engendrée par les routes de l'époque constituant une gêne importante, l'état français en demandera le revêtement à partir de 1901. Ainsi, depuis le début du XX^{ème} siècle, le goudron brut ainsi que le goudron "étêté" (goudron débarrassé de ses fractions légères par distillation partielle) sont restés très majoritaires, en raison notamment de l'amélioration des techniques de stockage et d'épandage du goudron. Egalement rentable pour la construction et l'entretien du réseau routier français, qui comptait déjà parmi les plus vastes du monde, l'utilisation du goudron de houille en enduits superficiels et comme liant des granulats dans les enrobés routiers a été systématique quel que soit le type de chaussée en France et ce, jusqu'à la seconde guerre mondiale.

2.2.2 Transition progressive et définitive du goudron au bitume

Après guerre, l'utilisation d'émulsions de bitume pour la fabrication d'enrobés bitumineux, très sporadique jusqu'alors, a commencé à se développer, d'abord par la construction de pistes d'aéroport, l'enrobage de ports de commerce, etc. Cette période verra s'amorcer la montée en puissance de l'industrie pétrolière et la découverte de nouveaux types de liants bitumineux.

De 1950 à 1960, l'entretien des chaussées, des routes nationales ou départementales est toujours essentiellement réalisé avec des enduits superficiels au goudron, au brai fluxé par

des huiles de houilles (goudron reconstitué) et à l'émulsion anionique, puis rapidement cationique, de bitume.

Au cours de la décennie suivante, l'abandon progressif des mines de charbon et définitif des usines à gaz, l'explosion du marché de l'automobile, la densification du réseau routier ainsi que la prise de conscience par les pétroliers que l'utilisation des bitumes pour les activités routières et d'étanchéité constitue un marché captif important, amènera inexorablement au remplacement des produits goudronneux par les liants bitumineux.

La faible traçabilité des informations sur les quantités de goudron de houille utilisées à cette époque pour la construction de chaussées ne permet pas de placer précisément la période de transition dans le continuum goudron/bitume (utilisation mixte durant des décennies par la diminution de l'usage de goudron et par son remplacement progressif par les bitumes). On estime cependant que cette dernière se situerait entre 1945 et 1950 (Figure 5).

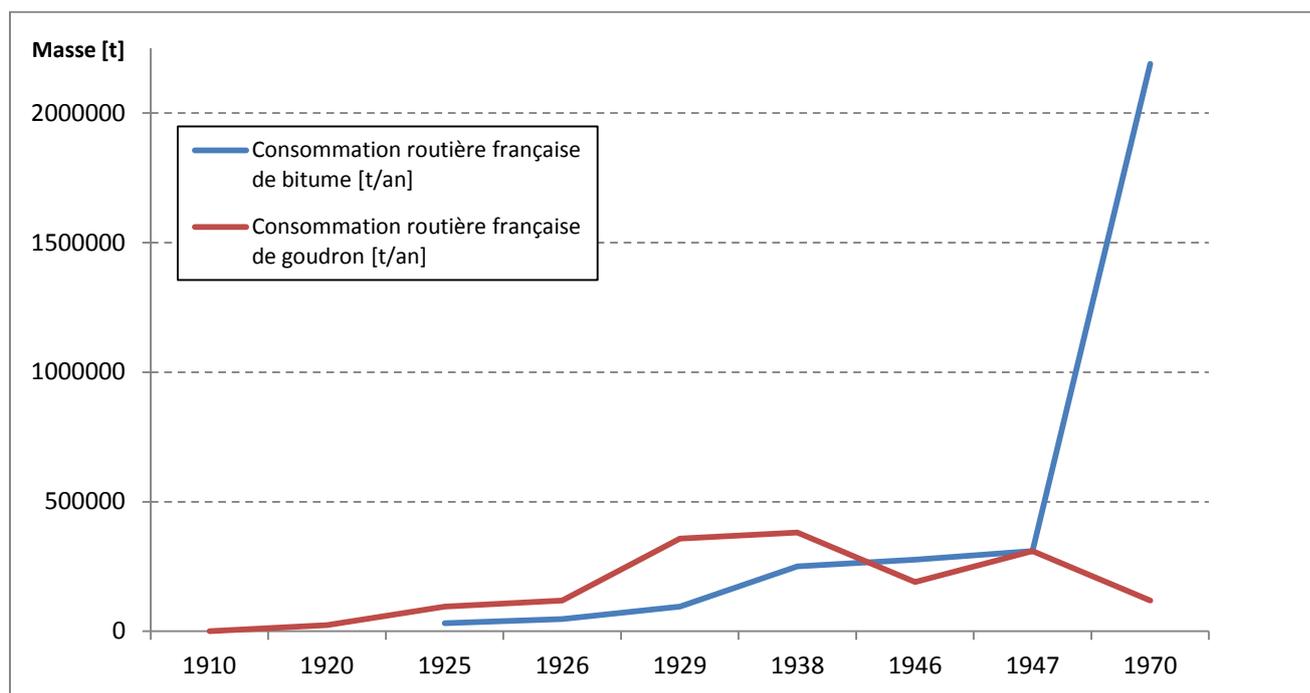


Figure 5 : Evolution de la consommation française estimée de bitume et de goudron pour le secteur routier sur la période 1910 – 1970 (Vaniscote 1993)

A partir des années 70, l'utilisation des dérivés du goudron se restreint à l'incorporation d'huiles de fluxage dans les enduits superficiels, aux mélanges bitumes-goudrons et bitumes-brais et enfin aux revêtements anti-kérosènes (tarmacs d'aéroport, stations-service, parkings et revêtements de sols industriels). En effet, le goudron, à l'inverse du bitume, résiste aux solvants pétroliers (carburants et huiles).

A partir des années 1980, les bitumes composés (bitumes-goudrons et bitumes-brais) disparaissent progressivement (Sétra and LCPC 1995). On observe ensuite, sur la période 1990 à 2000, une diminution de l'utilisation de fluxants houillers au profit des fluxants pétroliers puis agrochimiques, ainsi que l'abandon quasi-définitif des anti-kérosènes à base de goudrons remplacés par des bitumes polymères (PmB) résistants aux solvants pétroliers.

Sur l'ensemble de la production annuelle de l'année 2001, seulement 24000 tonnes d'huiles de houille (d'après audition USIRF, 2011) ont été orientées vers le marché de la construction routière pour l'élaboration de fluxants, et ces produits ne sont plus commercialisés depuis 2010 (Tableau 1).

Tableau 1 : Tonnage d'huile de houille depuis 2004 (d'après audition USIRF, 2011)

Année	Huiles de houille [t]	Liants produits: émulsions et liants d'enrobage [t]
2004	9 000	1 290 000
2005	7 980	1 270 000
2006	6 820	1 270 000
2007	5 580	1 290 000
2008	3 020	1 170 000
2009	1 630	1 150 000
2010	300***	1 120 000
2011	0**	1 120 000 *

* estimation

** produit retiré du catalogue de la société VFT

***usage non routier (données de la société VFT)

En 2006, le Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (Sétra), service technique du ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement, chargé d'évaluer les impacts sanitaires des produits fluxants, fluidifiants et anti-kérosènes, a établi un inventaire de l'ensemble de ces produits utilisés dans la construction et l'entretien des routes. Mis à jour en mai 2011, cet inventaire recense au total cinq produits d'origine carbochimique, utilisés comme fluxant ou anti-kérosène, et pour lesquels une recommandation d'arrêt d'utilisation a été formulée depuis la transposition en droit français de la 29^{ème} adaptation au progrès technique de la directive 67/548/CE par arrêté du 4 août 2005 (cf. Annexe 4) (Sétra 2006b).

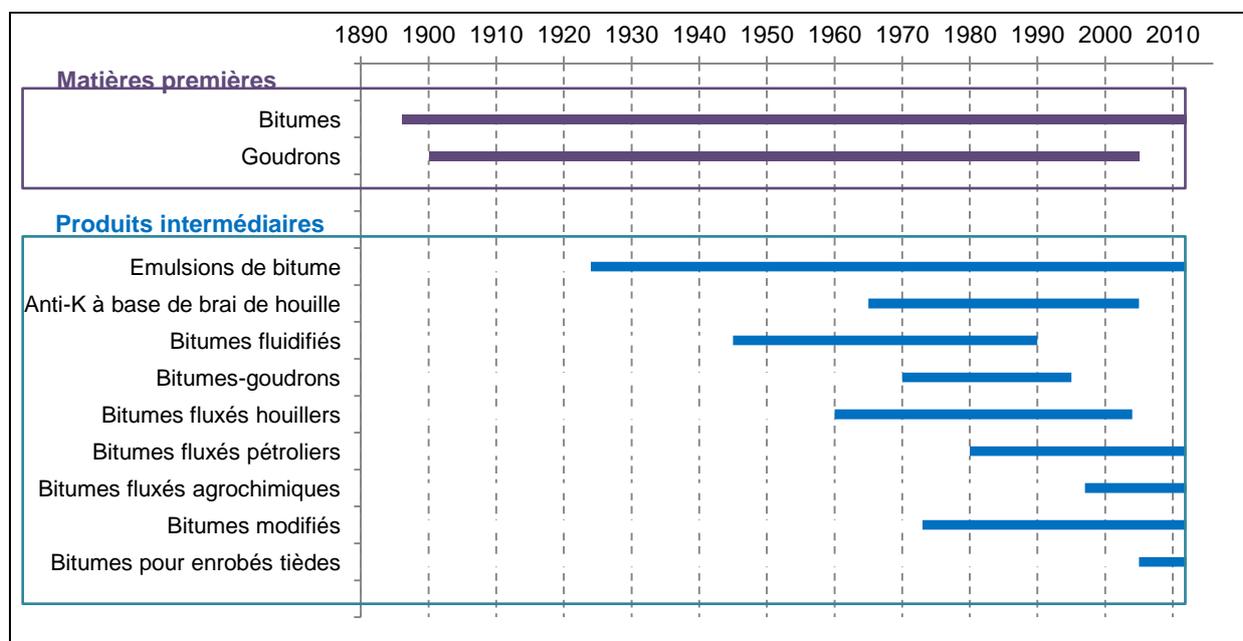


Figure 6 : Périodes d'utilisation des liants hydrocarbonés et de leurs dérivés

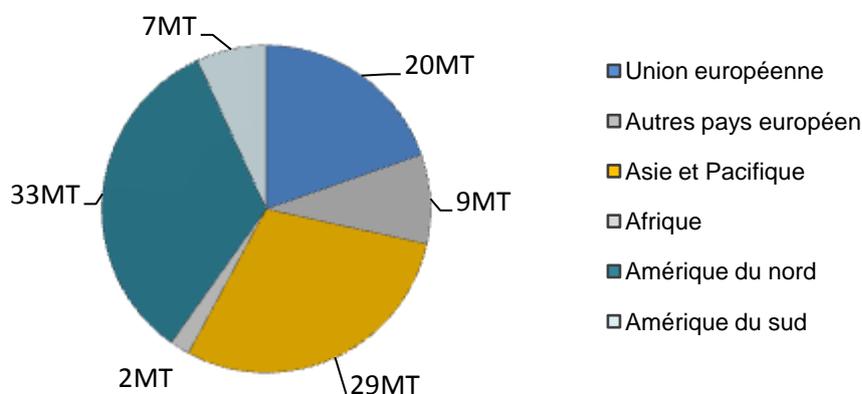
Le chronogramme ci-dessus (Figure 6) illustre l'abandon progressif des produits d'origine houillère au profit de liants et d'additifs issus de la pétrochimie et de l'agrochimie.

L'arrêt de l'utilisation d'un produit en milieu industriel se faisant de façon progressive, ces périodes ne sont qu'une estimation, à quelques années près, de la réalité.

2.3 Quelques données sur la consommation et les utilisations du bitume

2.3.1 Consommation de bitume

En 2007, la consommation mondiale de bitume était de 102 millions de tonnes par an, dont 20 millions pour l'Union Européenne (Figure 7).



**Figure 7 : Consommation mondiale de bitume en 2007
(Eurobitumes and Asphalt Institute 2011)**

La consommation française tous secteurs d'activités confondus, n'a cessé d'augmenter jusqu'en 1973 avant de souffrir des crises pétrolières successives entre 1973 et 1985. En moyenne, de 2000 à 2010, 3,3 millions de tonnes ont été consommées par an (Figure 8).

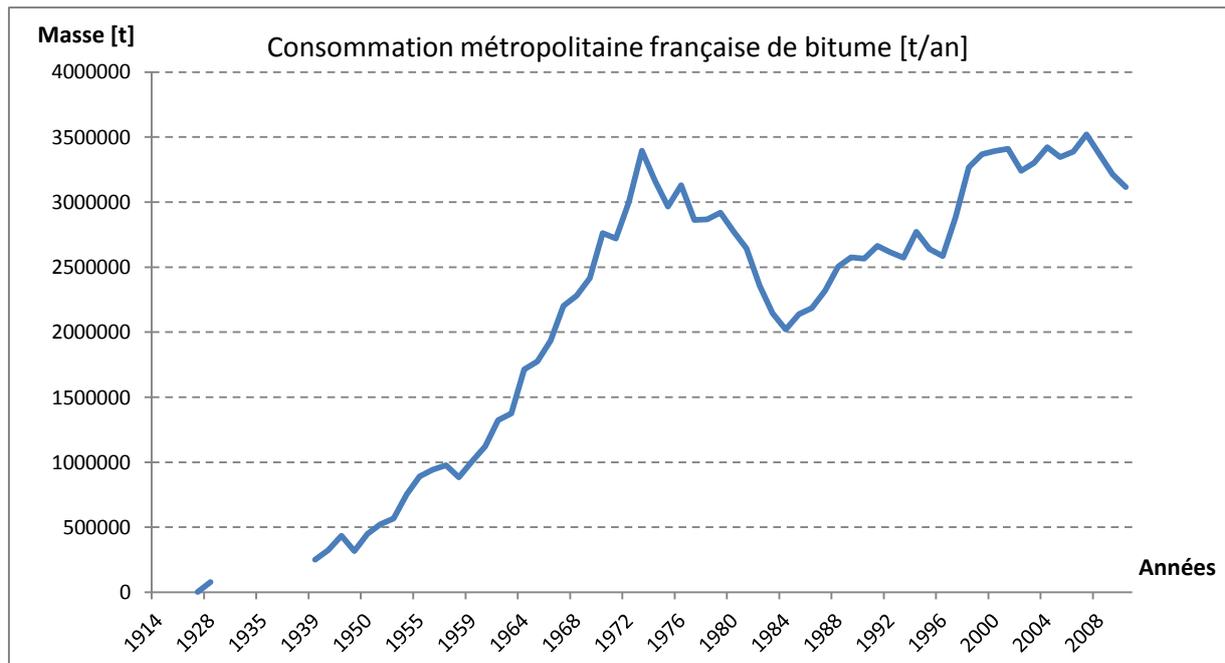


Figure 8 : Evolution de la consommation française métropolitaine globale de bitume depuis 1914 (d'après audition USIRF, 2011)

2.3.2 Utilisations du bitume

Au niveau mondial, en 2007, 85 % des bitumes sont utilisés dans le milieu routier, 10 % dans les travaux d'étanchéité des toitures et 5 % dans des applications dites secondaires (Eurobitumes and Asphalt Institute 2011).

En France, comme dans la majorité des pays européens, plus de 90 % de la consommation globale de bitume est consacrée aux applications routières. L'entretien des voies existantes représente plus de 80 % de l'utilisation des bitumes routiers (GPB 2009). Il y a donc peu de nouvelles réalisations routières.

Les applications industrielles reposant principalement sur l'exploitation des propriétés d'étanchéité et d'isolation des bitumes, absorbent quant à elles, un peu moins de 10 % de la consommation globale (GPB 2005).

3 Composition des liants bitumineux

3.1 Composition des bitumes

3.1.1 Présentation générale

Les bitumes sont constitués essentiellement de produits organiques, particulièrement diversifiés, dont la nature et la teneur dépendent à la fois du brut pétrolier et du procédé industriel employé pour sa fabrication. Les pétroles bruts convenant à la production de bitumes sont sélectionnés en fonction de leur teneur potentielle en bitume (Figure 9), et seuls environ 10 % des bruts pétroliers conviennent à la production de bitumes. En France, ils proviennent principalement du Moyen Orient, parfois du Venezuela (d'après audition Eurobitume, 2012).

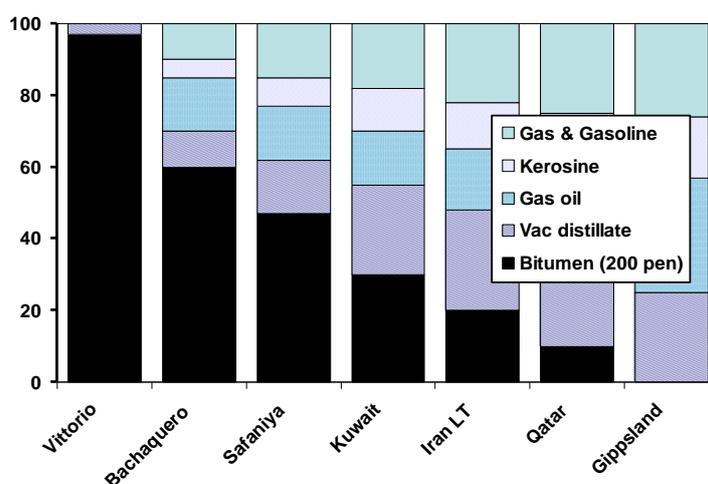


Figure 9 : Proportions de différentes fractions pétrolières obtenues à partir de différents pétroles bruts en fonction de leur gisement d'origine (d'après audition Eurobitume, 2012)

Les caractéristiques utilisées pour décrire les bitumes par les fournisseurs et les consommateurs ne sont pas basées sur des propriétés physico-chimiques généralement utilisées pour caractériser les substances chimiques (point de fusion, d'ébullition, densité, masse molaire, etc...), mais sur certaines propriétés mécaniques répondant au cahier des charges des performances souhaitées pour le revêtement final. Ainsi, pour un même référencement au Chemical Abstract (numéro CAS), on pourra trouver plusieurs classes de bitumes distincts destinés à des utilisations différentes.

Les deux principales spécifications utilisées unanimement pour caractériser un bitume, sont sa température bille et anneau (TBA) ou point de ramollissement, et sa pénétrabilité à l'aiguille. Les protocoles de mesure normalisés, pour déterminer ces deux grandeurs, respectivement EN 1427 et EN 1426, sont détaillés en Annexe 3 de ce rapport. D'autres caractéristiques comme la viscosité cinématique, la pseudo-viscosité, l'indice de pénétrabilité, le point de fragilité Fraass, etc. peuvent être utilisées comme complément dans les spécifications. Certaines propriétés physico-chimiques restent néanmoins communes à la plupart des classes de bitumes ; elles sont résumées dans le Tableau 2 ci-dessous. De manière générale, les bitumes sont des produits de couleur brun foncé à noire. Ce sont des matériaux viscoélastiques se comportant comme un solide élastique à basse température et un liquide visqueux à plus ou moins haute température et à fort pouvoir adhésif.

Tableau 2 : Exemple de propriétés physico-chimiques d'un bitume pur (Eurobitumes and Asphalt Institute 2011; World Health Organization 2005)

Propriétés	Valeurs
Point éclair (coupelle ouverte)	Dépend de la classe > 230 °C
Perte de masse par chauffage (max)	0,5 - 1 %
Densité	> 0,95, typiquement >1,0
Solubilité (Trichloroéthylène, toluène ou xylène)	> 99 %
Autres solubilités :	
• Dans l'eau à 20 °C	Insoluble
• Solvants organiques aliphatiques	partiellement
• Disulfure de carbone	soluble
Biodégradabilité	Non facilement dégradable
Pression de vapeur (à T ambiante)	En dessous de la limite de détection

3.1.2 Composition élémentaire du bitume

3.1.2.1 Composition moyenne

Les bitumes sont principalement composés de molécules organiques constituées d'atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, voire d'azote et/ou de soufre. En termes d'analyse élémentaire, on aboutit à une composition moyenne dont l'amplitude de variation est relativement réduite (Tableau 3).

Tableau 3 : Composition élémentaire moyenne, exprimée en pourcentage de la masse totale des bitumes d'après la littérature (ACGIH 2011; Gasthauer, Maze *et al.* 2008; Speight 1992)

Carbone	Hydrogène	Azote	Soufre	Oxygène
79 à 88 %	7 à 13 %	Traces à 3 %	Traces à 8 %	2 à 8 %

La présence même en faible quantité d'hétéroatomes (soufre, oxygène et azote) a un impact important sur les caractéristiques physiques des bitumes comme la pénétrabilité et le point de ramollissement. En effet, ces atomes forment des groupes fonctionnels plus ou moins polaires à l'origine d'une grande variété d'interactions moléculaires au sein du bitume, responsables en partie de ses propriétés (NIOSH 2000).

3.1.2.2 Une signature chimique spécifique

En fonction des bruts utilisés et des procédés de production, la composition chimique des bitumes peut légèrement varier ce qui peut jouer sur leur aptitude à être utilisé dans certaines applications et/ou sur la performance du produit final. En effet, ces bruts détiennent en général une « carte d'identité » donnée par une concentration bien définie en soufre, azote ou oxygène. En outre, certains éléments métalliques tels que le fer, le vanadium, le nickel, le magnésium et le calcium sont présents à l'état de traces (Tableau 4). Leurs concentrations relatives sont spécifiques des bruts employés.

Tableau 4 : Concentration en éléments métalliques dans certains bitumes (d'après audition Eurobitume, 2012)

Métal	Gamme de concentration (ppm)	Concentration moyenne (ppm)
Nickel	10 - 139	83
Vanadium	7 – 1590	254
Fer	5 - 147	67
Manganèse	0,1 – 3,7	1,1
Calcium	1 - 335	118
Magnésium	1 - 134	26
Sodium	6 - 159	63

3.1.3 Composition chimique : une substance complexe

En terme de composition moléculaire, il est impossible de dresser une liste précise des substances chimiques qui composent un bitume, ni de fournir de concentration associée. L'analyse chimique ne peut être utilisée pour définir la structure exacte ou la composition complète d'un bitume qui peut comporter plusieurs dizaines de milliers de molécules distinctes. Un bitume doit ainsi être considéré comme un mélange complexe de molécules pour laquelle il est possible d'identifier des grandes familles de produits qui la composent, soit en termes de structures moléculaires et de familles de composés, soit en termes de propriétés physico-chimiques et de fractions de composants.

3.1.3.1 Composition moléculaire des bitumes

À ce jour, aucune méthode analytique n'est capable d'identifier et de quantifier chaque molécule contenue dans les bitumes. En effet, le nombre très élevé de ces molécules, la présence d'un grand nombre d'isomères ou de molécules très voisines chimiquement, complique très fortement le travail de séparation ainsi que leur identification. Le chromatogramme ci-dessous (Figure 10), bien que spécifiquement axé sur l'analyse des HAP contenus dans des fumées de bitume, donne une idée de la multitude de composés pouvant entrer dans la composition d'un bitume ou de ses émissions.

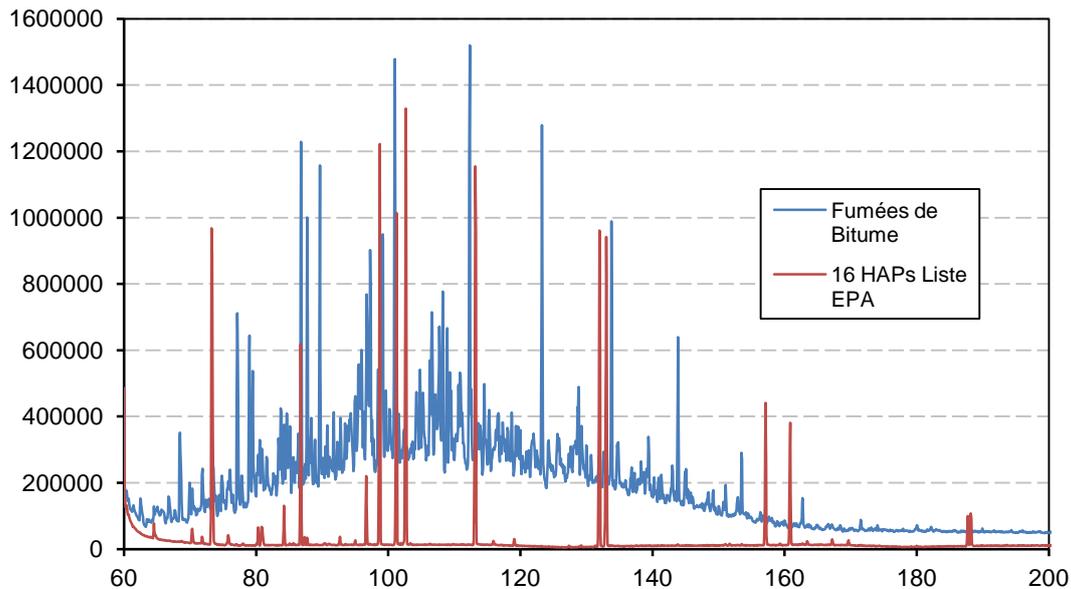


Figure 10 : Chromatogramme GC/MS comparatif entre les analyses d'un échantillon de fumées de bitume et d'un étalon contenant les 16 HAP de l'EPA

Les principales familles de molécules constituant les bitumes sont les hydrocarbures aliphatiques, les alcanes cycliques (naphténiques), les hydrocarbures aromatiques (éventuellement polycycliques), et les composés hétérocycliques azotés, oxygénés et soufrés. On a distingué ainsi historiquement bitumes naphténiques et paraffiniques.⁴

Les composés azotés prédominants sont de type pyrroles, indoles et carbazoles. Les composés oxygénés apparaissent sous la forme de furanes, phénols et d'acides carboxyliques/naphténiques (Eurobitumes and Asphalt Institute 2011). Le composé soufré prédominant dans les bitumes est le thiophène. Certains composés organiques dérivés du thiophène (benzothiophènes, naphthothiophènes,...) peuvent aussi être rencontrés (Kowalewski, Schaeffer *et al.* 2010). Des liaisons entre molécules (réticulation) menant à la création de macromolécules sont également observées. Les métaux seraient associés chimiquement à des molécules hétéropolycycliques en remplissant les espaces libres dans les clusters aromatiques, souvent sous forme de porphyrines.

3.1.3.2 Composition par la méthode SARA

Une méthode de caractérisation physico-chimique, appelée communément méthode SARA (Saturés, Aromatiques, Résines et Asphaltènes) a été développée à la suite de la classification Naphténiques / Paraffiniques, et est toujours utilisée. Cette classification permet de caractériser plus finement les bitumes utilisés en fractionnant ceux-ci en quatre grandes familles de composés dans la limite de la solubilité de ces composés dans différents solvants utilisés. Ces quatre classes couvrent l'ensemble de tous les composés organiques présents dans les bitumes. La séparation chimique des constituants du bitume selon la méthode SARA est schématisée en Figure 11. Des exemples de molécules types, issues de

⁴ Les bruts pétroliers sont classifiés en naphténiques, paraffiniques et aromatiques, en fonction de la prédominance de ces types d'hydrocarbures. Le bitume portera alors la même appellation que le pétrole dont il est issu.

Un pétrole naphténique contient une grande quantité de composés cycliques saturés. Sur le même principe, un pétrole paraffinique contient une grande quantité de composés à chaîne carbonée saturée et un pétrole aromatique, des composés cycliques aromatiques.

la bibliographie et que l'on peut identifier dans chaque classe SARA sont donnés dans la Figure 12.

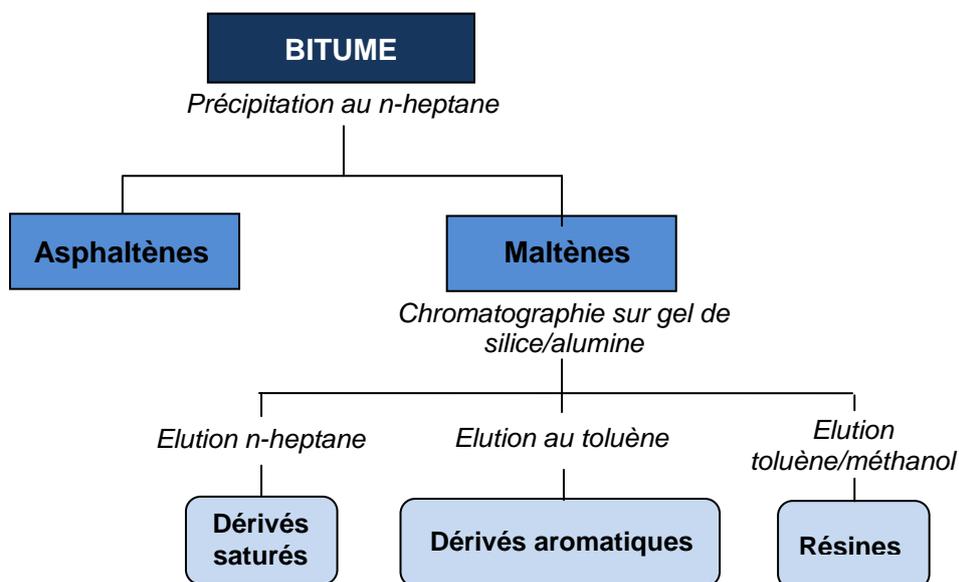


Figure 11 : Séparation des constituants du bitume par la méthode SARA

Les asphaltènes

Récupérée après précipitation au n-heptane sous certaines conditions (ASTM 2011), la fraction des asphaltènes contient les molécules les plus complexes et les plus lourdes. Cette classe, pouvant représenter 5 à 20 % de la masse du bitume, contient les composés aromatiques polycondensés, possédant un rapport molaire C/H proche de 1 et une masse molaire très élevée (1000 à 100 000 g.mol⁻¹) (Sebben Paranhos 2007). En plus de contenir des substitués aliphatiques, naphthéniques et des hétérocycles, les asphaltènes contiennent des noyaux porphyriniques complexés avec des métaux tels que le vanadium ou le nickel (Ellingsen and Fery-Forgues 1998; Gasthauer, Maze *et al.* 2008). L'association de pseudomonomères de condensats polyaromatiques avec des ponts aliphatiques pouvant contenir des hétéroatomes et des fonctions chimiques polaires aboutit à la formation de feuillets s'organisant au niveau macromoléculaire en micelles ou en agrégats (Loeber 1998).

Les dérivés saturés

La fraction soluble dans l'heptane correspond aux maltènes, d'aspect huileux, que l'on peut séparer en trois phases par passage sur une colonne chromatographique sur gel de silice/alumine. Une première élution au n-heptane permet de récupérer les dérivés saturés. Ceux-ci se présentent sous forme d'huiles visqueuses non polaires incolores ou légèrement paille. La classe des saturés contient les composés paraffiniques, constitués de chaînes aliphatiques linéaires ou ramifiées, et les composés naphthéniques à cycle saturé. Ces composés représentent 5 à 20 % de la masse du bitume et sont caractérisés par un faible poids moléculaire (moins de 1000 g.mol⁻¹) et une faible polarité (Gasthauer, Maze *et al.* 2008).

Les dérivés aromatiques

Une seconde élution avec du toluène permet de récupérer les dérivés aromatiques. Ce sont des huiles visqueuses de couleur jaune à rouge foncé, mélanges de composés aromatiques de masse moléculaire comprise entre 300 à 2000 g.mol⁻¹, constituées de chaînes aromatiques non polaires où dominent les aromatiques mono et bicycliques (Beghin 2003). Ces composés contiennent très souvent des substitutions par des chaînes aliphatiques et/ou cycliques saturées ou non, pouvant inclure des atomes de soufre (Gasthauer, Maze *et al.* 2008). Ces composés représentent 40 à 65 % de la masse du bitume.

Les résines

La fraction contenant les résines est obtenue après élution au mélange toluène-méthanol. Les résines représentent les composés naphténo-aromatiques de masse moléculaire plus élevée (500 à 50 000 g.mol⁻¹) (Beghin 2003). Ce sont des molécules plus complexes contenant plus de structures cycliques telles que des cycles naphténo-aromatiques, des cycles aromatiques et des hétérocycles. Ces structures sont liées entre elles par des ponts aliphatiques qui permettent un développement en trois dimensions des molécules. Les résines possèdent en plus une polarité élevée induite par des fonctions chimiques contenant des atomes d'oxygène, d'azote, ou de soufre (Gasthauer, Maze *et al.* 2008; Islas-Flores, Buenrostro-Gonzalez *et al.* 2006). La classe des résines définit donc un ensemble de molécules très complexe. La polarité des résines confère des propriétés adhésives fortes au bitume. 10 à 20 % de la masse des bitumes est constituée par les résines (Beghin 2003).

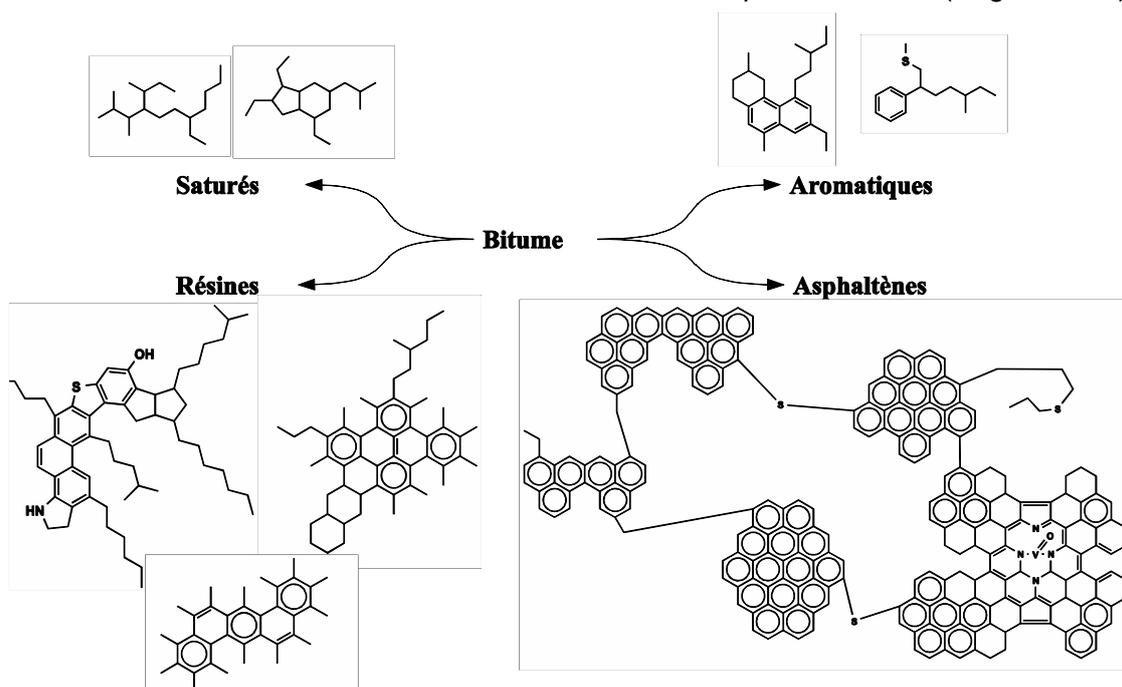


Figure 12 : Structures types des composés du bitume classés selon la méthode SARA (Gasthauer, Maze *et al.* 2008; Islas-Flores, Buenrostro-Gonzalez *et al.* 2006).

3.1.3.3 Equilibre structural du bitume

Un bitume de distillation peut aussi se considérer au niveau physico-chimique sous forme d'un équilibre colloïdal complexe dans lequel des agrégats d'asphaltènes sont dispersés dans une phase huileuse et visqueuse que forment les maltènes, dont la partie fluide est composée d'huiles aromatiques et naphténo-aromatiques, d'huiles saturées et de résines d'hydrocarbures naphténo-aromatiques, ces dernières stabilisant l'ensemble.

Plus le bitume sera riche en asphaltènes, plus il aura une pénétrabilité faible (il sera dur). À l'inverse, plus le bitume contiendra de maltènes, plus sa pénétrabilité sera élevée (il sera mou). Cependant, Loeber (1998) démontre que pour des bitumes différents et possédant les mêmes pénétrabilités et points de ramollissement, les proportions des quatre fractions SARA peuvent varier significativement. Ces observations illustrent l'influence et la complexité des interactions chimiques intrinsèques à chaque bitume et ayant un impact important sur leurs caractéristiques physiques (Loeber 1998).

Se distinguent communément deux types de structures (Figure 13) : une structure dite « SOL » dans laquelle les colloïdes d'asphaltènes sont dispersés et une structure dite « GEL » dans laquelle les colloïdes sont organisés et bien structurés (CONCAWE 1992).

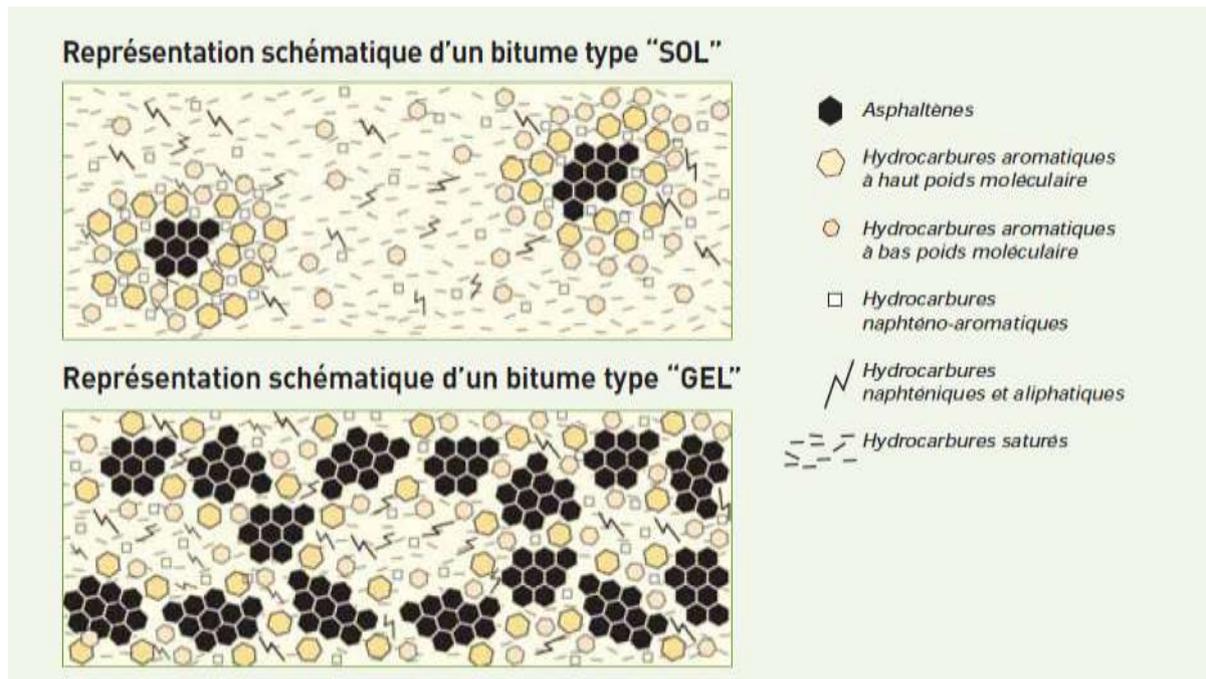


Figure 13 : Représentations schématiques des structures type « SOL » et « GEL » d'un bitume (Lombardi 2007a)

Suivant le caractère « GEL » ou SOL », les propriétés des bitumes ne seront pas les mêmes. Les bitumes « SOL » présentent une excellente résistance aux sollicitations rapides mais en contrepartie, ils seront plus sensibles que les bitumes « GEL » aux sollicitations lentes ainsi qu'aux variations de température. Il est important de noter que les propriétés rhéologiques d'un bitume dépendent de façon très importante de sa teneur en asphaltènes et de la masse moléculaire de ces molécules.

3.2 Les composés aromatiques polycycliques dans les bitumes

3.2.1 Généralités

Les très nombreux Composés Aromatiques Polycycliques (CAP, PAC en anglais), sont généralement subdivisés en hydrocarbures aromatiques polycycliques exclusivement hydrocarbonés (HAP, PAH en anglais), en composés aromatiques hétérocycliques, comprenant au moins un hétéroatome, de soufre (HAP soufrés, PASH en anglais), ou d'azote (HAP azotés, PANH en anglais). Lors de leur formation ou bien dans l'atmosphère, ils peuvent être oxydés en HAP oxygénés (cétones, fluorénones, quinones) ou nitrés (nitro-HAP formés par addition d'un groupement NO_2).

Les HAP constituent une famille de composés de deux à plus de six cycles benzéniques juxtaposés, présents dans les combustibles fossiles (charbon, pétrole brut) et que l'on retrouve dans certains de leurs dérivés utilisés dans les produits routiers (goudron, bitume).

Les HAP constitués de 2 à 6 cycles ont été particulièrement étudiés en raison de leur caractère potentiellement cancérigène et/ou mutagène. L'US EPA a d'ailleurs classé 16 composés de cette famille comme polluants prioritaires, dont la structure ainsi que le point d'ébullition à pression atmosphérique sont données ci-dessous (**Figure 14**).

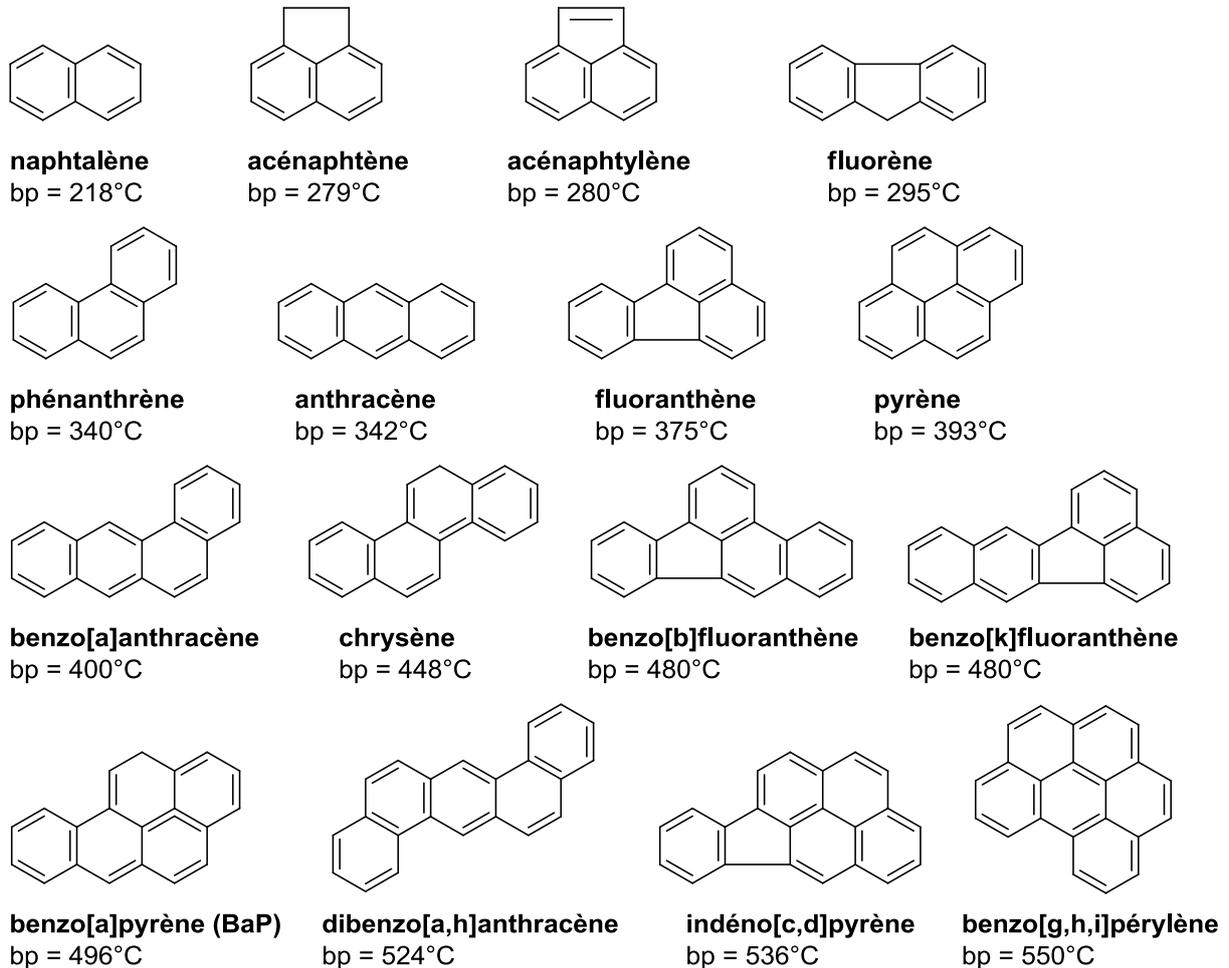


Figure 14 : Structures et points d'ébullition à pression atmosphérique des 16 HAP classés par l'US EPA comme polluants prioritaires

Parmi ces composés, le benzo[a]pyrène (B[a]P) est un cancérigène avéré, identifié dès les années 1930, et par conséquent très étudié. De nombreuses études concernant les HAP sont disponibles, notamment concernant les risques sanitaires liés à l'exposition des travailleurs et de la population générale via l'alimentation ou l'air ambiant.

3.2.2 HAP présents dans les bitumes

Comme exposé précédemment, l'identification de tous les composés présents dans les bitumes est impossible et ne saurait être exhaustive. Il est néanmoins possible par comparaison à des références connues d'y démontrer la présence de nombreux HAP en faible quantité. Une liste non exhaustive mais déjà bien détaillée donne les concentrations (en ppm ou $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) de HAP et de HAP soufrés mesurées dans un bitume issu de pétrole brut d'Arabie Saoudite et moyennées sur 6 déterminations (cf. Tableau 5).

Tableau 5 : Exemple de concentrations de HAP et de HAP soufrés dans un bitume (Vu-Duc, Huynh *et al.* 2007).

HAP-soufrés (PASH)	Nombre de cycles	Poids moléculaire en g/mol	Concentration moyenne en ppm (%coefficient de variation (CV))
Benzo[b]thiophène	2	134	0,1 (17,2)
Dibenzothiophène	3	184	3,6 (15,3)
Benzo[b]naphtho[1,2-d]thiophène	4	234	1,3 (20,7)
Benzo[b]naphtho[2,1-d]thiophène	4	234	7,6 (6,2)
HAP			
Naphthalène	2	128	0,62 (17,3)
1-Méthyl-naphthalène	2	142	0,52 (26,0)
2-Méthyl-naphthalène	2	142	0,63 (31,1)
1,2-Diméthyl-naphthalène	2	156	0,27 (28,0)
2,3,5-Triméthyl-naphthalène	2	170	0,28 (31,7)
Acénaphthène	3	154	0,10 (0,0)
Fluorène	3	166	0,45 (11,1)
Phénanthrène	3	178	3,03 (11,4)
Anthracène	3	178	0,12 (31,9)
1-Méthylphénanthrène	3	192	4,75 (15,3)
2-Méthylanthracène	3	192	2,93 (14,9)
3,6-Diméthylphénanthrène	3	206	0,43 (17,2)
Fluoranthène	4	202	0,55 (9,1)
Pyrène	4	202	1,52 (10,4)
Benzo[a]fluorène	4	216	1,82 (14,4)
Benzo[b]fluorène	4	216	0,23 (20,2)
Benzo[a]anthracène	4	228	0,82 (4,6)
Chrysène	4	228	3,32 (8,4)
1-Méthylpyrène	4	216	1,82 (14,4)
3-Méthylchrysène	4	242	1,88 (9,4)
4-Méthylchrysène	4	242	1,27 (10,9)
5-Méthylchrysène	4	242	1,27 (8,7)
Benzo[e]pyrène	5	252	3,55 (7,4)
Benzo[a]pyrène	5	252	1,02 (8,8)
Benzo[b]fluoranthène	5	252	0,6 (13,6)
Benzo[k]fluoranthène	5	252	trace
Pérylène	5	252	1,18 (7,6)
Benzo[g,h,i]pérylène	6	276	2,17 (7,8)
Indéno[1,2,3-cd]pyrène	6	276	0,92 (14,7)
Coronène	7	300	1,03 (7,2)

On note que la concentration maximale pour une seule molécule est de l'ordre du ppm ($\mu\text{g.g}^{-1}$). La concentration totale est en revanche difficile à déterminer : elle dépend des produits considérés pour la mesure. On note aussi la présence en proportion relativement

importante de dérivés soufrés, ainsi que de HAP méthylés. Ces dernières classes de composés ont été nettement moins étudiées que les 16 HAP de l'US EPA. Et aucune donnée n'est disponible quant aux teneurs en dérivés azotés présents dans les bitumes pour cet exemple.

3.2.3 Bitumes et goudrons, différents produits, différentes compositions

Les HAP sont présents en faible quantité dans le bitume pur (de l'ordre de quelques dizaines de ppm). D'une part, la distillation, atmosphérique ou sous vide, destinée à récupérer la fraction lourde du pétrole constituant le bitume, élimine une certaine partie des composés de faibles masses moléculaires qui présentent des températures d'ébullition basses, incluant essentiellement les HAP de 2 à 4 cycles. En outre, le désasphaltage au propane du résidu sous vide élimine certains HAP lourds. D'autre part, les températures de fonctionnement des procédés de fabrication comprises au maximum entre 350 °C et 450 °C ne permettent pas la génération d'autres HAP par pyrosynthèse.

En revanche, les goudrons générés lors de la pyrolyse de la houille à haute température (1000 à 1200 °C pendant une vingtaine d'heures), ainsi que leurs dérivés contiennent une quantité bien plus importante de HAP. Ces derniers sont en effet formés par pyrosynthèse dès que la température dépasse 500 °C environ. Le Tableau 6 donne les concentrations individuelles de certains HAP à quatre, cinq ou six noyaux aromatiques contenus dans un bitume et dans un brai de houille (résidu de distillation du goudron), déterminées par chromatographie liquide haute performance (CLHP) couplée avec un détecteur de fluorescence (Brandt, de Groot *et al.* 1985). On relève ainsi des teneurs en HAP dans les bitumes allant de 0,1 à 10 ppm et dans les brais de houille allant de 1000 à 40 000 ppm, soit d'environ 1 000 à 10 000 fois plus.

Tableau 6 : Concentrations en HAP (ppm ou $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) dans du bitume et du brai de houille (en ppm de BSM) (Brandt, de Groot *et al.* 1985).

HAPs	Bitume (min-max) ppm	Brai de houille (min-max) ppm
Phenanthrene	0,32-7,3	19 850-25 700
Anthracene	0,01-0,32	4 600-7 310
Fluoranthene	0,1-0,72	29 000-36 000
Pyrene	0,17-1,5	21 300-27 200
Chrysene	0,8-3,9	11 200-24 510
Perylene	0,04-3,9	2 770-3 500
Benzo(k)fluoranthene	nd-2,2	5 250-6 010
Benzo(a)pyrene	0,22-1,8	11 360-15 170
Benzo(g,h,i)perylene	1,2-5,7	3 430-3 530
Anthanthrene	nd-0,11	1 231-1 728
Dibenzo(a,i)pyrene	nd-0,6	127-164
Coronene	nd-0,4	nd-120

nd : non détecté, en dessous de la limite de détection (LOD)

Pour autant, le procédé de fabrication des bitumes ne permet pas de supprimer l'ensemble des HAP et des résidus demeurent présents tant dans le bitume que dans les émissions consécutives à sa mise en œuvre dans le domaine industriel.

3.3 Les additifs

3.3.1 Définition dans le cadre de l'expertise

Les bitumes constituent l'ingrédient principal d'un liant, partie continue qui assure la cohésion d'un revêtement (routier, d'étanchéité de toiture, etc.). Les propriétés physico-chimiques et mécaniques attendues de ce liant nécessitent l'addition au bitume d'un ou de plusieurs composés chimiques, liquides ou solides, dont le but est d'améliorer lesdites propriétés (stabilité, adhérence, durabilité, maniabilité, résistance chimique, etc.). Ces composés sont dénommés additifs dans le cadre de cette expertise. En outre, l'expertise se limite aux classes de produits régulièrement employés, et exclue toute utilisation ponctuelle d'un additif bien particulier. La proportion globale des additifs utilisés par rapport aux bitumes est faible (1 à 2 % du liant), et les quantités et compositions précises utilisées pour chacun restent des données confidentielles. L'identification des différentes classes d'additifs et de produits les composant résulte d'un travail d'analyse des données de la littérature scientifique ouverte, de textes de demandes de brevets, de fiches techniques ou de données de sécurité fournies par les producteurs, et d'informations transmises lors des auditions. Les données confidentielles parfois communiquées au GT ne figurent pas dans ce rapport.

3.3.2 Coupes Pétrolières – hydrocarbures : fluxants/fluidifiants

Diverses coupes pétrolières (autre les bitumes proprement dits) peuvent être utilisées lors de la fabrication des liants bitumineux et de leurs dérivés. Il s'agit essentiellement de fluxants, et de quelques résidus de distillation utilisés dans certains cas ponctuels. Ces derniers produits n'entrant que très rarement dans des compositions de liants bitumineux, ils ne seront pas détaillés dans ce rapport.

Les bitumes fluxés et fluidifiés sont des mélanges obtenus à partir de bitumes purs dont on a abaissé la viscosité par addition de solvants (fluxants ou fluidifiants) plus ou moins volatils. Ces derniers sont essentiellement des huiles d'origine carbochimique ou pétrolière. Les bitumes fluxés diffèrent des bitumes fluidifiés en particulier par la courbe de distillation de leurs fluxants, plus étendue vers les températures d'ébullition élevées essentiellement. La distinction entre les deux classes dépend de l'interprétation de la terminologie par chacun des acteurs, les termes 'fluxé' et 'fluidifié' étant même parfois considérés comme synonymes. Ainsi, contrairement à la norme européenne EN 15322 qui distingue les bitumes fluxés des bitumes fluidifiés, la terminologie anglo-saxonne ne fait pas la distinction, ces deux types de bitumes étant nommés « cut-back ». Le terme « fluidifié » est généralement associé à des solvants volatils type kérosène, facilement inflammables, et le terme « fluxé » à des coupes moins volatiles. En France, on considère à l'heure actuelle que les bitumes fluidifiés ne sont plus utilisés, on ne parlera donc que de fluxants dans la suite de ce rapport. On retrouve néanmoins des solvants volatils dans certaines formulations particulières, comme par exemple les vernis d'accrochage utilisés en sous-couches. Dans ce cas, c'est le point éclair du solvant ajouté qui conduit à un risque global d'inflammabilité de la préparation. Actuellement, le règlement CLP impose la mention « inflammable » pour des préparations dont le point éclair est inférieur à 60 °C.

Les fluxants d'origine pétrolière sont diverses coupes obtenues après distillation et/ou raffinage et/ou craquage thermique. Ce sont essentiellement des naphas, kérosènes ou combustibles diesels, coupes pétrolières obtenues à des températures variant entre 150 et 450 °C. Une liste exhaustive des coupes utilisées peut être trouvée dans la revue de Mundt

et al. (2009) (Mundt, Marano *et al.* 2009). En résumé, les fluxants pétroliers dits de première génération étaient des distillats (coupes naphthas ou gazoles) à teneurs élevées en aromatiques (plus de 70 %) et ne sont plus utilisés. Ils ont été remplacés par des coupes kérosènes. Ce type de fluxant, dans sa version hydrodésulfurisée, a été retiré du marché en 2010 (d'après audition Eurobitume, 2012). La tendance actuelle consiste à utiliser des coupes légères aromatiques en C9 précisément, avec des coupes paraffiniques (composées d'hydrocarbures saturés) en C11-C14 (kérosène hydrotraité) ou C15-C20 (diesel hydrotraité) de teneur en aromatiques très faible : moins de 2 % pour les coupes kérosènes et moins de 0,03 % pour les coupes diesel (d'après audition Eurobitume, 2012). Ces coupes spécifiques ne possèdent pas toujours de numéro CAS propre, et peuvent être utilisées en mélange.

En principe, les fluxants d'origine carbochimique obtenus après pyrolyse de la houille en cokeries ne sont plus utilisés depuis le milieu des années 2000. Les goudrons, sous-produits de la cokéfaction, étaient fractionnés par distillation (comme pour les produits pétroliers) en plusieurs coupes huileuses dont certaines relativement lourdes (200-350 °C) pouvaient être utilisées comme fluxants. Ces coupes (types acénaphénique, anthracéniques) étaient particulièrement riches en dérivés aromatiques, polyaromatiques et en phénols lourds (naphtols, *etc.*).

L'ensemble des fluxants employés par l'industrie routière a été examiné en 2006 par un groupe de travail du Sétra (Sétra 2006b), puis réactualisé en 2011 (Annexe 4).

La composition de ces produits n'est pas détaillée par les fabricants. De manière générale, les coupes pétrolières ne sont pas caractérisées par leur composition mais par leur procédé d'obtention. En effet, les produits issus du raffinage pétrolier sont multiples, et la distillation ou le raffinage au solvant ne permettent que d'obtenir des mélanges de produits de propriétés voisines (point d'ébullition). Ces mélanges sont donc caractérisés par leurs propriétés physico-chimiques, et souvent référencés par le Chemical Abstract Service. La distinction entre produit pétrolier et produit pétrochimique a été apportée comme précision dans le document du Sétra : si les produits pétroliers sont issus de la distillation du pétrole brut, et ont éventuellement pu subir une opération d'hydrotraitement, les produits pétrochimiques ont subi au moins une opération de craquage thermique (vapocraquage) (Sétra 2006b).

Les principales coupes pétrolières potentiellement utilisées comme fluxants, recensées par le GT de l'Anses sont données dans le Tableau 7 ci-dessous :

Tableau 7 : Principales coupes pétrolières potentiellement utilisées comme fluxants

Type	Numéro CAS	Origine	Dates d'utilisation
Kérosène	8008-20-6	Distillation atmosphérique	Fin de la pratique années 2000
Kérosène HDS	64742-81-0	Coupe kérosène hydrodésulfurisée	Arrêt utilisation en 2010
Combustibles diesels	68334-30-5	Distillation atmosphérique	Fin de la pratique années 2000
Coupe C11-C14 (<2 % Aromatiques)	Pas de numéro	Coupe kérosène resserrée	Utilisé
Kérosène désaromatisé	64742-47-8	Coupe kérosène hydrotraitee	Utilisé
Naphta léger	64741-46-4	Distillation atmosphérique	Fin de la pratique années 1980
Coupe C9 aromatique	Pas de numéro	Coupe naphta resserrée	Utilisé
Naphta lourd	64741-41-9	Distillation atmosphérique	Fin de la pratique années 1980
Naphta lourd HDS	64742-82-1	Coupe naphta lourd hydrodésulfurisée	Utilisé comme solvant dans certaines formulations
Gazoles légers	64741-58-8	Distillation sous vide	Plus utilisé
Gazoles lourds	64741-57-7	Distillation sous vide	Plus utilisé
Coupe C15-C20 (déaromatisée)	Pas de numéro	Coupe gazole déaromatisée par hydrocraquage	Utilisé
Distillats légers	64741-59-9	Issu craquage catalytique	Retiré courant années 2000
Huiles minérales	64742-10-5	Raffinage au solvant	Utilisé
Résidus sous vide déasphaltés	91995-70-9	Raffinage au solvant	Utilisé

Ce sont donc principalement des coupes pétrolières n'ayant pas subi d'opération de craquage thermique.

Certaines coupes sont aussi trouvées, de façon moins courante. Une revue détaillée récente de Mundt *et al.* (2009) recense les coupes pétrolières potentiellement utilisées en 2009 aux Etats-Unis (Mundt, Marano *et al.* 2009).

Tous ces produits sont utilisés à des teneurs variant entre 10 et 50 % selon la formulation, généralement autour de 10 %. La vitesse d'évaporation désirée dicte ensuite le choix de la coupe préférentielle (même si l'évaporation du fluxant n'est pas totale). On peut aussi utiliser des mélanges de coupes afin d'optimiser la cinétique d'évaporation et d'accélérer la mise en service sans dégrader les propriétés mécaniques du revêtement. La vitesse d'évaporation va en décroissant dans l'ordre naphtas < kérosènes < diesels. Les hydrocarbures les plus utilisés sont les kérosènes, suivis par les diesels puis les naphtas. Les huiles aromatiques sont particulièrement importantes dans le cas des bitumes-polymères car elles servent à la dissolution du SBS (Styrène-Butadiène-Styrène), le principal polymère utilisé (LCPC 1999).

3.3.3 Fluxants agrochimiques

Une tendance actuelle est au développement de produits agrochimiques (parfois dits d'origine végétale) pour remplacer les dérivés pétroliers et pétrochimiques. Ces nouveaux produits d'origine entièrement renouvelable permettent en effet d'obtenir les mêmes propriétés que les dérivés pétrochimiques, voire de nouvelles comme des liants translucides qui conservent la teinte naturelle des granulats. Il est ainsi possible d'obtenir divers composés qui possèdent la même aptitude que les fluxants hydrocarbonés à réduire la

viscosité des bitumes, tout en étant moins volatils, moins odorants, et conduisant à moins d'émissions de composés organiques volatils (COV).

Ces fluxants sont des esters dérivés d'acides gras naturels, à l'instar des biocarburants (EMHV, Esters Méthyliques d'Huiles Végétales, Figure 15) :

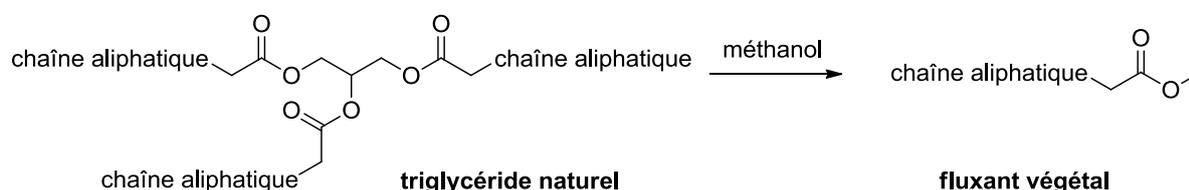


Figure 15 : Structure des fluxants agrochimiques

Le plus souvent, il s'agit d'esters méthyliques obtenus par trans-estérification du glycérol par le méthanol, et les chaînes aliphatiques comportent entre 16 et 20 atomes de carbone. Ces chaînes sont en mélange, la proportion de chacune dépendant de la source naturelle de l'huile utilisée. Pour exemple sont données ci-dessous (Tableau 8) la structure et la composition de l'huile de colza, principalement utilisée en France pour ce type d'applications, ainsi que de l'huile de tournesol et de l'huile de ricin :

Tableau 8 : Composition des principales huiles végétales potentiellement utilisées pour la fabrication de fluxants (Pinzi, Gandia *et al.* 2011; Singh and Singh 2010)

Acide gras	Structure	Type	Proportion dans		
			l'huile de colza	l'huile de tournesol	l'huile de ricin
Palmitique	C16:0	Saturé	3 - 3,5 %	6 - 7 %	1 %
Stéarique	C18:0		1 %	3 - 6 %	3 %
Oléique	C18:1 ; ω-9	Insaturé	60 - 64 %	17 - 26 %	5 - 6 %
Linoléique	C18:2 ; ω-6		22 %	65 - 74 %	1 - 2 %
α-Linolénique	C18:3 ; ω-3		8 %		0,5 - 1 %
Gadoléique	C20:1 ; ω-9		0 - 3 %		
Ricinoléique	C18:1 ; ω-9 ; 12-OH				89 - 90 %
Autres				0,5 %	0,2 - 1 %

La plupart des acides gras employés possèdent donc une chaîne hydrocarbonée de 18 atomes de carbone. Le point d'ébullition de l'ester méthylique correspondant se trouve donc aux alentours de 350 °C à pression atmosphérique (181 °C/4mmHg pour le stéarate de méthyle ; 218 °C/20mmHg pour l'oléate de méthyle). En outre, ces acides gras présentent une proportion importante de chaînes insaturées. Ces insaturations permettent l'oxydation aérobie des chaînes, et la création de ponts (essentiellement oxo) entre les chaînes. Ce processus, facilité aussi par la présence de groupements hydroxyles comme dans l'huile de ricin, est appelé siccation (Figure 16). Il intervient aussi par exemple dans le séchage des peintures type glycéro-phtaliques.

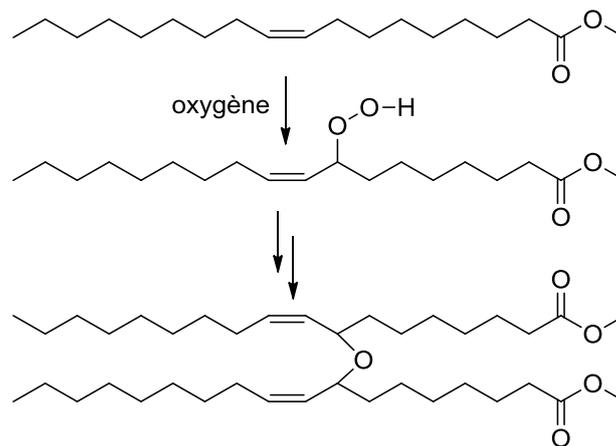


Figure 16 : Principe de la siccation de l'acide oléique

Il en résulte un comportement chimique différent des fluxants hydrocarbonés : en premier lieu, la volatilité des fluxants agrochimiques est bien plus faible, si bien que la majeure partie reste dans le revêtement routier. Ensuite, le processus de siccation offre une possibilité de réticulation, entre les chaînes et le liant, si bien qu'au final le fluxant est complètement intégré au liant.

Ce processus étant néanmoins relativement lent, il est souvent nécessaire d'ajouter un catalyseur métallique, à base de manganèse, voire de zirconium ou de cobalt, à hauteur de 0,8 % en moyenne. Une autre solution consiste à fonctionnaliser ces esters d'acides gras par des fonctions réactives type époxydes ou anhydrides, capables de réagir plus rapidement avec les groupements hydroxyles présents (Figure 17). L'utilisation d'acides gras hydroxylés dans le fluxant permet en outre d'accélérer le processus. C'est pourquoi les dérivés de l'huile de ricin, contenant plus de 85 % d'acide ricinoléique hydroxylé, sont aussi proposés. Certaines formulations privilégient par conséquent l'emploi de l'ester méthylique de l'huile de ricin, à hauteur de 8 à 13 % dans les bitumes comme fluxant.

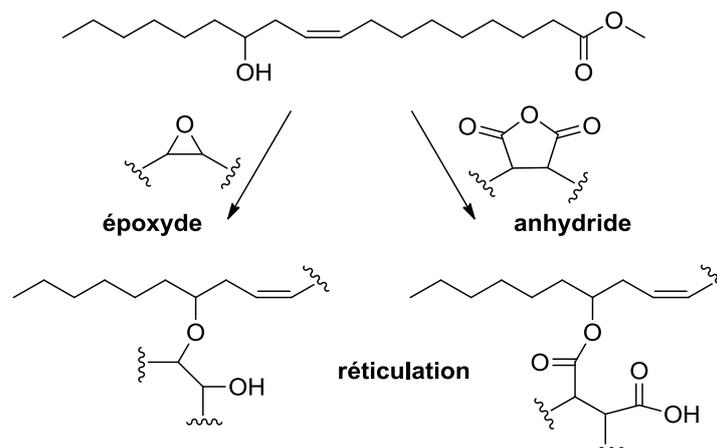


Figure 17 : Principe de réticulation des acides gras hydroxylés par des époxydes ou des anhydrides

De telles modifications d'esters d'acides gras naturels ont fait l'objet de plusieurs demandes de brevets, mais leur utilisation est encore au stade de recherche et développement à la connaissance du GT.

3.3.4 Dopes d'adhésivité

L'une des principales difficultés rencontrée lors de la formulation des enrobés est d'avoir un bon mouillage (enrobage) des agrégats par le liant (bitume). Une faible affinité entre ces deux composants conduit à leur désolidarisation, voire à la création de cavités lors du refroidissement. Ceci se traduit alors par une moins bonne résistance à l'humidité, et une dégradation accélérée du revêtement dans ces conditions. Deux solutions en termes physico-chimiques sont étudiées et employées : elles visent à réduire l'énergie de surface des agrégats ou du liant (voire des deux). L'énergie des agrégats est due à une charge de surface ; les bitumes contiennent très peu de molécules polaires (et à défaut chargées) qui y sont compatibles.

De manière très simplifiée, le bitume est un constituant très peu polaire, et contenant une faible proportion de dérivés acides. C'est un liquide (visqueux) par conséquent plutôt chargé négativement (faiblement). Les granulats sont de plusieurs types, acides (silices, sables) ou basiques (calcaires), et possèdent une charge de surface respectivement négative ou positive (légèrement). Alors que l'eau s'accommode parfaitement des deux types de surfaces, l'affinité du bitume pour des granulats acides sera bien moindre. L'utilisation de chaux (minéral basique) permet de diminuer par contact cette charge de surface. L'emploi de composés basiques organiques permet de neutraliser aussi la charge de surface, tout en assurant une compatibilité avec le bitume via les chaînes grasses (Figure 18).

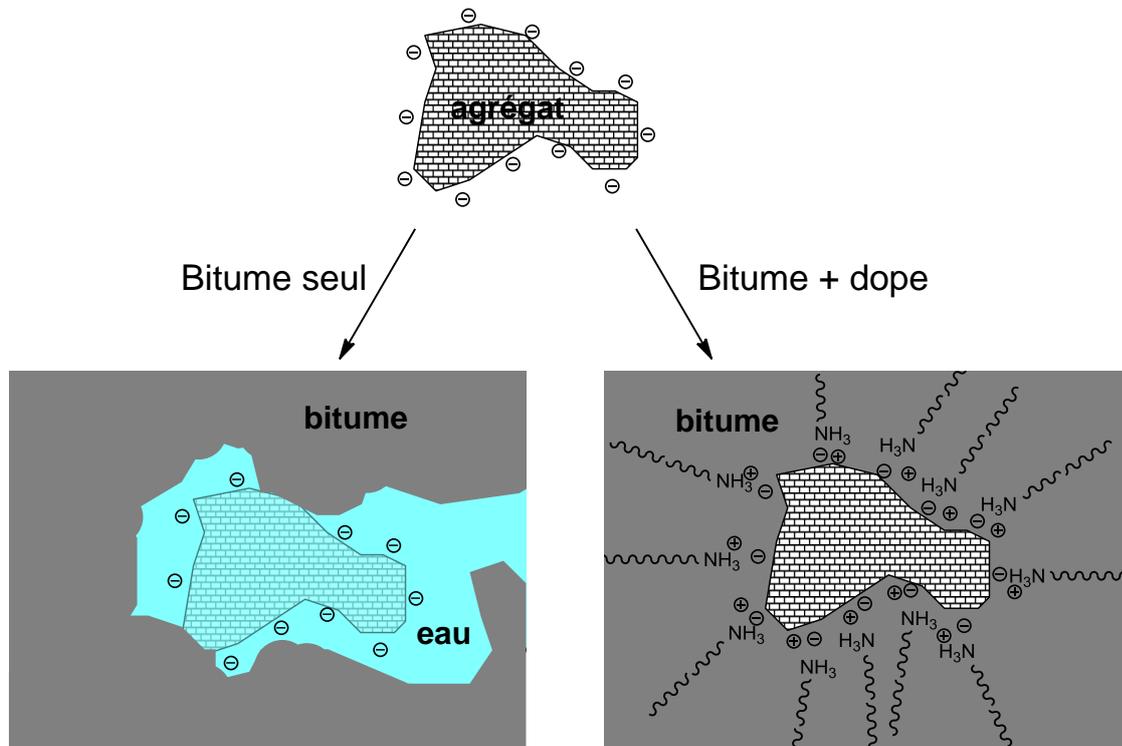


Figure 18 : Effet d'un dope d'adhésivité sur la cohésion granulat-liant

Les granulats étant séchés avant utilisation pour préparation de l'enrobé, l'eau ne s'y trouve pas initialement, mais elle s'infiltré progressivement dans le revêtement et « décolle » le bitume de l'agrégat au cours du temps (processus de désenrobage).

Les composés organiques le plus souvent rencontrés et utilisés sont des dérivés d'amines simples et d'amides, généralement dérivés d'amines aliphatiques, de polyamines (type polyéthylène ou polypropylène poly-amines), ou d'hétérocycles azotés (type pipéridine, morpholine ou imidazole) (Figure 19). Ils sont connus sous la dénomination triviale « dopes d'adhésivité », on trouve aussi les dénominations « agents mouillants », ou « promoteurs d'adhérence » (en anglais, anti-stripping agents, adhesion promoters ou wetting agents).

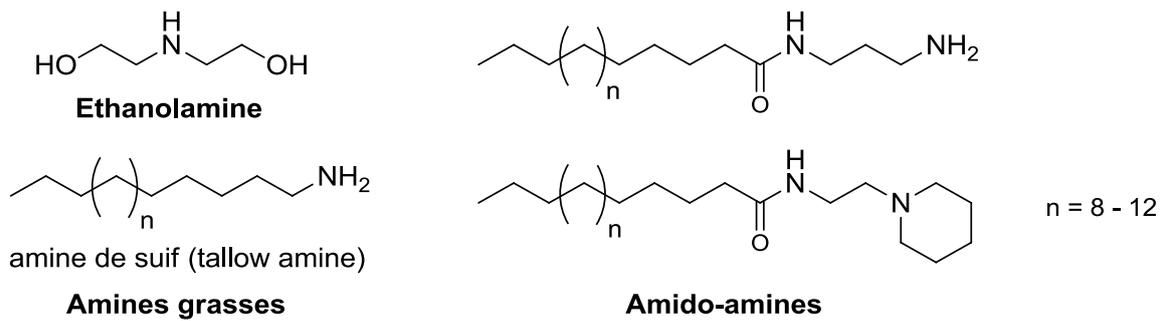


Figure 19 : Structures des principales classes d'amines employées en tant que dopes d'adhésivité

Ces dérivés sont presque toujours dérivés d'acides gras (suif), saturés et parfois insaturés. Des dérivés type imidazolines ou pyrimidines sont aussi souvent employés. Ils sont fabriqués à partir d'acides gras et de polyamines, et résultent respectivement de la déshydratation intramoléculaire des adduits avec une polyéthylène poly-amine ou une polypropylène poly-amine (Figure 20).

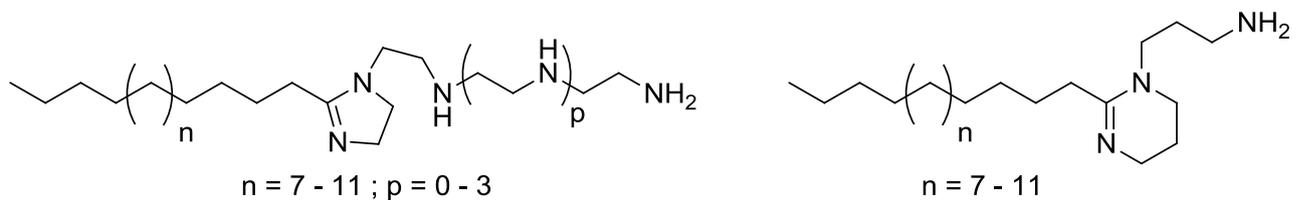


Figure 20 : Imidazolines et pyrimidines employées en tant que dopes d'adhésivité

Les produits commerciaux proposés sont le plus souvent des mélanges de ces composés. Ce sont des liquides, de viscosité parfois assez élevée (1000 mPa.s), et utilisés à hauteur de 0,2 à 1 % environ (2 à 10 kg/T) par rapport au bitume dans les formulations d'enrobés.

On distingue deux types de dopes :

- le dopage dans la masse, qui a essentiellement une action de maintien du collage liant-gravillons dans le temps. Dans le souci d'obtenir une bonne homogénéité, le dope d'adhésivité doit être intimement mélangé au liant, que ce soit au niveau du stockage ou directement dans le matériel de répandage. Il est indiqué d'effectuer cette opération à poste fixe avec des équipements adéquats ;

- le dopage à l'interface, qui permet surtout de favoriser le mouillage immédiat du gravillon au contact avec le liant. Le dosage en produit pur appliqué est de l'ordre de 3 g/m². Le produit pulvérisé est une solution ou une dispersion généralement dosée à 10% de produit actif. Ce dopage nécessite aussi un matériel spécial.

Les techniques faisant appel aux dopes d'adhésivité sont principalement les enduits superficiels au bitume pur ou bitume fluxé, ainsi que les enrobés à chaud. En revanche, le dopage peut perturber la rupture des émulsions et est généralement proscrit pour ce type d'utilisations.

3.3.5 Métaux et agents captant l'hydrogène sulfuré (H₂S)

Outre les métaux contenus naturellement dans les bitumes, certains sont ajoutés sous forme de composés organométalliques, afin d'en améliorer certaines propriétés. En premier lieu, de tels composés permettent une oxydation partielle des molécules constituant le bitume. Cette

oxydation est intéressante, car elle introduit des fonctions oxygénées supplémentaires, ce qui conduit à une augmentation de la polarité globale du bitume et améliore l'adhésion aux granulats. En outre, l'oxydation par les composés organométalliques permet la création de ponts de réticulation entre chaînes moléculaires du bitume, éventuellement via les métaux présents, ce qui augmente la résistance mécanique du revêtement après sa pose. Enfin, les composés obtenus par cette réaction d'oxydation protègent à leur tour le bitume d'une oxydation ultérieure par l'oxygène de l'air lors du vieillissement, qui peut dans certains cas conduire à des ruptures de chaînes carbonées. Les composés utilisés ici sont principalement des carboxylates de manganèse.

Une autre utilisation de composés métalliques vise au piégeage des traces résiduelles d'hydrogène sulfuré (H_2S) potentiellement présent dans les bitumes. Le H_2S peut aussi être relargué dans le temps suite à la décomposition de certains composés soufrés présents dans les bitumes (d'origine naturelle, ou bien utilisés comme additifs – agents de vulcanisation par exemple). Ces composés (scavengers en anglais) peuvent être utilisés lors du stockage des bitumes.

Diverses techniques sont possibles pour piéger le H_2S . Pour les bitumes, on privilégie l'addition d'un composé soit organique (éthanolamine le plus souvent mais également morpholine, éthylènediamine, picolines, éventuellement salifiées par un acide carboxylique), soit organométallique.

Dans le cas de dérivés de métaux, on emploie des carboxylates de certains métaux comme le zinc, le fer, le magnésium, le cobalt ou encore le cuivre. Ces métaux possèdent en commun le fait de conduire à des sulfures stables. L'acide carboxylique rencontré est le plus souvent l'acide octanoïque ou l'acide naphthénoïque. On emploie une quantité relativement faible de ces additifs (0,1 voire 0,2 % maximum par rapport au bitume – 1000 à 2000 ppm).

Les métaux peuvent aussi être présents sous forme de complexes d'amines (ammoniac, éthylènediamine). Alors, d'une part, ils peuvent réagir avec les dérivés soufrés pour conduire à des sulfures et d'autre part, la basicité de l'amine est utilisée pour neutraliser le H_2S .

3.3.6 Polymères

L'addition de polymères aux bitumes permet d'obtenir une amélioration de certaines propriétés des revêtements, comme la résistance aux carburants des revêtements anti-K (anti-kérosène), ou bien la résistance à l'usure et à l'orniérage. Les principaux polymères employés sont le SBS, le caoutchouc naturel, l'EVA (Éthylène vinyle acétate, copolymère de l'éthylène et de l'acétate de vinyle) et le polyéthylène (PE). La teneur en polymère usuelle est de 2 à 7 % par rapport au liant. Selon les sources bibliographiques recensées, d'autres polymères peuvent également être ajoutés aux bitumes (Eurobitumes and Asphalt Institute 2011; Mundt, Marano *et al.* 2009; USIRF 2001; USIRF 2003).

Une liste des principaux élastomères et plastomères potentiellement utilisés aujourd'hui est donnée dans le Tableau 9 ci-dessous :

Tableau 9 : Principaux polymères potentiellement employés dans la fabrication de liants bitumineux modifiés (LCPC 1999)

Nom	Type	Abréviations	Pourcentage dans le mélange final	Période
Les Copolymères Styrène-Butadiène-Styrène (en étoile)	Elastomère	SBS (SBS*)	3 à 5 1 à 10	De 1970 à aujourd'hui De 1985 à aujourd'hui
Les Copolymères Styrène-Butadiène		SB		
Caoutchouc synthétique type copolymères statistiques Styrène-Butadiène Rubber		SBR	3 à 5	De 1960 à aujourd'hui
Les copolymères Styrène-Isoprènes-Styrène		SIS	-	
Granules ou poudrette de caoutchouc (forme polychloropropène)		-	5 à 20	De 1960 à aujourd'hui
Caoutchouc naturel		-	-	-
Terpolymères Ethylène-Propylène-Diène Monomère		EPDM		
Copolymère Ethylène-Acétate de Vinyle		Plastomère	EVA	0.1 à 2
Copolymères Ethylène-Acrylate de Méthyle	EMA		-	-
Copolymères Ethylène-Acrylate de Butyle	EBA		-	-
Les polyisobutylènes	PIB		-	-
Polyéthylène	PE			
Polyéthylène Haute Densité	PEHD			
Polypropylène	PP			
Polypropylène atactique	APP			
Chlorure de polyvinyle	PVC			

Ces polymères sont tous d'origine pétrochimique. Ils peuvent être soit neufs, soit issus de produits recyclés finement broyés (vieux pneus, tuyaux PE ou PVC - Polychlorure de vinyle - usagés, câbles électriques ou téléphoniques, surplus de productions...). Dans le cas d'émulsions, le polymère peut être ajouté sous forme de latex. Le principal polymère employé est le SBS. De nombreuses structures de ce polymère sont disponibles (linéaires, étoilés, partiellement hydrogénés...), et le choix se fait en fonction de la compatibilité avec le

bitume et de leurs caractéristiques mécaniques (température de transition vitreuse⁵). La masse moléculaire des SBS employés se situe généralement entre 80 000 et 300 000 g/mol.

L'addition de polymère par simple mélange physique (broyage) conduit généralement à un système tri-phasique au niveau microscopique : une phase continue maltène contient des particules d'asphaltènes et des particules de polymères (ces composés ne sont pas miscibles). Selon la teneur en polymère, la phase continue peut devenir le polymère lui-même, gonflé par les maltènes (LCPC 1999). Le mélange s'effectue à des températures de l'ordre de 180 à 200 °C, selon les cas. Le système résultant doit être maintenu sous agitation pour éviter sa démixion. En outre, on observe une augmentation de viscosité du système (Arslan, Gürü *et al.* 2011), qui peut être en partie compensée par l'ajout d'un solvant. Ce dernier devant être compatible avec les maltènes afin d'éviter toute démixion, il doit être principalement aromatique (Gorbatovskii, Rozental *et al.* 2007).

Il est aussi possible de préparer et/ou de stabiliser ces systèmes par l'ajout d'un agent vulcanisant. Il s'agit ici de créer des liaisons chimiques entre les chaînes de polymères et/ou avec les molécules du bitume. La principale solution consiste à ajouter du soufre ou un dérivé soufré au milieu à hauteur de 0,1 à 1 % massique par rapport au liant. Même si les dérivés soufrés potentiellement utilisés sont très nombreux et si des accélérateurs de vulcanisation non donneurs de soufre peuvent être trouvés (une liste exhaustive des agents potentiellement utilisés est donnée dans la demande de brevet FR2891547), les seuls exemples portés à la connaissance du GT sont tous à base de soufre élémentaire. De l'acide phosphorique peut aussi être employé à cet effet.

Des additifs spécifiques ont été développés pour stabiliser les bitumes-caoutchouc car la compatibilité entre la matrice bitume et le caoutchouc (naturel ou élastomère synthétique) est très faible : un polymère cyclique de l'octyne-1 (*trans* polyoctène rubber), permet d'assurer une compatibilité physique entre le liant et le caoutchouc. On peut aussi utiliser des agents de couplage, qui permettent un lien moléculaire entre les deux partenaires, comme le C-méthylcalix[4]résorsinarene (González, Martínez-Boza *et al.* 2010). Ce dernier produit est un oligomère cyclique dérivé du résorcinol et du formaldéhyde.

Une réticulation avec certains constituants du bitume peut aussi être obtenue en utilisant des polymères réactifs, souvent des terpolymères à base d'éthylène et d'acrylates comprenant soit un acrylate de glycidyle, soit de l'anhydride maléique. Dans ces cas, une liaison chimique est formée entre un groupement acide carboxylique du bitume et la fonction réactive du polymère, et assure une bonne stabilité au mélange bitume-polymère.

3.3.7 Fibres

L'utilisation de fibres pour préparer des matériaux dit composites est une technique répandue dans de nombreux domaines. On trouve ainsi divers types de matériaux à base de bitumes et de fibres, utilisés dans les revêtements d'étanchéité (mastics, bardeaux par exemple). Diverses fibres peuvent aussi être utilisées en association avec des bitumes routiers afin d'en améliorer certaines propriétés (LCPC 1999). Parmi celles-ci, on distingue particulièrement : un effet anti-égouttage, qui permet d'accroître la teneur en liant de certains enrobés, ou encore de stabiliser les émulsions de bitumes ; un effet d'amélioration de certaines propriétés mécaniques (résistance mécanique, adhérence, durabilité).

⁵. La température de transition vitreuse caractérise le changement d'état du polymère ou du matériau composite polymérisé, entraînant des variations importantes de ses propriétés mécaniques. En dessous de cette température, le polymère est dit vitreux (état solide) et présente le comportement d'un corps solide élastique. Au dessus il présente un comportement de solide plastique, suite à l'affaiblissement de liaisons intermoléculaires.

On appelle fibre tout matériau d'aspect filamenteux (ou encore en forme de cheveu), défini par une longueur et un diamètre. Ces fibres peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et diverses natures de fibres peuvent être utilisées en association avec les bitumes :

- fibres minérales : fibre de verre, de roche ;
- fibres naturelles : fibres de cellulose ;
- fibres synthétiques : fibres de polyester, de polyéthylène ou de polypropylène.

Il est à noter que les fibres minérales naturelles type amiante (chrysolite principalement) ont été employées dans des secteurs géographiques restreints, approximativement entre 1970 et 1990, et ne sont plus utilisées depuis l'interdiction de ce type de fibres en France (1997).

Les fibres les plus employées sont les fibres de cellulose, puis de verre et de polyester. Le coût relativement important des fibres conduit à un dosage de 0,1 à 0,3 % par rapport aux granulats en moyenne dans les émulsions, et jusqu'à 0,5 % dans les revêtements comme les SMA (Stone Mastic Asphalt, très peu employés en France).

Toutes ces fibres sont des matériaux de dimensions micrométriques, leur diamètre étant de l'ordre de la dizaine de microns (5 à 50µm en général), et leur longueur de l'ordre du millimètre (0,2 à 6mm). Ce sont tous des matériaux inertes à température ambiante dont seule la résistance à la température varie en fonction de leur composition : de très élevée pour les fibres minérales, elle peut baisser jusqu'à 220 °C pour le polyester, même 140 °C pour la cellulose.

3.3.8 Emulsions de bitumes

La mise en émulsion aqueuse est une technique employée dans d'autres contextes (latex, peintures, etc.) et qui permet de diminuer efficacement la viscosité d'un liant organique et par conséquent, sa température de mise en œuvre. Dans le cas des liants bitumineux, la formulation est rendue délicate par la nécessité d'éliminer complètement l'eau du revêtement lors du séchage et de rendre ce dernier hydrophobe, l'une des propriétés recherchées étant son étanchéité. De manière très schématique, la mise en émulsion des bitumes consiste à stabiliser des gouttelettes de bitume dans de l'eau grâce à l'emploi de tensioactifs qui peuvent être anioniques, cationiques ou neutres. Ces émulsions sont obtenues par mélange sous fort cisaillement d'un bitume avec un mélange eau/tensio-actif. On obtient ainsi une émulsion directe, système liquide bi-phasique constitué de gouttelettes de bitume entourées de molécules de tensio-actif, dans une phase eau continue. Ces gouttelettes ont une taille de l'ordre de 1 à 10 micromètres en moyenne. La viscosité de l'ensemble est faible dès que l'eau représente 20 à 25 % du système. Une composition typique pour une émulsion comprend 40 à 75 % de bitume, 25 à 60 % d'eau et 0,1 à 2,5 % de tensio-actif (TRB 2006). On peut aussi trouver dans une émulsion de bitume, une faible quantité de chlorures (de sodium ou de calcium, afin de réduire la pénétration de l'eau dans les gouttelettes de bitume par osmose), des fluxants et/ou des additifs comme des polymères sous forme de latex.

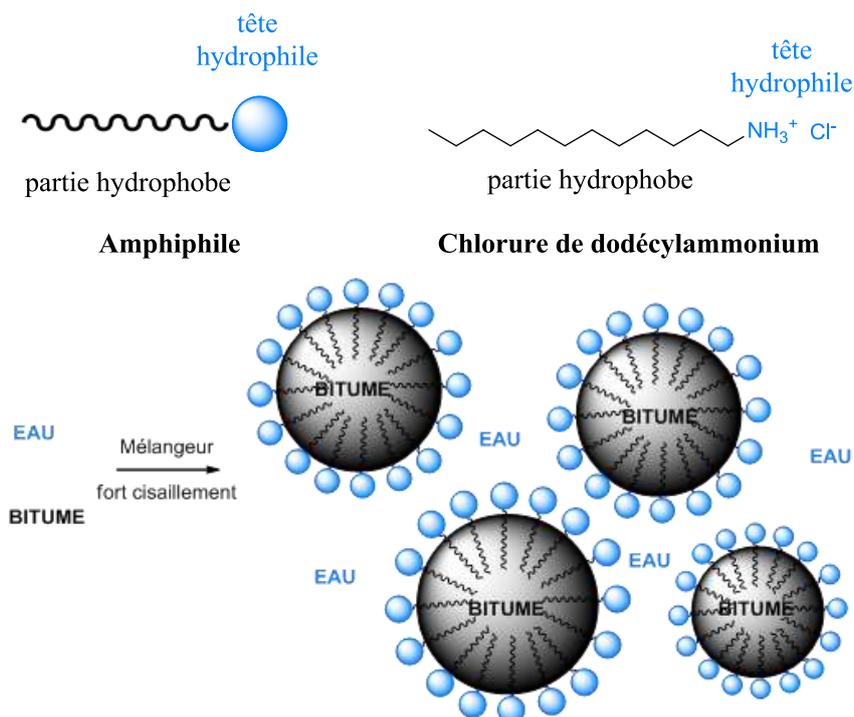


Figure 21 : Molécules à caractère tensio-actif et micelles de bitume dans l'eau

Les tensio-actifs, ou amphiphiles, sont des molécules présentant une partie hydrophile (tête polaire) et une partie hydrophobe (souvent une chaîne aliphatique, Figure 21). Comme tensio-actifs anioniques, les systèmes classiques (arylsulfonates) sont souvent cités, mais ne sont plus employés dans les gammes actuelles d'émulsions à notre connaissance. Le principal émulsifiant cationique utilisé est le chlorure de dodécylammonium. On trouve aussi souvent des mélanges d'amines, de polyamines, d'imidazolines et/ou d'amidoamines, protonnées par l'ajout d'acide chlorhydrique ou parfois d'acide phosphorique. Ce sont généralement des amines dérivés du suif, un mélange d'acides gras bon marché (Rodríguez-Valverde, Ramón-Torregrosa *et al.* 2008). Les amines employées sont souvent les mêmes que celles constituant les dopes d'adhésivité (cf. 4.3.4). Quelques exemples de structures complémentaires sont donnés ci-après (Figure 22).

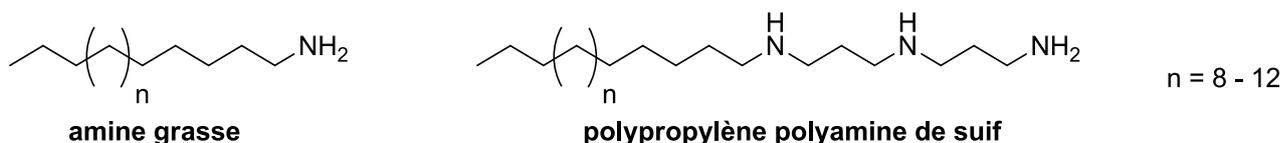


Figure 22 : Structures chimiques des principales amines employées pour la fabrication d'émulsions cationiques

Des tensio-actifs non-ioniques existent aussi, leur tête polaire est souvent à base de chaînes type poly-oxyde d'éthylène. Ces agents surfactants peuvent aussi être employés, mais sont bien moins souvent rencontrés, notamment en raison de l'effet négatif de l'éthoxylation sur l'adhésion du composant bitumineux sur l'agrégat. On trouve néanmoins parfois ce type de tensio-actif en combinaison avec les tensio-actifs cationiques décrits précédemment. Les principaux rencontrés sont l'alcool céto-stéarylique éthoxylé, les alcools gras éthoxylés de manière plus générale, introduits à hauteur de 2 à 10 % en masse dans la solution émulsifiante. On trouve aussi des polyamines propoxylées. En revanche, même si leur emploi apparaît possible à la lecture de certains brevets, les alkylphénols éthoxylés ne sont pas employés comme émulsifiants à notre connaissance.

Parmi les évolutions récentes décrites, on trouve des surfactants zwitterioniques (ou tensio-actifs amphotères), comme les esters dérivés de la glycine, dérivés « 100 % d'origine végétale » (Goursaud, Berchel *et al.* 2008), ou des bétaines comme les cocoamidopropyl bétaine (CAS 70851-07-9), cocoamphoacétate de sodium (CAS 68650-39-5), ou cocoamidopropyl hydroxysultaine (CAS 70851-08-0). Tous ces produits sont disponibles commercialement.

Les gouttelettes de bitumes ont une charge de surface positive qui les empêche de se rencontrer, ce qui stabilise l'émulsion. Lors de l'utilisation d'émulsions pour la fabrication d'un revêtement, il est possible d'ajouter un rupteur d'émulsion, agent qui permet la neutralisation des charges de surfaces, et par là même, la floculation puis la coalescence (fusion) des gouttelettes. Après coalescence, la phase continue du liant est constituée de bitume et l'eau se retrouve emprisonnée sous forme de gouttelettes à son tour dans la matrice bitume et diffuse doucement hors de cette matrice (Figure 23). Le tensio-actif reste dans le liant, mais peut en être lessivé progressivement par les eaux de ruissellement. Les agents rupteurs d'émulsions principalement utilisés sont du ciment Portland ou de la chaux. Selon le cahier des charges du chantier (mise sous trafic immédiate) et les conditions climatiques, on choisira le rupteur et la quantité à ajouter afin d'obtenir une coalescence plus ou moins rapide.

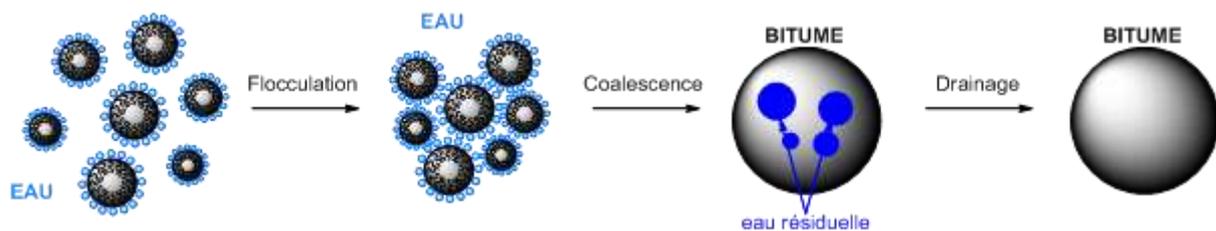


Figure 23 : Principe schématique de la formation du film de liant à partir d'une émulsion aqueuse

Le départ de l'eau suite à la rupture de l'émulsion fait que seul le liant reste au contact des granulats. Le principal avantage des émulsions de bitume est que leur stockage et leur application se font à température ambiante, voire jusqu'à 70 – 80°C.

3.4 Méthodes d'analyse et de caractérisation associées

De nombreuses méthodes d'analyse peuvent être employées pour caractériser la composition des bitumes ainsi que des liants bitumineux. Les principales sont énumérées ci-dessous et décrites en Annexe 5 :

- Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) ;
- La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) ;
- La distillation simulée ;
- La chromatographie de perméation sur gel (Gel Permeation Chromatography ou GPC) ;
- La séparation par classe de composés par la chromatographie d'adsorption.

3.5 Conclusions concernant la composition des liants bitumineux

Le nombre de composés présents dans les bitumes est très important, la plupart n'ayant d'ailleurs pas été identifiés. Par ailleurs, il existe une grande diversité d'additifs employés pour la formulation des liants bitumineux.

Il n'est donc pas possible, en l'état actuel des connaissances, d'établir un profil type de composition d'un liant bitumineux.

4 Réglementation et spécifications liées à la fabrication et à l'utilisation des produits bitumineux et de leurs additifs

La réglementation en matière d'utilisation des produits dangereux s'appuie notamment sur l'enregistrement des substances chimiques au niveau européen (règlement Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemical substances (REACH)), accompagné, le cas échéant d'une classification et d'un étiquetage approprié selon les critères du règlement européen CLP (Classification, Labelling, Packaging). Il en résulte, lorsque la substance est classée comme dangereuse, la remise, avec le produit, d'une fiche de données de sécurité (FDS), qui récapitule l'ensemble des informations à destination de l'utilisateur.

4.1 Réglementation REACH

4.1.1 Généralités

Le règlement européen n°1907/2006 du Parlement européen et du Conseil, du 18 décembre 2006, concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques appelé communément règlement REACH est entré en vigueur le 1^{er} juin 2007 dans tous les états membres de l'Union Européenne. Il a pour objectif d'accroître et de consolider la connaissance des propriétés et des usages des substances chimiques produites ou importées sur le marché européen afin d'assurer une meilleure protection de la santé et de l'environnement. Le règlement REACH s'applique aux substances fabriquées ou importées à plus d'une tonne par producteur ou importateur et par an dans l'Union Européenne.

L'enregistrement des substances constitue l'un des processus fondamentaux de REACH. A terme, toute substance produite ou importée à plus d'une tonne par an et n'ayant pas été enregistrée ne pourra être mise sur le marché. Le règlement prévoit que les entreprises concernées constituent et déposent un dossier d'enregistrement contenant des informations sur les propriétés physico-chimiques, toxicologiques et écotoxicologiques des substances⁶ qu'ils produisent ou importent et qu'elles s'assurent que celles-ci ne présentent pas de risques pour la santé humaine ou l'environnement.

L'évaluation des substances est principalement menée par les Etats membres (mais coordonnée par l'Agence européenne des produits chimiques/European Chemicals Agency – ECHA) qui peuvent mettre en œuvre, le cas échéant, les outils appropriés pour gérer les risques sanitaires ou environnementaux identifiés (classification, autorisation, restriction).

L'article 3 du règlement REACH définit une substance comme « *un élément chimique et ses composés à l'état naturel ou obtenus par un processus de fabrication, y compris tout additif nécessaire pour en préserver la stabilité et toute impureté résultant du processus mis en œuvre, mais à l'exclusion de tout solvant qui peut être séparé sans affecter la stabilité de la substance ou modifier sa composition* ». Cette définition va au-delà d'un composé chimique pur, défini par une structure moléculaire unique. Typiquement, les substances incluses dans le champ d'application du règlement REACH sont le produit d'une réaction chimique lors de la fabrication et peuvent contenir des constituants multiples distincts.

⁶ Le niveau d'information dépend du tonnage de production / importation, Pour plus d'information, se reporter au règlement REACH CE n° 1907/2006 et en particulier aux annexes VII à XI.

Afin d'en faciliter l'identification et la nomenclature, les substances chimiques, telles que définies dans le règlement REACH, sont réparties deux catégories distinctes :

1. Les substances bien définies, dont les compositions qualitative et quantitative sont définies. Cette catégorie se divise en trois sous-catégories : les substances mono-constituant, les substances multi-constituants et les substances définies par autre chose que leur simple composition chimique ;
2. les substances UVCB⁷ de composition inconnue ou variable, produits de réactions complexes ou matériels biologiques. Ces substances sont à distinguer des mélanges⁸.

Les substances UVCB ne peuvent pas être identifiées de façon satisfaisante par leur composition chimique. C'est pourquoi, une substance UVCB est entre autres définie par la source et les étapes clefs les plus pertinentes du processus de sa fabrication.

Pour autant, si un ou plusieurs constituants systématiquement présents dans ce type de substance sont identifiés à une concentration supérieure à 10 %, ce dernier doit faire l'objet d'une déclaration comprenant le nom IUPAC, le numéro et nom CAS ainsi que sa concentration accompagnée des intervalles de concentration type.

4.1.2 Cas des bitumes

Les bitumes sont enregistrés⁹ en tant que substances UVCB (substances obtenues à partir d'huile ou de sources analogues à l'huile) et ne peuvent pas être identifiés de façon satisfaisante par leur composition chimique en raison de :

- Un nombre de constituants particulièrement élevé supérieur à 10000 composés ;
- Une composition significativement inconnue, notamment du fait que les produits bitumineux répondent à la définition d'un équilibre colloïdal complexe ;
- Une variabilité de leur composition relativement grande et difficilement prédictible puisque les produits bitumineux comportent une signature chimique spécifique.

Les bitumes sont des substances concernées par le règlement REACH et doivent faire l'objet de dossiers d'enregistrement. Etant importées ou produites à plus de 10 tonnes par an, les substances ont déjà fait l'objet d'un enregistrement au 30 novembre 2010.

Le CONCAWE, missionné pour piloter le dossier REACH pour l'industrie du pétrole, a déposé les dossiers d'enregistrement relatifs aux bitumes. D'après l'audition menée par l'Anses auprès des représentants de l'industrie du pétrole, les principales substances bitumineuses produites en France faisant l'objet d'un enregistrement dans le règlement REACH se limitent à deux catégories :

- celle des « bitumes ». Le CONCAWE a déposé un dossier d'enregistrement pour les substances UVCB suivantes : « asphalt » (n° CAS : 8052-42-4), « residues (petroleum), vacuum » (n° CAS : 64741-56-6), « residues (petroleum), distillation.

⁷ Unknown or Variable composition, Complex reaction products or Biological materials

⁸ Mélange ou solution composé de deux substances ou plus

⁹ La substance a bien été enregistrée dans le cadre du règlement REACH mais elle n'a pas fait l'objet d'une évaluation par l'ECHA ou l'un des Etats membres.

residue hydrogenation » (n° CAS : 100684-39-7), « residues (petroleum), thermal cracked vacuum » (n° CAS : 92062-05-0) et « vacuum distillation. residue hydrogenation » (n° CAS : 100684-40-0).

- celle des « bitumes oxydés » (n°CAS : 64742-93-4) obtenus par soufflage d'air. Le CONCAWE distingue deux sous-catégories pour les bitumes oxydés avec d'une part, les bitumes rectifiés à l'air permettant d'obtenir des grades de bitumes équivalent à ceux des bitumes utilisés en construction routière (indice de pénétrabilité ≤ 2 ; défini dans l'Annexe 3) et d'autre part les bitumes oxydés nécessitant une durée de soufflage plus longue pour obtenir des bitumes plus durs, généralement destinés au domaine de l'étanchéité (indice de pénétrabilité > 2).

Le tableau en Annexe 6 résume les informations présentes dans les enregistrements des substances bitumineuses dans le règlement REACH.

4.2 Réglementation CLP

Le règlement (CE) n° 1272/2008 du 16 décembre 2008 dit règlement CLP¹⁰ est l'instrument réglementaire permettant de faire appliquer les recommandations du SGH (Système Global Harmonisé de classification et d'étiquetage) au sein de l'Union Européenne. Il définit les obligations concernant la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances et des mélanges.

Ce règlement remplacera progressivement, jusqu'en 2015, la législation communautaire actuelle constituée de 2 directives : la directive 67/548/CE relative à la classification, l'étiquetage et l'emballage des substances dangereuses (transposée en droit français par l'arrêté du 20 avril 1994 modifié) et la directive 1999/45/CE relative à la classification, l'étiquetage et l'emballage des préparations dangereuses (transposée en droit français par l'arrêté du 9 novembre 2004). A titre d'information, les classes de dangers du règlement CLP sont rappelées en Annexe 7.

Entré en vigueur le 20 janvier 2009, le règlement CLP prévoit néanmoins une période de transition durant laquelle l'ancien et le nouveau système de classification et d'étiquetage coexistent. La mise en application du nouveau règlement est devenue obligatoire au 1^{er} décembre 2010 pour les substances et le sera pour les mélanges à partir du 1^{er} juin 2015.

4.2.1 Cas des bitumes

A l'heure actuelle, il n'existe pas de classification harmonisée pour les bitumes routiers. C'est également le cas des bitumes oxydés bien que l'expertise du CIRC dans le cadre de la monographie 103 a choisi de proposer un classement 2A (cancérogène probable pour l'Homme) qui pourrait amener à revoir la définition de la classe de danger pour ce type de substance.

Il est donc par conséquent de la responsabilité du producteur, importateur ou utilisateur en aval d'établir la classification de la substance selon les règles fixées par le règlement CLP (article 4 du règlement CLP). Dans chacun des dossiers d'enregistrement disponibles en ligne sur le site de l'ECHA, aucune substance enregistrée n'a été classée dangereuse par le déclarant.

¹⁰ CLP : classification, étiquetage et emballage

Dans le cadre du règlement CLP, les fabricants et importateurs doivent notifier des classifications et étiquetages des substances qu'ils mettent sur le marché (article 39 à 42 du règlement CLP). Toutes ces notifications sont regroupées dans une base de données tenue par l'ECHA.

Cette notification s'applique à toutes les substances mises sur le marché dans l'UE :

- si elles sont classées dangereuses, quelles que soient les quantités ;
- si elles ne sont pas classées dangereuses mais soumises à l'obligation d'enregistrement conformément au règlement REACH.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une classification harmonisée, cet inventaire constitue une source centrale d'informations sur la classification et l'étiquetage des substances pour tous les utilisateurs de produits chimiques.

Le Tableau 10 ci-dessous retranscrit la notification dans laquelle la substance est classée la plus dangereuse. Attention, dans ce tableau, les notifiants n'ont pas forcément tous classé les mêmes substances avec les mêmes classes de dangers.

Tableau 10 : Notifications de classification disponibles sur le site de l'ECHA

Substances	N°CAS	Registre d'intentions (proposition de classification harmonisée en cours)	Inventaire classification
Asphalt	8052-42-4	Non	H315 – Provoque une irritation cutanée H319 – Provoque une sévère irritation des yeux 
Residues (pétroleum), vacuum	64741-56-6	Non	H351 – Susceptible de provoquer le cancer 
residues (pétroleum), distillation. residue hydrogenation	100684-39-7	Non	Aucune notification associant la substance à un danger
residues (pétroleum), thermal cracked vacuum	92062-05-0	Non	Aucune notification associant la substance à un danger
vacuum distillation. residue hydrogenation	100684-40-0	Non	Aucune notification associant la substance à un danger
Les bitumes oxydés	64742-93-4	Non	H315 – Provoque une irritation cutanée H319 – Provoque une sévère irritation des yeux 

Conformément à l'article 42 du règlement CLP, la plateforme C&L¹¹ a été inaugurée le 31 janvier 2013. Cet outil en ligne a pour objectif de faciliter la communication entre les acteurs qui doivent s'accorder sur la classification et l'étiquetage des substances conformément à l'article 41 du règlement CLP. Le GT encourage les acteurs concernés à ouvrir un espace de discussion pour chaque substance dont les auto-classifications de l'inventaire diffèrent dans le but de parvenir à un accord sur la classification.

4.2.2 Cas des mélanges

Les mélanges, dont ceux à base de bitumes, doivent toujours être classés selon le règlement CLP (ou la directive 1999/45/CE) selon une approche par palier. Les méthodes dépendent du type d'effet et des données disponibles. L'appartenance à une catégorie de dangers peut provenir soit :

- D'une évaluation du mélange en tant que tel vis-à-vis du danger considéré (si les données du mélange lui-même sont disponibles) ;
- D'une approche par extrapolation si des informations suffisantes existent sur des mélanges similaires ayant fait l'objet d'essais ;
- Ou encore de la présence dans le mélange de substances dont l'évaluation faite par ailleurs dans le cadre du même règlement conduit au danger en question, la catégorie finale pour le mélange dépendant alors de la quantité de ladite substance dans le mélange considéré, ou du cumul des quantités dans le cadre de l'emploi de plusieurs substances présentant le même danger.

4.3 Fiches de données de sécurité

4.3.1 La Fiche de données de sécurité

La fiche de données de sécurité (FDS) reste le principal outil de transmission d'information à l'intérieur de la chaîne d'approvisionnement et chaque acteur a des obligations concernant la FDS. Ces FDS rappellent les éléments techniques enregistrés dans le dossier REACH, ainsi que des recommandations sur la manipulation des produits bitumineux concernés. Une FDS doit être fournie spontanément, selon les dispositions prévues par le règlement REACH :

- Lorsqu'une substance est classée comme dangereuse, c'est-à-dire qu'elle répond aux critères de classification comme substance dangereuse conformément au CLP ou qu'un mélange est classé comme dangereux, c'est-à-dire qu'il répond aux critères de classification comme produit dangereux conformément à la directive 1999/45/CEE. En effet, le règlement CLP ne sera obligatoire pour les mélanges qu'à partir du 1^{er} juin 2015.
- Lorsqu'une substance est PBT ou vPvB¹² conformément aux critères définis à l'annexe XIII de REACH;
- Lorsqu'une substance est incluse sur la liste des substances candidates à la procédure d'autorisation conformément à l'article 59, paragraphe 1 de REACH, pour des raisons autres que celles des deux points précédemment cités.

¹¹ Classification and Labelling

¹² PBT : Persistante, bioaccumulative et toxique
vPvB : Très persistante et très bioaccumulative

Elle doit également être donnée par les fournisseurs sur demande du client pour certains mélanges ne répondant pas aux critères de classification en tant que mélanges dangereux, mais qui contiennent certaines substances à des concentrations supérieures à des seuils définis (cf. Art 31(3) du règlement REACH).

Conformément à cette démarche, les entreprises pétrolières et des groupes industriels de la construction et de l'entretien des routes interrogés lors des auditions menées dans le cadre de la présente étude ont précisé que la fourniture spontanée d'une FDS n'est pas obligatoire, ni pour les substances bitumineuses, ni pour des mélanges à base de bitume classés comme non dangereux.

Pour autant, la plupart de ces entreprises ont choisi de produire ces fiches de données de sécurité. Néanmoins, au cours des auditions, la difficulté à obtenir des fiches de données de sécurité a aussi souvent été évoquée.

4.3.2 La fiche de données de sécurité étendue

Une évaluation de la sécurité chimique (CSA) est effectuée et un rapport sur la sécurité chimique (CSR) est établi pour toutes les substances faisant l'objet d'un enregistrement en quantité égale ou supérieure à 10 tonnes par an et par déclarant.

Une évaluation de la sécurité chimique d'une substance comprend les étapes suivantes : une évaluation des dangers pour la santé humaine, une évaluation des dangers physicochimiques, une évaluation des dangers pour l'environnement et une évaluation des caractères PBT et des caractères vPvB.

Si le déclarant conclut que la substance répond aux critères de classification d'une substance dangereuse conformément au règlement CLP ou si la substance est évaluée comme étant PBT ou vPvB, l'évaluation de la sécurité chimique comporte une évaluation de l'exposition, comprenant la production de scénarios d'exposition et une estimation de l'exposition. Dans ce cas là, les scénarios d'expositions élaborés doivent être annexés à la FDS du produit qui porte le nom de FDS étendue.

Dans le cadre des substances bitumineuses, deux CSR ont été réalisés. Le premier concerne la catégorie « bitume » et l'autre celle du « bitume oxydé ». Les substances n'étant pas classées par le déclarant, l'évaluation de l'exposition et la caractérisation des risques ne sont pas requises.

4.3.3 Recommandation de la profession

La profession indique des recommandations d'usage et d'utilisation, et plus particulièrement des recommandations concernant les températures maximales à ne pas dépasser vis-à-vis des règles d'hygiène et de sécurité : selon la profession, les températures doivent être inférieures à 200°C pour les bitumes dits routiers (inférieures dans tous les cas au point éclair moins 30°C).

Il est à noter que les utilisations déconseillées, ainsi que les raisons pour lesquelles elles sont déconseillées, doivent être précisées par le fournisseur dans la section 1.2 de la FDS. Dans le cas des substances bitumineuses, le GT préconise que cette température d'utilisation soit mentionnée dans cette section en cas de rédaction de ce document.

4.4 Valeurs guides

Le bitume, en tant que produit massif, n'est actuellement soumis à aucune valeur limite d'exposition professionnelle. En revanche, des valeurs guides sont disponibles sur les fumées de bitume puisqu'aux Etats-Unis, l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) propose depuis l'année 2000 une TLV-TWA (valeur limite d'exposition sur une journée de travail de 8h) de 0,5 mg.m⁻³ qui concerne la fraction soluble dans le benzène de la matière particulaire totale inhalable. Cette valeur n'est en revanche pas contraignante.

Les valeurs guides pour les bitumes et leurs fumées sont assez disparates selon les pays considérés. Le Tableau 11 ci-dessous illustre le manque de consensus au sujet des valeurs de références pour les émissions liées à ces substances :

Tableau 11 : Valeurs limites d'exposition professionnelle pour les fumées de bitumes (base GESTIS, 2013)

Pays (organisme)	Valeurs guides	Type de valeur
France	5 mg.m ⁻³	empoussièrement total (s'applique aux fumées de bitume par défaut)
Union européenne	Pas de limite	
VLEP 8 h / Asphalt, petroleum fumes (CAS :8052-42-4)		
USA (ACGIH)	0,5 mg.m ⁻³	fraction soluble dans le benzène de la matière particulaire totale
Australie	5 mg.m ⁻³	
Belgique	5 mg.m ⁻³	
Canada (ontario)	0,5 mg.m ⁻³	fraction soluble dans le benzène de la matière particulaire totale
Canada Québec	5 mg.m ⁻³	
Danemark	1 mg.m ⁻³	
Irlande	0,5 mg.m ⁻³	fraction inhalable
Nouvelle-Zélande	5 mg.m ⁻³	
Pologne	5 mg.m ⁻³	
Singapour	5 mg.m ⁻³	
Corée du Sud	0,5 mg.m ⁻³	
Espagne	0,5 mg.m ⁻³	fraction soluble dans le benzène d'aérosol de la matière particulaire totale
Suisse	10 mg.m ⁻³	
Royaume-Uni	5 mg.m ⁻³	
Valeur limite court terme / Asphalt, petroleum fumes (CAS : 8052-42-4)		
Danemark	2 mg.m ⁻³	
Irlande	10 mg.m ⁻³	fraction inhalable
Pologne	10 mg.m ⁻³	
Royaume Uni	10 mg.m ⁻³	VLE court terme sur particules totales
USA (NIOSH)	5 mg.m ⁻³	VLE court terme sur particules totales

De nombreux composés aromatiques polycycliques sont présents dans les bitumes ainsi que dans leurs émissions. Parmi les 16 HAP classés comme polluants prioritaires par l'agence

de protection de l'environnement des Etats-Unis (US EPA), 7 présentent un effet cancérigène pour l'Homme au niveau de la classification européenne (Tableau 12), et sont retrouvés à l'état de trace dans les bitumes. Il n'y a d'ailleurs pas de valeur guide associée à la somme des 16 HAP.

Tableau 12 : Classifications UE et CIRC des 16 HAP classés polluants prioritaires par l'US EPA

HAP	Nombre de cycles	Classification UE	Classification CIRC
Naphtalène	2	2	2B
Acénaphthylène	3		
Acénaphthène	3		3
Fluorène	3		3
Phénanthrène	3		3
Anthracène	3		3
Pyrène	4		3
Fluoranthène	4		3
Benzo(a)anthracène	4	1B	2B
Chrysène	4	1B	2B
Benzo(b)fluoranthène	5	1B	2B
Benzo(k)fluoranthène	5	1B	2B
Benzo(a)pyrène	5	1B	1
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	5		2B
Dibenzo(a,h)anthracène	6	1B	2A
Benzo(ghi)pérylène	6		3

En France, la CNAMTS (Caisse nationale de l'Assurance maladie des travailleurs salariés) recommande une valeur de 150 ng.m⁻³ spécifique au B[a]P, considéré comme traceur des HAP cancérigènes et applicable aux fumées de bitumes.

4.5 Dangers des additifs utilisés

Le 3^{ème} chapitre du rapport décrit les additifs pouvant être utilisés dans des formulations de bitumes. Certains sont des produits chimiques dangereux et réglementés. Le premier tableau ci-dessous (Tableau 13) illustre les principaux additifs qui sont classés dans l'annexe VI du règlement CLP.

Tableau 13 : Classifications harmonisées des principaux additifs utilisés dans les formulations de bitume

Additif	Nom de la substance	Numéro CAS	Classification selon le règlement CLP	Limites de concentrations spécifiques	Pictogramme de danger selon le règlement CLP	Note	Remarques
Fluxant	Kérosène (pétrole), hydrodésulfuré	64742-81-0	H304 - Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires			H	Retiré en 2010
Fluxant	Distillats légers (pétrole), craquage catalytique	64741-59-9	H350 - Peut provoquer le cancer			H	Retiré en 2000
Acide	Acide phosphorique... %	7664-38-2	H314 - Provoque de graves brûlures de la peau et des lésions oculaires	H314: C ≥ 25 % H315: 10 % ≤ C < 25 % H319: 10 % ≤ C < 25 %		B	Utilisé à des teneurs < 1% pour fabriquer les émulsions
Acide	Acide chlorhydrique... %	7647-01-0	H314 - Provoque de graves brûlures de la peau et des lésions oculaires	H314: C ≥ 25 % H315: 10 % ≤ C < 25 % H319: 10 % ≤ C < 25 % H335 : C ≥ 10 %		B	Utilisé à des teneurs < 0,5% pour fabriquer les émulsions
	Soufre	7704-34-9	H315 - Provoque une irritation cutanée				Utilisé à des teneurs < 1%
Solvant	Xylène	1330-20-7	H226 - Liquide et vapeurs inflammables H312 - Nocif par contact cutané H315 - Provoque une irritation cutanée H332 - Nocif par inhalation			C	Utilisé dans la formulation de certains vernis d'accrochage

La note H indique que la classification et l'étiquette mentionnées pour cette substance s'appliquent uniquement à la ou aux propriétés dangereuses indiquées par la ou les mentions de danger en liaison avec la classification de danger mentionnée. Les exigences de l'article 4 du règlement (CE) no 1272/2008 visant les fournisseurs de cette substance s'appliquent à toutes les autres classes, différenciations et catégories de danger. L'étiquette définitive est conforme aux exigences énoncées à l'annexe I, section 1.2, du règlement (CE) no 1272/2008.

La note B indique que les substances sont mises sur le marché en solutions aqueuses à des concentrations diverses et ces solutions nécessitent dès lors une classification et un étiquetage différents, car les dangers qu'elles présentent varient en fonction de la concentration.

La note C indique que la substance organique peut être commercialisée soit sous une forme isomérique bien définie, soit sous forme de mélange de plusieurs isomères.

De nombreuses autres substances ne sont pas classées dans l'annexe VI du règlement CLP et ne possèdent donc pas de classification harmonisée. Il est alors de la responsabilité des fabricants, importateurs ou utilisateurs en aval d'établir la classification des substances qu'ils mettent sur le marché selon les règles fixées par la réglementation (article 4 du règlement CLP).

L'ensemble de ces auto-classifications sont synthétisées dans le tableau suivant (Tableau 14). Dans le cas de certains additifs qui ne sont pas répertoriés au CAS, les classifications proposées proviennent de FDS recueillies auprès de certains industriels/utilisateurs, et dans le cas où le numéros CAS de certains additifs confidentiels ne nous a pas été communiqué, les classifications sont données à titre indicatif, et ont été obtenues lors des auditions menées auprès des industriels.

Tableau 14 : Auto-classifications des principaux additifs utilisés dans les formulations de bitume

Additif	Nom de la substance	Numéro CAS	Inventaire classification	Inventaire classification (pictogramme)	Part généralement ajoutée dans le liant
Fluxant	Extraits au solvant (pétrole), huile résiduelle	64742-10-5	H351 - Susceptible de provoquer le cancer		10%
Fluxant	Extraits au solvant (pétrole), résidu sous vide désasphalté	91995-70-9	H351 - Susceptible de provoquer le cancer		60-70% dans les liants synthétiques
Fluxant	coupe C15-C20 (désaromatisée)	Pas de numéro CAS	H304 - Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires		10,0%
Fluxant	Coupe C9 aromatique :	Pas de numéro CAS	H226 - Liquide et vapeurs inflammables H304 - Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires H335 - Peut irriter les voies respiratoires H336 - Peut provoquer somnolence ou vertiges H411 - Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme		3,0%
Fluxant	Coupe C11-C14 (<2% aromatiques) :	Pas de numéro CAS	H304 - Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires		10,0%
Poly-amine	Acides gras en C8-22, produits de réaction avec les polyalkylènes en C2-3 polyamines et les éthanolamines	84082-48-4	H314 - Provoque des brûlures de la peau et des lésions oculaires graves H317 - Peut provoquer une allergie cutanée H410 - Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme		0,5%
Poly-amine	Amines, suif alkyl[(tétrahydropyrimidiny)-3 propyl]	92797-22-3	H302 - Nocif en cas d'ingestion H314 - Provoque de graves brûlures de la peau et des lésions oculaires H318 - Provoque des lésions oculaires graves H410 - Très toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets à long terme		0,5%
Diamine grasse	Amines, N-suif alkyltriméthylènedi-	61791-55-7	H302 - Nocif en cas d'ingestion H314 - Provoque de graves brûlures de la peau et des lésions oculaires H318 - Provoque des lésions oculaires graves H372 - Risque avéré d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée H400 - Très toxique pour les organismes aquatiques		0,5%
H2S Scavenger	Carboxylate métallique	Pas de numéro CAS	H304 - Peut être mortel en cas d'ingestion et de pénétration dans les voies respiratoires H335 - Peut irriter les voies respiratoires H336 - Peut provoquer somnolence ou vertiges H351 - Susceptible de provoquer le cancer H411 - Toxique pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme		0,5%
Cire	cires de paraffine et cires d'hydrocarbures	8002-74-2	H370 - Risque avéré d'effets graves pour les organes		2%
Polymère	Poly(styrene-butadiène-styrene) (SBS)	91261-65-3	Non classé		3,0%
Polymère	Caoutchouc naturel	Pas de numéro CAS	Non classé		3,0%

Additif	Nom de la substance	Numéro CAS	Inventaire classification	Inventaire classification (pictogramme)	Part généralement ajoutée dans le liant
Polymère	Poly(styrene-butadiène-styrene) (SBS)	91261-65-3	Non classé		2-7%
Polymère	Caoutchouc naturel	Pas de numéro CAS	Non classé		10,0%
Polymère	Éthylène-acétate de vinyle (EVA)	24937-78-8	Non classé		3,0%
Anti racinaire	Poly(oxy-1,2-ethanediy),a-[2-(4-chloro-2-methylphenoxy)-1-oxopropyl]-w-[2-(4-chloro-2-methylphenoxy)-1-oxopropoxy]-(9Cl)	144768-02-5	H412 - Nocif pour les organismes aquatiques, entraîne des effets néfastes à long terme		2%

La part des additifs utilisés dans les liants bitumineux est suffisamment faible pour qu'aucune des préparations portées à la connaissance du GT ne justifie de classification en tant que substance dangereuse. Le GT attire néanmoins l'attention sur :

- la nécessité de faire manipuler ces additifs purs ou concentrés par du personnel qualifié et correctement équipé lors de la préparation des liants,
- le fait que la plupart données mentionnées dans la partie 4.5 sont relatives aux dangers établis à température ambiante, bien en deçà de la température d'application de certains revêtements qui peut atteindre 160 voire 200°C.

5 Procédés de mise en œuvre des produits bitumineux

5.1 Le secteur de la construction et de l'entretien des routes

5.1.1 Généralités sur la profession

Le secteur des travaux publics occupe en France environ 270 000 personnes et se divise en plusieurs sous-secteurs dont celui de l'industrie de la construction et de l'entretien des routes. Ce dernier emploie 96 178 salariés (USIRF 2012).

Les activités de rénovation, d'entretien et de modernisation des routes sont en constante augmentation au sein de cette profession. A l'inverse, les travaux neufs consistant à remplacer une ou plusieurs couches d'une route déjà existante ont tendance à reculer ces dernières années (Tableau 15).

Tableau 15 : Répartition de la nature des travaux entre 2008 et 2010 (USIRF 2012)

Année	Travaux neufs	Entretien
2008	58,6 %	41,4 %
2009	56 %	44 %
2010	54 %	46 %

Il existe plus de 200000 chantiers par an, toutes activités confondues qui sont assurés par un collège d'entreprises routières alimentées en matière première bitumineuse par plusieurs entreprises pétrolières réparties sur le territoire français. Le Tableau 16 présente ces principales entreprises.

Tableau 16 : Principales entreprises distributrices de bitume et de construction routière (d'après site internet USIRF)

Principales entreprises distributrices de bitume sur le territoire français	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ BP FRANCE ▪ Esso SAF ▪ NYNAS SA 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Repsol-YPF ▪ SOCIETE DES PETROLES SHELL ▪ TOTAL Raffinage Marketing
Principales entreprises de construction routière	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ EUROVIA (l'un des leaders mondiaux) ▪ COLAS (l'un des leaders mondiaux) ▪ EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS (Appia) ▪ SACER (rattaché à COLAS) ▪ SCREG (rattaché à COLAS) ▪ NGE 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ LEFOLL Travaux Publics ▪ BRAJA VESIGNE ▪ ENTREPRISE CHARIER ▪ ENTREPRISE MALET ▪ ENTREPRISE ROGER MARTIN

5.1.2 Structure des routes

Une route est une superposition de plusieurs couches : les couches d'assise, une couche de liaison et une couche de roulement rendues solidaires les unes aux autres par des couches d'accrochage (Figure 24). Chacune de ces couches, d'épaisseur variable, présente une fonction essentielle en vue d'assurer les qualités (stabilité, durabilité, confort...) du revêtement final.

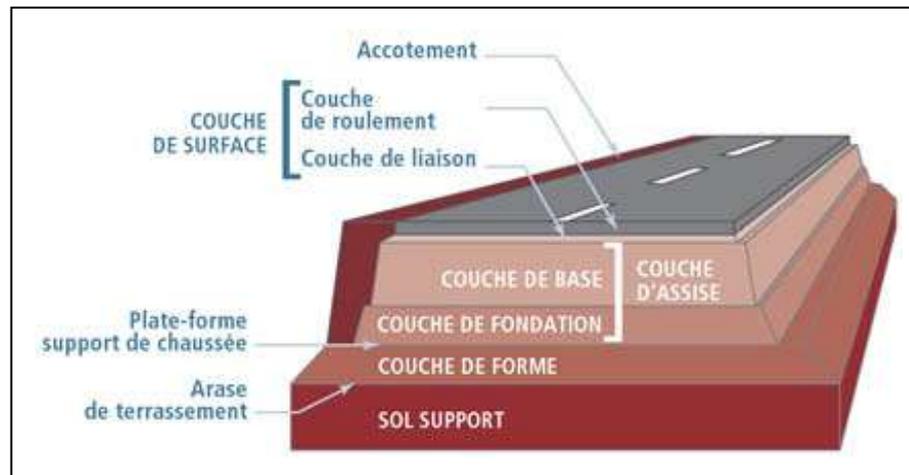


Figure 24 : Structure d'une chaussée (d'après audition USIRF, 2011)

5.1.3 Description des différentes couches composant la structure d'une route

5.1.3.1 Les couches d'assise

Les couches d'assise (base et fondation) assurent la résistance mécanique par rapport aux contraintes générées par le trafic et la protection thermique de la plate-forme. D'épaisseur conséquente (classiquement comprise entre 10 et 15 cm selon la technologie employée), elles remplissent un rôle structural essentiel (BP Bitumes France 28/07/2012).

La couche de base, autrefois réalisée avec des matériaux granulaires non liés, puis avec des matériaux traités avec des liants hydrauliques, fait de plus en plus appel aux liants bitumineux. Elle ne subit pas des efforts de compression mais de traction, source potentielle de fissures. C'est la raison pour laquelle l'utilisation de bitumes durs ou spéciaux et à forte adhésivité est souvent plus adaptée (GPB 2005).

5.1.3.2 La couche de liaison

La couche de liaison garantit les protections mécaniques, hydrauliques et thermiques des couches d'assise (BP Bitumes France 28/07/2012). Elle contribue également au bon uni de la chaussée et au renforcement de la structure de la route. La couche de liaison est souvent composée de bitumes de dureté 35/50 ou spéciaux (multigrades ou anti-ornières) et possède une épaisseur moyenne de 5 à 8 cm.

5.1.3.3 La couche de roulement

La couche de roulement représente la dernière partie de la structure de chaussée. De la réussite de sa réalisation dépendent de multiples facteurs :

- La sécurité : la couche de roulement doit posséder de bonnes propriétés antidérapantes et celles-ci sont liées à la texture superficielle.
- Le confort : les deux facteurs qui conditionnent principalement le confort des usagers sont les suspensions des véhicules et l'uni de la chaussée.

- Le rôle structurel : la couche de roulement joue un rôle structurel en protégeant les autres couches du corps de chaussée des infiltrations d'eau et en réduisant les efforts mécaniques de surface (BP Bitumes France 28/07/2012).

La couche de roulement ou « couche d'usure » est très souvent un enrobé bitumineux (surtout pour les routes principales et autoroutes). Aujourd'hui, ces couches sont de plus en plus minces (classiquement de 5 à 8 cm et beaucoup moins pour les bétons bitumineux minces et les bétons bitumineux très minces). Pour leur réalisation, les bitumes modifiés par polymères sont de plus en plus utilisés. Ils augmentent l'adhérence, le pouvoir drainant ainsi que la rugosité de la chaussée. Cependant, des qualités supplémentaires peuvent être recherchées comme par exemple un confort sonore ; des enrobés drainants à formulation spéciale pour réduire les projections d'eau peuvent aussi être utilisés. De plus en plus, un confort visuel est demandé, dans ce cas là des bitumes spéciaux seront utilisés (enrobés clairs ou pigmentables)(GPB 2005).

Pour des routes à faible et moyen trafic, telles que les voies départementales, la recherche de produits à faible coût conduit à utiliser à la place des enrobés, des enduits superficiels, réalisés à partir d'émulsion de bitume ou de liants anhydres.

5.1.3.4 La couche d'accrochage

Indispensable, la couche d'accrochage assure une bonne adhérence entre les diverses couches dont elle limite le processus de déformation et de fatigue au cours du temps. Elle est généralement à base d'émulsion cationique à rupture contrôlée et de bitumes de duretés diverses.

5.1.3.5 Les matériaux utilisés

Les matériaux bitumineux sont présents dans chaque couche. Plusieurs variantes de liants sont utilisées dans les applications routières : les bitumes purs, fluxés, modifiés (polymères ou fibres) qui sont appliqués sous forme anhydre ou en émulsion (Asphalt Institute 2007; NIOSH 2000).

Le choix des matériaux et de la méthode d'application résulte de la prise en compte de nombreux paramètres comme l'évolution du trafic. Pour un trafic lourd, les bitumes durs (classes 35/50 et en-dessous : 15/25 voire 10/20) sont de plus en plus utilisés pour les couches d'assises. Le recours aux bitumes modifiés (notamment par des polymères) n'est pas systématique dans le milieu routier. Il faut déterminer si les conditions environnementales, le trafic routier, la durée de vie prévue et les performances recherchées justifient leur utilisation (Asphalt Institute 2007; NIOSH 2000; WHO 2004).

Ces matériaux sont classiquement mis en œuvre suivant trois grandes techniques :

- Les enrobés bitumineux : pose et précompactage effectués généralement à chaud d'un mélange « bitume-granulat-sable-filler » suivi d'un compactage plus complet ;
- Les enduits superficiels : répandage de bitume fluxé ou d'émulsion de bitume suivi du répandage de gravillons concassés et d'un compactage ;
- L'asphaltage : après la pose d'un enduit d'imprégnation, application à chaud de minces couches d'un mélange « bitume-petits agrégats ».

Tous chantiers routiers confondus, la part actuelle des liants bitumineux destinés aux enrobés est estimée en tonnage à environ 80 %, celle des enduits superficiels à 20 % (d'après audition USIRF, 2011). L'asphaltage ne représente qu'une partie mineure, de l'ordre du pourcent.

5.1.4 Les enrobés

Un **enrobé** (ou enrobé bitumineux ou béton bitumineux) est un mélange de graviers, de granulats concassés et de sable à hauteur de 95 %, liés par environ 5 % de bitume (BP Bitumes France 28/07/2012). Les granulats vont des fines (filler) et des sables (par ex 2/4¹³) aux gros (par exemple 0/20 pour le grave bitume (GB) utilisé pour les couches d'assise) en passant par les gravillons (par exemple 4/14).

L'enrobé est utilisé pour la construction et l'entretien des infrastructures routières. Le bitume qu'il contient assure le lien entre les différents granulats et répond aux exigences attendues suivant le domaine d'application du revêtement : autoroutier, routier, de voirie urbaine, portuaire et aéroportuaire (pistes, aires de stationnement, ouvrages neufs, entretien, rénovation).

Cette technique est apparue dans les années 1930 et a été développée en France après la seconde guerre mondiale. La technique des enrobés bitumineux permet de répondre à des besoins très différenciés. Chaque type d'enrobés a des qualités bien précises, ce qui se traduit par un grand nombre de possibilités dans le choix du matériau à utiliser (BP Bitumes France 28/07/2012).

Les enrobés sont préparés en centrale et entreposés à chaud dans des silos avec une bonne isolation thermique pour augmenter la durée d'entreposage. Ensuite, le matériau est chargé dans des bennes de camions. La quantité requise est transportée par camion à chaud sur le lieu des travaux. Les bennes doivent être munies d'une bâche étanche recouvrant les enrobés pour réduire leur refroidissement et empêcher la formation d'une croûte froide en surface.

5.1.4.1 Les divers types d'enrobés

Il existe une très grande diversité d'enrobés. Ils se distinguent les uns des autres par la granulométrie (distribution statistique des tailles de grain), le type et la teneur du liant, le procédé de fabrication (chaud ou froid) et l'adjonction éventuelle de matériaux particuliers.

Le Tableau 17 ci-dessous récapitule les principaux enrobés utilisés.

¹³La taille des granulats est notée d/D, avec d la dimension des plus petits éléments et D celle des plus gros (en mm)

Tableau 17 : Principaux enrobés utilisés actuellement

Enrobés à chaud			
La dureté des liants est très variable de 10/20 à 80/100 en passant par le 35/50 qui est le plus utilisé actuellement en France.			
Types	Noms	Utilisations	Température d'application
Les bétons bitumineux (BB)	Les bétons bitumineux très minces (BBTM)	Enrobé très utilisé en France pour les couches de roulement	150 à 180°C
	Les bétons bitumineux minces (BBM)		
	Les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)		
	Les bétons bitumineux à module élevé (BBME)	Enrobé utilisé essentiellement pour les couches de roulement et de liaison	
Les graves bitumes (GB)	-	Enrobé à plus faible teneur en liant destiné aux couches d'assise	
Les enrobés à module élevé (EME)	-	A base de bitume de grades durs, enrobé surtout utilisé pour les couches d'assise	
Enrobés à température réduite ou à basse température			
Les enrobés tièdes	-	Peut être envisagé pour toutes les couches de chaussées, sur tous les types de réseau routier	110 à 130°C
Les enrobés semi-tièdes	-	Peut être envisagé pour toutes les couches de chaussées, sur tous les types de réseau routier	60 à 100°C
Les techniques à froid			
Les enrobés à froid	-	Enrobé utilisé pour l'entretien et la rénovation de la chaussée	Ambiante
Les enrobés coulés à froid (ECF)	-	Enrobé destiné au couche de roulement	
Les graves émulsions (GE)	-	Essentiellement utilisée pour le reprofilage et les réparations localisées ou pour couches d'assise	

Après le premier choc pétrolier, le bitume est devenu un produit précieux à économiser. Dans la course à la performance et à la durabilité, les produits et techniques d'application ont beaucoup évolué depuis les bétons bitumineux et les graves bitumes (GPB 2009).

- **Les enrobés à module élevé**

Dans le but de réduire l'épaisseur de la chaussée sans diminuer sa longévité, d'autres types d'enrobés ont vu leur utilisation s'accroître ces dernières décennies, c'est le cas des enrobés à module élevé (EME). Depuis les années 1990, les EME ont été développés pour répondre aux sollicitations les plus sévères. Leur utilisation a permis des gains économiques : 40 % de matériaux en moins. Ces enrobés à chaud utilisent principalement les bitumes durs (10/20 ou 15/25) et certains bitumes multigrades (GPB 2009).

L'enjeu majeur consiste donc à maintenir une souplesse suffisante pour éviter la fissuration, tout en ayant la rigidité nécessaire pour éviter l'orniérage. Le bon équilibre rigidité/souplesse est devenu de plus en plus difficile à obtenir avec des liants conventionnels et seuls des liants durs, spécialement étudiés ou des liants polymères de conception plus récente, peuvent permettre d'atteindre le difficile équilibre recherché aujourd'hui.

- **Les enrobés tièdes**

Encore expérimentale en 2006, la pratique des enrobés tièdes est désormais maîtrisée (GPB 2009). Développée pour des raisons environnementales, la technique consiste à fabriquer et appliquer à des températures modérées des produits de performances équivalentes à celles des enrobés chauds.

Ces enrobés, fabriqués entre 90 et 130 °C (Figure 25) sont dits « tièdes » ou « semi-tièdes » ; leur pose s'effectue respectivement de 110 à 130 °C et de 60 à 100 °C, donc à des températures bien inférieures à celles des enrobés chauds, appliqués de 150 à 180 °C.

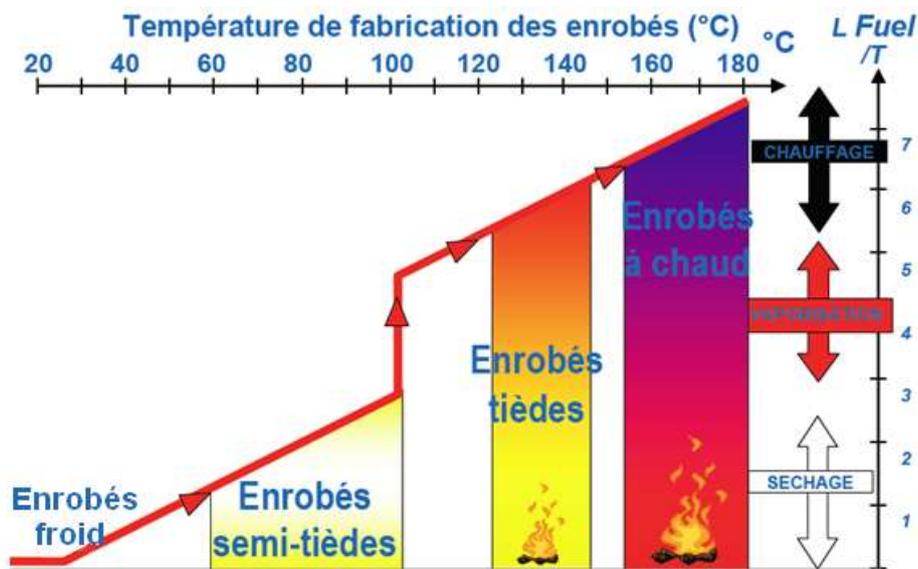


Figure 25 : Température de fabrication des enrobés tièdes et semi tièdes (d'après audition USIRF, 2011)

Il existe plusieurs procédés de fabrication, tous basés sur l'amélioration de la maniabilité du bitume à température plus basse afin d'obtenir un produit fini suffisamment fluide pour être

appliqué et compacté, sans difficulté. Parmi ces procédés, pratiqués par les industriels de la route on peut distinguer :

- L'ajout d'agents plastifiants : additifs organiques fluidifiants, type esters d'acides gras (naturels ou de synthèse), de poids moléculaire relativement élevé (C28 à C36), ou type cires de paraffines (hydrocarbure aliphatique saturé, généralement de synthèse type Fisher-Tropsch) (Edwards, Tasdermir *et al.* 2006) ;
- Le moussage : augmentation du volume du bitume et diminution de sa viscosité par un agent aérogène. En pratique, le moussage du bitume est obtenu par introduction d'eau avant les opérations de malaxage puis au cours du malaxage par la libération progressive de vapeur d'eau provenant de l'humidité des agrégats ou de l'ajout de « porteurs d'eau » type zéolithe ;
- L'enrobage séquencé ou double enrobage (double-coating, double-barrel) : collage des minéraux par un bitume dur, suivi du malaxage avec un bitume plus mou, dosé pour obtenir la maniabilité désirée, identique à celle d'un enrobé à chaud.

Ces techniques d'enrobés tièdes et semi-tièdes sont encore peu pratiquées : la quantité mise en œuvre ne représente que 2,75 % du total des enrobés en 2010 et 8,3% en 2012. Pourtant, elles permettent non seulement de réaliser d'importantes économies d'énergie (de l'ordre de 20 %), de diminuer la quantité de CO₂ émise (de 25 à 50 %), mais surtout de réduire l'exposition des salariés lors de l'application de ces enrobés (GPB 2009). Le tableau ci-dessous illustre la progression en tonnage des enrobés tièdes et semi-tièdes dont les chiffres officiels n'apparaissent qu'à partir de 2008.

Tableau 18 : Quantités d'enrobés tièdes et semi-tièdes mises en œuvre (d'après audition USIRF, 2011)

Année	Quantités mises en œuvre par la profession routière (Tonnes)
2008	520 000
2009	757 000
2010	1 000 000
2011	1 259 000
2012	2 633 000

• Les Produits à froid

Les produits à froid sont élaborés à partir d'un mélange de granulats et d'émulsions de bitume. On distingue 3 types de produits :

- Les enrobés coulés à froid (ECF), constitués d'un squelette granulaire semblable à celui des enrobés à chaud ;

L'enrobé est constitué de 5 à 8 % d'une émulsion de bitume pur ou modifié (avec ajout éventuel de fibres) et de granulats (généralement 0/6). La pose se fait en mono ou double couches de 0,6 à 1,5 cm d'épaisseur. C'est une technique qui connaît un développement certain depuis une quinzaine d'années (Tableau 19)(Sétra 2005). Bien que plus coûteuse, elle concurrence les enduits superficiels ;

Tableau 19 : Les enrobés coulés à froid (d'après audition USIRF, 2011)

Année	Surface (millions de m ²)
1990	7
1996	11
2001	27
2006	40

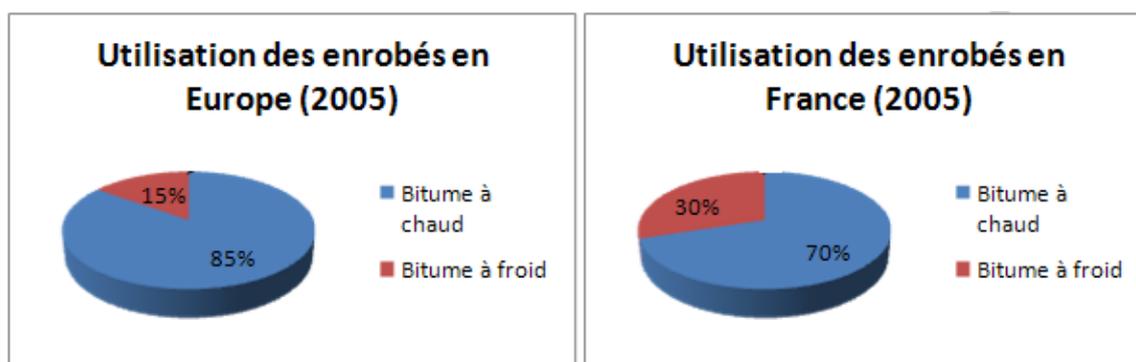
- Les graves émulsions (GE) sont des émulsions de bitume mou (70/100 par exemple) et de fines remélangées à du gros granulat (de 0/6 à 0/20), destinées à la réfection (reprofilage ou déflachage) de route ou la construction, plus particulièrement pour des couches de base. Ce matériau est idéal pour le rechargement des chaussées de trafic moyen, de support déformé, il s'oppose bien à la remontée des fissures ;
- Les enrobés à froid sont un mélange de granulats (0/4 – 0/6 éventuellement pré-enrobés) et d'émulsion de bitume destiné aux réfections manuelles (nids-de-poule...) ou comme couches de roulement provisoires (2 à 5 cm d'épaisseur) éventuellement destinées à être recouvertes d'enduit superficiel.

• Enrobés spéciaux

Pour certaines applications, d'autres qualités d'enrobés ont été développées (GPB 2009). C'est le cas des :

- **Enrobés drainants pour les autoroutes** : l'enrobé drainant possède 25 à 30 % de vide et laisse ainsi passer l'eau, évitant qu'elle ne s'accumule sur la chaussée par temps de pluie ;
- **Enrobé acoustique** : cet enrobé permet d'abaisser considérablement les nuisances sonores provoquées par la circulation routière en voie urbaine ;
- **Enrobés colorés** : fabriqués à partir de résine de pétrole clair, ces nouveaux bitumes de synthèse peuvent être colorés, soit en incorporant des pigments de couleur dans le liant, soit en utilisant directement des granulats de couleur.

Les tendances européenne et française concernant l'utilisation des techniques à chaud et à froid sont illustrées sur la Figure 26.

**Figure 26 : Utilisation des enrobés en France et en Europe (GPB 2005)**

5.1.4.2 Mise en œuvre des enrobés à chaud

Quelle que soit la destination (couches d'assise, de liaison ou de roulement), ou la qualité souhaitée (anti-orniérage, drainante, acoustique...), les techniques d'application sont similaires (voir Figure 27).

Avant la pose d'un nouvel enrobé, ou même s'il s'agit de simples réparations, la surface à traiter ne doit pas présenter de défauts majeurs : elle doit être propre, unie, exempte de fissures et de nids de poule. Des opérations de préparation doivent donc être effectuées.

Après la mise en place du matériel, le premier engin à entrer en action est la répandeuse. C'est un camion possédant une citerne chauffée, muni d'une rampe arrière équipée de vanes pour la diffusion de la couche d'accrochage. Les liants d'accrochage sont presque exclusivement des émulsions cationiques de bitume. Cette opération peut être effectuée directement par des finisseurs équipés d'une rampe intégrée permettant d'appliquer l'émulsion juste avant l'épandage des enrobés.

Les enrobés à chaud sont mis en œuvre à une température d'environ 150 °C et plus au moyen d'un finisseur, machine qui va homogénéiser, déposer et pré-compacter le bitume au sol à l'aide d'une table lisseuse vibrante (table flottante). Il est équipé de palpeurs (contact ou ultra-son) permettant dévaluer l'épaisseur des enrobés à déposer.

Les camions ravitailleurs d'enrobé bitumineux (ou camion d'enrobé) munis de bennes verseuses, approvisionnent le chantier depuis la centrale. Les enrobés bitumineux sont déversés à l'avant du finisseur sur sa trémie où ils sont convoyés à l'arrière pour être déposés et pré-compactés. Ces camions avancent poussés par le finisseur.

Le travail réalisé concomitamment concerne les joints longitudinaux et transversaux. C'est une phase essentielle de la mise en œuvre des enrobés. Les joints longitudinaux doivent être réalisés rapidement par des opérateurs équipés de râtaux. L'enrobé constituant le joint longitudinal doit être encore chaud pour pouvoir être étalé (minimum de 85 °C). L'ensemble est à compacter dès que possible.

Le traitement des joints transversaux nécessite une étape de chauffage de la bande froide qui se fait généralement au finisseur ou par des chauffe-joints indépendants.

La dernière étape est le compactage. C'est l'étape ayant le plus d'impact sur la durabilité et l'uni de la chaussée. Il existe différents types de compacteurs. Leur choix va dépendre des caractéristiques des couches et de la cadence de la production. Généralement, sont utilisés des compacteurs à pneus suivis de compacteurs vibrants à cylindres (à billes) dont l'intensité et la fréquence de vibration sont variables. Il existe aussi des rouleaux mixtes (pneus/cylindres). Dans les conditions normales de mise en œuvre, le compactage débute généralement à une température du revêtement entre 120 °C et 150 °C. Cette température varie selon la viscosité du bitume.



Figure 27 : Mise en œuvre d'un enrobé à chaud (d'après audition USIRF, 2011)

5.1.4.3 Mise en œuvre des produits à froid

Elle est différente de celle des enrobés chauds ou tièdes

- Cas des ECF (enrobés coulés à froid)

Les enrobés coulés à froid (ECF) sont fabriqués et mis en œuvre simultanément à l'aide d'une machine mobile automotrice spécifique : le « traineau ». Il permet de stocker les constituants (granulats, eau, émulsion, additifs...), de les doser, de les malaxer et de mettre en place le matériau final. Il permet ainsi l'ajustement de la formule de l'enrobé au fil du chantier afin d'obtenir le temps de rupture adapté aux exigences de remise en circulation (Observatoire des Techniques de Chaussées 1997) (voir Figure 28).

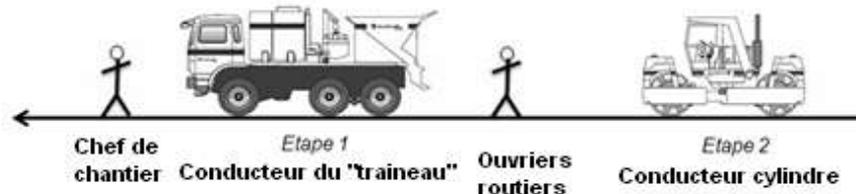


Figure 28 : Mise en œuvre des enrobés coulés à froid (d'après audition USIRF, 2011)

- Cas des enrobés à froid

La réalisation des couches de surface en enrobés à froid se fait à la niveleuse ou au finisseur. Pour les petites réparations, il est recommandé d'assurer le compactage à l'aide de petits cylindres vibrants afin d'augmenter la durée de vie de la réparation.

- Cas des graves-émulsions

La mise en œuvre des graves-émulsions ne nécessite pas nécessairement une couche d'accrochage. La mise en œuvre est assurée soit à la niveleuse, soit à l'aide du finisseur (ISTED 1989). L'atelier de compactage généralement composé de cylindres vibrants et de compacteurs à pneus doit permettre un compactage plus énergique que pour les enrobés à chaud.

5.1.4.4 L'organisation du travail

La distance de transport des enrobés entre l'usine d'enrobage et le lieu des travaux doit être de 30 à 80 km maximum. Généralement, moins de 10 personnes sont attachées au chantier. Si dans les années 1980, il y avait de 30 à 50 % de main d'œuvre en plus, actuellement, la tendance va vers la constitution de plus petites équipes (d'après audition USIRF, 2011).

L'équipe de travailleurs se décline de la manière suivante :

- Les chauffeurs de camion (hot mix truck driver) qui amènent le bitume sur le lieu des travaux : ils peuvent être en contact avec les fumées de bitumes sporadiquement pendant le processus de chargement du bitume dans le camion ou lors du déchargement sur le site des travaux ;
- Le chauffeur de la répandeuse (tanker lorry driver) qui gère la pose de la couche d'accrochage ;
- 1 (à 3) conducteur de compacteur (roller driver).
- Le chef d'équipe (foreman). Il se situe généralement près de la table du finisseur et dirige les opérations sur le chantier ;
- 1 (ou 2) conducteur du finisseur (paver operator). Présent sur le finisseur, il gère la bonne position et la vitesse d'avancement de la machine ainsi que l'alimentation en enrobé chaud ;

- 1 (ou 2) « régleur » ou « homme de table » (screed man). L'opérateur est situé sur ou à proximité du finisseur, près de la table lisseuse dont il règle la hauteur et la largeur pour contrôler la distribution et la qualité des enrobés (épaisseur, homogénéité...);
- 2 (ou 3) « suiveurs », « ratisseurs », « tireur râteau » (laborers, rakerman). Ce sont les ouvriers munis de râteau/pelle. Ils enlèvent l'excès d'enrobés, complètent les vides et préparent les joints longitudinaux et transversaux pour la compaction. Bien que très mobiles, ils évoluent généralement à proximité du finisseur.

5.1.4.5 Données chiffrées

Le Tableau 20 ci-dessous fournit des chiffres clés concernant le secteur des enrobages routiers.

Tableau 20 : Production industrielle française des enrobés (USIRF 2012)

	2008	2009	2010	2011
Production d'enrobé (Million de tonnes)	41.8	40.1	38.8	39.2
Bitume routier (Million de tonnes)	3.36	3.21	3.10	3.06*
Production liants bitumineux (Million de tonnes)	1.28	1.15	1.12	1.23*
Usine d'émulsion (en unités)	109	108	109	109

(*) Estimation USIRF

5.1.5 Les enduits superficiels d'usure (ESU)

La pose d'enduits superficiels est une technique d'entretien qui a pour but de créer une couche de roulement assurant l'étanchéité de la surface de la chaussée tout en régénérant la rugosité superficielle (ASCO-TP 27/07/2012). Cette technique n'a pas d'objectif structurel et se caractérise par une couche de faible épaisseur.

C'est la pratique la plus utilisée en entretien de surface. Elle a connu son apogée dans les années 1970-1980. Aujourd'hui, elle subit un recul au profit des bétons bitumineux très minces (BBTM) et surtout des enrobés coulés à froid. Mais elle reste une technique d'entretien de référence pour le réseau à faible trafic ou trafic moyen (Sétra 2005) ainsi que dans le cas de réfection de chaussées dégradées (voir 5.1.6.3) sur des routes de type départemental où la recherche de solutions à faibles coûts est systématique.

En 2007, sur les routes nationales, les enduits superficiels représentaient encore 25 % des surfaces entretenues chaque année. Par contre, ils avaient pratiquement disparu du secteur autoroutier (ASCO-TP 27/07/2012).

5.1.5.1 Techniques employées

La pose d'enduits superficiels s'effectue soit sur une couche de roulement déjà existante, soit sur une couche de base; il s'agit de l'application de bitume fluxé chaud ou d'émulsion de bitume suivi du répandage de gravillons concassés et d'un compactage.

L'épaisseur de l'enduit varie de 0,5 à 2 cm. Lorsqu'il est déposé sous forme d'émulsion de bitume pur ou modifié, il est utilisé préférentiellement en bicouche (au printemps et en automne lorsque la température extérieure est supérieure à 5 °C) pour une température de pose de 50 à 75 °C. Le bitume utilisé est très souvent un bitume mou du type 160/220 et parfois 70/100 (BP Bitumes France 28/07/2012). L'emploi de bitume modifié par un ou

plusieurs polymères se développe de plus en plus pour diminuer la susceptibilité aux conditions climatiques. Les polymères cités dans la littérature sont les latex, SBS et EVA.

Les enduits réalisés avec un liant anhydre sont des enduits à chaud. Pour obtenir la fluidité du liant désirée, ces liants anhydres peuvent être fluidifiés ou fluxés voire composés (comme les bitumes-goudrons dans les années 80). Les bitumes modifiés par ajout de polymères avec ou sans dopes d'adhésivité sont utilisés selon le type de trafic, préférentiellement en monocouche (par temps sec et chaud lorsque la température extérieure est supérieure à 10 °C) et sont mis en œuvre à une température de 120 à 160 °C.

Les gravillons, propres et secs possèdent une granularité variable suivant les techniques (2 à > 14mm). Par exemple 6/10 pour une monocouche simple gravillonnage ou encore 6/10 suivi de 2/4 pour une bicouche à structure discontinue ou encore 6/10 et 4/6 pour une structure continue.

La figure ci-dessous illustre ces divers types de structures :

Structure 1

Monocouche (de liant) simple gravillonnage, très souvent 6/10 ou 4/6. C'est la structure la plus utilisée



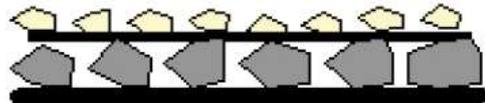
Structure 2



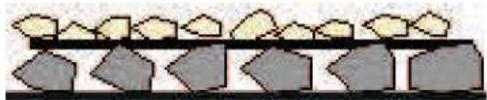
Monocouche double gravillonnage (liant + granulats + granulats)

Structure 3

Bicouche (liant + granulats + liant + granulats). Cet ESU est utilisé pour des trafics plus élevés ou un support hétérogène



Structure 4



Monocouche prégravillonné appelé également enduit « sandwich » (granulats + liant + granulats). Il s'adapte très bien aux supports très hétérogènes

Figure 29 : Les divers types de structures d'enduit superficiel

5.1.5.2 Mise en œuvre

La mise en œuvre des enduits superficiels à chaud apparaît souvent plus rudimentaire que celle des enrobés, mais elle est effectuée par des équipes qui doivent maîtriser un savoir-faire précis. La répandeuse (bouille) est la première machine à intervenir (après la balayeuse). Il s'agit d'un camion possédant une citerne chauffée, muni d'une rampe arrière équipée de vannes pour la diffusion du liant bitumineux (plus éventuellement des diffuseurs à dopes).

Ensuite, une gravillonneuse c'est-à-dire un camion possédant une benne verseuse de granulats, roulant en marche arrière quelques mètres derrière la répandeuse dépose les gravillons.

Le compactage termine les opérations. Des compacteurs à pneus sont utilisés pour ne pas briser le granulat. Quelques jours après les travaux, le granulat non fixé est récupéré grâce à des balayeuses aspirateurs.

Le répandage et le gravillonnage peuvent s'effectuer en une seule et même étape à l'aide d'une machine, la RGS (répandeuse gravillonneuse synchrone). Pour les travaux plus modestes, un PAT Automatique est utilisé.

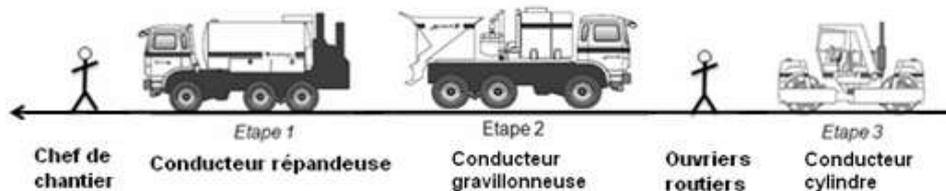


Figure 30 : Mise en œuvre d'un enduit superficiel (d'après audition USIRF, 2011)

5.1.5.3 L'organisation du travail

La composition de l'équipe est la suivante :

- Le chef d'équipe qui dirige les opérations sur le chantier. Il évolue généralement entre les machines, le long de la route ;
- Le conducteur de la répandeuse (tanker lorry driver) qui gère la position et la vitesse d'avancement (environ 40m/min) de la répandeuse. Depuis les années 1980, suite à l'automatisation progressive des répandeuses, il s'occupe aussi du réglage de la rampe et du débit des vannes via le poste de conduite¹⁴ ;
- Le conducteur de la gravillonneuse (aggregate truck driver) qui harmonise sa position et sa vitesse sur celles de la répandeuse ;
- Le gravillonneur (aggregate operator) qui optimise le dosage des granulats, par le réglage de l'inclinaison de la benne ;
- Le suiveur ou retoucheur (shoveller) : affecté à la réfection des défauts (raccords, bordures) ;
- L'opérateur lance (hand-sprayer operator) qui applique l'enduit à l'aide d'une lance manuelle aux endroits difficilement accessibles pour la répandeuse. Il intervient également lors d'opérations de Point à Temps ; Le conducteur du compacteur (roller driver) qui adapte la pression et le nombre de passes au type de chantier.

5.1.6 Les autres travaux (petit entretien, réfection, etc.)

La plupart de ces opérations se pratiquent avec les mêmes produits et techniques d'application que pour des travaux neufs. Par contre, compte tenu des surfaces d'interventions moindres, elles sont effectuées manuellement ou à l'aide de matériel plus léger.

¹⁴Le réglage du débit des vannes était auparavant effectué par le vannier ou rampiste (spray bar operator) depuis la plate-forme arrière de la répandeuse. De par sa position, à l'aplomb des buses de diffusion, le vannier occupait le poste de travail de loin le plus exposé aux projections et émissions de liant (voir en Annexe 8 « le vannier »).

5.1.6.1 Réfection de joints longitudinaux

La mise en œuvre s'effectue par déversement de pleines pelletées de matériau. Le réglage de l'épaisseur s'effectue à l'aide d'un râteau, en une seule passe. Les enrobés mis en place manuellement ont une densité inférieure à ceux mis en place avec un finisseur.

Ce travail manuel doit être effectué rapidement afin d'éviter le refroidissement des enrobés. Les pilons servant à densifier les enrobés aux endroits inaccessibles au rouleau compacteur doivent peser au moins 10 kg.

5.1.6.2 Bouchage de nids de poule

Les nids de poule sont l'état ultime des dégradations d'une chaussée et nécessitent des interventions d'urgence. Celles-ci consistent très souvent en un remplissage du trou avec les matériaux localement disponibles. Pour parfaitement réparer ce type de dégradations, deux opérations sont nécessaires :

- La préparation de la surface à réparer par la découpe des bords avec enlèvement des matériaux non liés et pollués ;
- Le compactage manuel, éventuellement pneumatique en insistant bien sur le pourtour.

Une grande diversité de matériaux et de techniques peut être utilisée pour réparer les nids de poules : enrobés à froid, graves-émulsions, enrobés à chaud.

5.1.6.3 Réfections diverses

Ces réfections nécessitent souvent l'utilisation de petites et moyennes machines comme lors :

- Du traitement de dégradations de surface avec pose d'enduits superficiels par Point à Temps manuel (pulvérisation de l'enduit à la lance, pelletage et ratissage des gravillons) ou automatique (PATA) ;
- De travaux de déflachage, voire de reprofilage avec pose d'enrobés (grave émulsions par ex.) à l'aide d'un finisseur d'intervention rapide (FIR).

Suivant l'importance du chantier, le compactage s'effectue à la dame, au compacteur manuel ou au rouleau compresseur.

5.1.6.4 Pontage de fissures

Pour préparer la surface à corriger, la fissure est asséchée par soufflage d'air chaud à l'aide d'une lance thermo pneumatique (400°C). Après la pose d'une couche de liant d'accrochage, le produit de bouchage est injecté dans les fissures. Le travail de réparation nécessite l'emploi de produits et matériels spéciaux. Le bouchage manuel à chaud (170°C) de la fissure peut se réaliser par un bitume modifié élastomère (le plus souvent chauffé dans un fondoir à l'endroit même de la réparation) à l'aide d'un patin (sabot) applicateur. Une finition par microgravillonnage (<3mm) peut être nécessaire.

5.1.7 L'asphalte coulé

L'essentiel des informations détaillées dans cette partie ont été recueillies auprès de l'Office des asphaltes.

L'asphalte coulé est utilisé pour les structures réservées aux piétons (trottoirs, aires de jeux, cours d'école, quais de gare ou métro, sols industriels ou commerciaux...), ainsi qu'aux véhicules (voies express, couloirs de bus), et en étanchéité d'ouvrages d'art.

Ce matériau a l'avantage de se mettre en œuvre très facilement. En effet, lorsqu'il est chaud, il coule et se répand sur son support. Une fois refroidi, le matériau est utilisable, sans besoin d'être compacté. C'est un revêtement souple, parfaitement étanche et très compact.

5.1.7.1 Historique

L'asphalte naturel est un produit minier tiré d'une roche sédimentaire généralement calcaire contenant du bitume naturel dans la proportion de 8 à 10 % (quelquefois même davantage) (GPB 2005). Jusqu'aux années 1980, l'asphaltage se pratiquait à partir de poudre d'asphalte naturel enrichi avec du bitume de distillation. Par la suite, l'asphalte naturel a progressivement disparu des formulations. La dernière mine française ayant été fermée en 2005/2006, tous les asphaltes coulés actuels sont fabriqués à partir de bitume de raffinerie, identique aux bitumes routiers.

De nos jours, l'asphalte coulé est produit à 1 million de tonnes par an en Europe et à 220 000 tonnes par an en France : tonnage faible (environ 1 %) par rapport aux autres produits routiers. Il est fabriqué et mis en œuvre par une vingtaine d'entreprises, soit 2000 ouvriers travaillant sur les chantiers. Sur ces 2000 ouvriers ; il y a environ 500 applicateurs (asphalteurs), 1000 porteurs de seaux et conducteurs d'engins et 500 autres ouvriers dans les usines de fabrication.

5.1.7.2 Composition

L'asphalte coulé est un pré-mélange de bitume (35/50, éventuellement additivé afin de réduire la température de fabrication) et de filler (fines calcaires ou siliceuses, < 100µm) appelé « mastic », auquel sont ajoutés du sable et des gravillons.

Il existe 3 grandes familles d'asphalte coulé, de compositions et d'utilisations différentes (voir Tableau 21 ci-dessous) :

Tableau 21 : Les trois grandes familles d'asphalte coulé

Familles	Eléments	Pourcentage	Utilisations
Les asphaltes purs	Bitume	20 %	Matériau le plus fluide à la base des étanchéités de toitures-terrasses et étanchéité des ouvrages d'art
	Fines calcaire	55 %	
	Sable 0/2	25 %	
Les asphaltes sablés	Bitume	12 %	utilisés pour les deuxièmes couches d'étanchéité des toitures-terrasses
	Fines calcaire	32 %	
	Sable 0/2 ou 0/4	56 %	
Les asphaltes gravillonnés	Bitume	8 %	Revêtements circulables, c'est-à-dire soit les voiries urbaines, les chaussées ou encore les parkings...
	Fines calcaire	25 %	
	Sable 0/4	27 %	
	Gravillon 2/6	40 %	

Note : contrairement aux liants utilisés pour les enrobés ou les enduits superficiels, le goudron de houille n'a jamais été utilisé dans les asphaltes coulés.

5.1.7.3 Les techniques utilisées

La technique la plus classique est la pose en bicouche. La première couche, de faible épaisseur (moins d'un cm) était encore récemment (années 2000) un « mastic » constitué d'asphalte naturel (remplacé aujourd'hui par du bitume pétrolier) et de bitume pur et plus de 40 % de fines calcaire. Cette première couche peut être remplacée par une membrane bitumineuse armée. Entre la couche d'accrochage et la couche d'asphalte est posée une couche d'indépendance (kraft, voilé de verre).

La seconde couche (asphalte gravillonné) est un peu plus épaisse (plus de 2cm) ; elle contient moins de fines (25 %), du sable (40 %) et des petits gravillons (25 % de 2/6) le tout lié par 10 % de bitume. Après étalement, elle est talochée manuellement. Les applications anciennement effectuées entre 210°C et 250°C sont en principe maintenant à moins de 200°C.

Plus récente, la pose en monocouche est particulièrement adaptée aux zones piétonnières ou cyclables. Cette technique est très utilisée dans la construction ou la rénovation des trottoirs. Un papier kraft est en premier lieu positionné entre l'asphalte et la couche structurale, afin d'éviter le cloquage de l'asphalte lié à l'évaporation de l'eau du support. Une couche d'asphalte coulé de quelques centimètres contenant du bitume (8 %), des fines calcaires (27 %), du sable et gravillons (65 %) est étalée manuellement au sol aux alentours de 185°C. Des gravillons sont ensuite jetés sur le mélange refroidissant pour éviter qu'il ne soit glissant pour les usagers.

5.1.7.4 Mise en œuvre

Depuis le 1^{er} décembre 2010, la majorité des asphaltes, quels que soient leurs usages, sont coulés au dessous de 200°C : ce sont les asphaltes basse température (BT) obtenus par ajout au liant de cires (type Fisher-Tropsch, cf enrobés tièdes). Certaines entreprises ont développé des produits très basse température (TBT) : ajout d'une combinaison de 2 cires différentes permettant une application entre 160°C et 180°C.

Il existe 3 types de chantiers définis selon le tonnage d'asphalte utilisé (Tableau 22) :

Tableau 22 : Types de chantiers

Noms	Tonnage	Proportion
Chantier dit « classique »	18 T/j	Environ 60-75 %
Chantier d'ouvrage d'art ou de parking	30 à 40T/j	Environ 10 %
Chantier de voirie urbaine ou chantier d'étanchéité « compliqué »	< 10T/j	Environ 15-30 %

Pour ces trois types de chantier, l'approvisionnement de l'asphalte entre le porteur et le chantier se fait :

- Soit manuellement via des seaux ou des brouettes à asphalte (capacité d'environ 100 kg) ;

- Soit de manière mécanisée par dumpers (ou staccos) qui sont de petits malaxeurs automoteurs dotés de systèmes de malaxage et d'une chauffe régulée (capacité de 0,5 à 1 tonne).

Actuellement, seulement 5 % des chantiers sont mécanisés. Ils concernent en général les parkings, les ouvrages d'art ou des lieux où les surfaces de travaux sans obstacles sont importantes.

Chaque type de chantier possède ses spécificités.

Le chantier classique :

Le matériel arrive sur le chantier dans un camion malaxeur (porteur). Deux à 3 porteurs de seaux (aides asphaltateurs) ravitaillent l'applicateur (asphalteur) qui est en général le chef d'équipe.

Le chantier d'ouvrage d'art ou de parking :

L'utilisation du train est systématique pour fournir les 30 à 40 tonnes d'asphalte nécessaire aux travaux. Par rapport aux chantiers « classiques », le nombre de porteurs de seaux et d'applicateurs est doublé. Si le chantier le permet, l'asphalte sera appliqué à l'aide d'un finisseur spécifique muni d'une règle chauffée motorisée qui dépose, étale et lisse l'asphalte.

Les petits chantiers :

Ce sont les reprises de trottoirs, des réfections effectuées en ville. Ce sont des chantiers de moins de 10 tonnes, classiquement 4 à 5 tonnes. Il y a 2 porteurs de seaux et 1 applicateur.

Pour chacun des chantiers décrits ci-dessus, tous les outils (raclette, seau...) sont nettoyés à l'aide de racleurs en bois : lorsque l'asphalte est chaud, il s'enlève parfaitement. Sinon, il est réchauffé au chalumeau. Le nettoyage au fuel n'est pas autorisé.

5.1.7.5 L'organisation du travail

Les opérateurs se répartissent ainsi :

- Les porteurs de seaux ; ils apportent l'asphalte du camion porteur jusqu'à la surface d'application ;
- L'applicateur qui est le plus souvent le chef d'équipe ; accroupi (ou agenouillé) au sol, il étale l'asphalte chaud à l'aide d'une palette en bois ;
- Et dans le cas de chantiers mécanisés, le régleur placé à l'arrière du finisseur ou à proximité, assure la bonne épaisseur et l'homogénéité de l'asphalte ;
- Le chauffeur du porteur d'asphalte : il assure le transport de l'asphalte, de la centrale au chantier. Il remplit aussi les éventuels dumpers ;
- Les conducteurs d'engins (finisseur à asphalte, dumper) qui gèrent la position et la vitesse d'avancement de la machine.

5.1.8 Exemples de formulations (d'après audition USIRF, 2011)

Composition des enrobés	Bitume	Granulat	tensioactif	Acide	Additif	Granularité	Pénétrabilité	Epaisseur	Température d'application
Enrobés à chaud									
Grave bitume	4 %	96 %	-	-	-	De 0/14 à 0/20	De 20/30 à 35/50	De 10 à 14 cm	150 à 170 °C
EME	4 %	96 %	-	-	-	De 0/10 à 0/20	De 10/20 à 20/30	De 6 à 15 cm	160 à 180 °C
BBSG	4,5 %	95,5 %	-	-	-	De 0/10 à 0/14	De 20/30 à 50/70	De 5 à 9 cm	140 à 160 °C
BBM	5,5 %	94,5 %	-	-	-	De 0/10 à 0/14	De 35/50 à 50/70	De 3 à 5 cm	140 à 160 °C
BBTM	5,3 %	94,5 %	-	-	0,2 % (SBS)	De 0/6 à 0/10	-	De 2 à 3 cm	140 à 160 °C
Techniques à froid									
ECF	6,7 %	93,08 %	0,06 % (dérivés aminés)	0,06 %	0,1 % (SBR)	De 0/4 à 0/10	-	De 0,8 à 1,5 cm	Ambiante
Enrobés à froid	7 %	92,8 %	0,1 % (dérivés aminés)	0,1 %	-	De 0/6 à 0/10	-	De 3,0 à 4,0 cm	Ambiante
Graves Emulsion	4,2 %	95,75 %	0,03 % (dérivés aminés)	0,02 %	-	De 0/6 à 0/20	-	De 1 à 12 cm	Ambiante

Composition des ESU	Bitume	Granulat	tensioactif	Acide	Additif	Fluxant	Granularité	Epaisseur	Température d'application
ESU (bicouche)	3,5 %	95,74 %	0,01 % (dérivés aminés)	0,01 %	0,04 % (SBR)	0,7 %	De 2/4 à 10/14	De 0,5 à 1 cm	70 °C

Composition de l'asphalte	bitume	fines calcaires	Sable et gravillon	température d'application
Asphaltes gravillonnés	8 %	27 %	65 %	185 °C

5.1.9 Centrales de production

5.1.9.1 Les centrales d'enrobage à chaud

Depuis les années 1930, les enrobés à chaud sont fabriqués de deux façons : en discontinu dans des centrales appelées « centrales d'enrobage traditionnelles » ou en continu dans les centrales dites « Tambour Sécheur Enrobeurs » (TSE). Les procédés continus TSE sont eux-mêmes divisés en deux types principaux : le TSE équi-courant et le TSE contre-courant (USIRF 2003).

En 2011, il y avait 506 centrales d'enrobage à chaud en service en France, dont 437 fixes et 69 mobiles, réparties à peu près à parité entre le type continu et le type discontinu. Elles produisent environ 40 millions de tonnes d'enrobés (USIRF 2012).

En mode discontinu, les opérations de séchage de granulats et de malaxage avec le liant se font séparément permettant ainsi une meilleure réactivité face aux demandes variées des clients. Par contre, en mode continu, le séchage des granulats et le malaxage avec le liant se font simultanément dans le TSE et sont donc plus adaptés aux gros tonnages avec des formulations d'enrobés variant le moins possible.

Les centrales de type discontinu

La fabrication de l'enrobé s'effectue de la manière suivante :

Les granulats, stockés à température ambiante sont transportés dans des trémies, dosés puis entrent dans la partie haute d'un tambour où ils sont ensuite séchés à l'aide d'un courant de gaz chaud généré par un brûleur. Le flux gazeux entre dans le tambour côté flamme vers 1300°C et sort côté entrée des granulats à environ 120°C. Les matériaux sortent à une température de 140 à 170°C (humidité < 0,5 %).

Les granulats chauds et secs sont montés au sommet de la tour de malaxage puis criblés. Ils sont ensuite stockés à chaud par classe granulaire. Après passage dans une trémie peseuse ils sont mélangés dans un malaxeur avec les fillers (les fines) eux même pesés dans une trémie indépendante : c'est la phase de malaxage à sec. Cependant, les granulats peuvent être stockés à chaud dans la trémie sans passer par le crible. En France, les malaxeurs ont des capacités allant de 1500 à 4000 kg, pour des centrales produisant de 120 à 320 tonnes/h.

Le bitume est entreposé sur le site en fonction de ses caractéristiques (dureté, modifié ou non...) dans des réservoirs chauffés entre 150°C et 180°C. Il est pesé et introduit dans la cuve de malaxage contenant le mélange granulats, fines et fillers. C'est la phase de malaxage humide (Sebben Paranhos 2007; USIRF 2003).

Les étapes du procédé sont illustrées ci-dessous (Figure 31) :

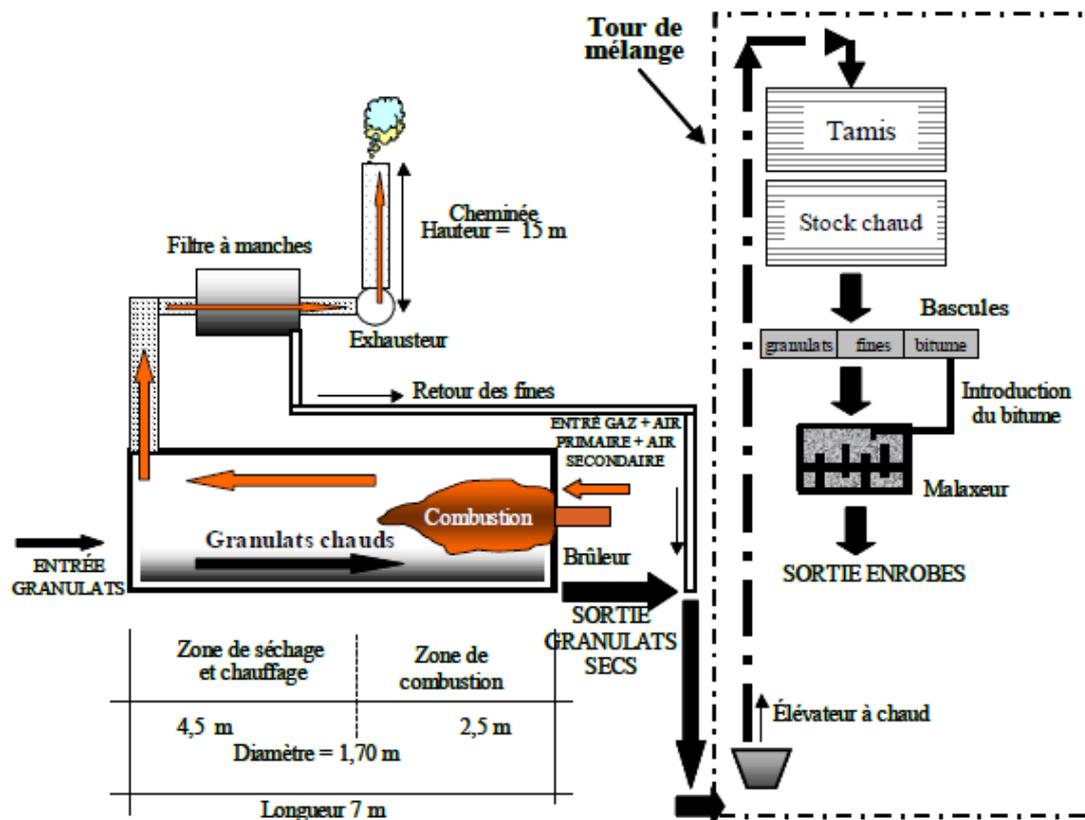


Figure 31 : Exemple de centrale d'enrobage discontinue (classique) (Sebben Paranhos 2007)

Les centrales de type continu

Le séchage et le chauffage des matériaux ainsi que l'enrobage avec le bitume et le filler s'opèrent dans un même tambour. Le dosage des constituants, bitume, filler, additifs, etc. s'effectue de manière continue avec une assistance informatique importante. Le procédé ne nécessite ni crible à chaud, ni stockage de granulats chauds. Généralement ces centrales sont équipées pour le recyclage d'anciens enrobés (USIRF 2003). La fabrication s'effectue de la manière suivante :

- Les granulats sont stockés suivant la classe granulaire utilisée sur le site de fabrication et chargés dans des trémies. Ils sont collectés et pesés sur un convoyeur peseur qui mesure exactement le débit qui est intégré automatiquement au calcul des débits de bitume et de filler ;
- Les granulats sont ensuite introduits dans la partie haute du TSE. Dans leur trajet, sous l'effet de l'inclinaison du tube (4 à 6°) et de sa rotation, les granulats sont chauffés et séchés avant de se trouver mélangés avec le bitume et le filler ;
- Après un enrobage dans le tambour (environ 150s), les enrobés sont récupérés à une température comprise entre 140 et 160°C pour une utilisation immédiate ou pour stockage (USIRF 2003).

- Le TSE équicourant (Figure 32)

Le TSE équicourant est apparu au cours des années 1970 (Sebben Paranhos 2007). Lors du séchage, les granulats circulent dans le même sens que le flux gazeux. Concernant le recyclage, la technique utilisée est celle de l'introduction des agrégats d'enrobés à la médiane du tambour sécheur au moyen d'un anneau de recyclage. Le taux maximal de recyclage va de 20 à 30 % et dépend de l'humidité et de la température du produit final (USIRF 2003).

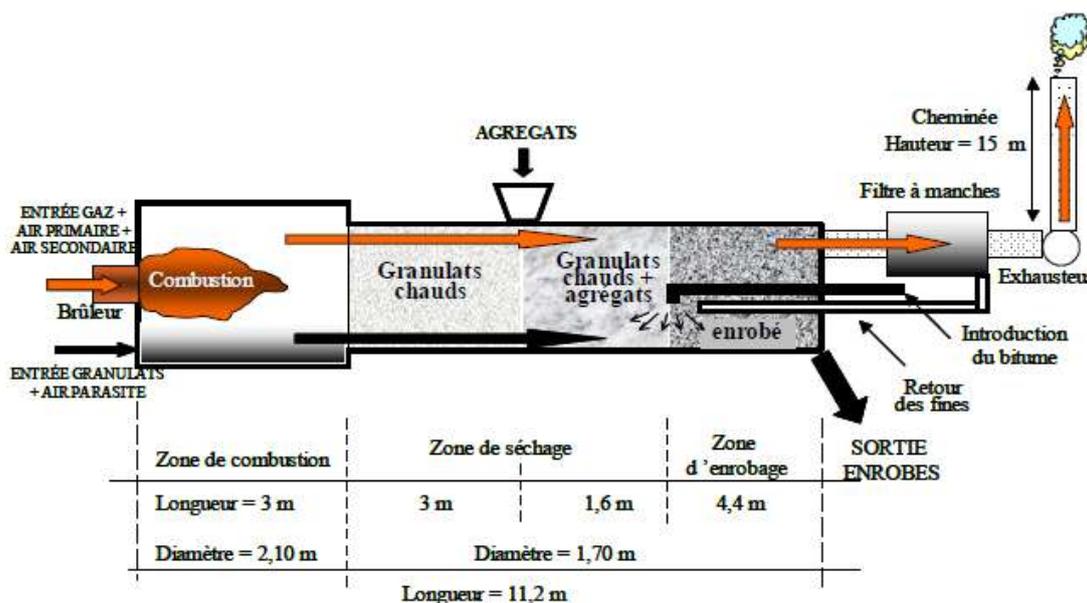


Figure 32 : Exemple de centrale de type TSE équicourant (Sebben Paranhos 2007)

- Le TSE à contre courant (Figure 33)

Le TSE contre-courant s'est développé au cours des années 1990, l'objectif étant d'augmenter le taux de recyclés dans une formulation et d'éviter le contact direct des gaz de combustion avec l'enrobé bitumineux produit. La température finale des fumées, à la sortie du tambour sécheur, est plus basse que dans un TSE équicourant. Par contre, le taux de recyclés potentiellement utilisables peut atteindre 50 % (Sebben Paranhos 2007) et les températures d'enrobage peuvent être plus élevées (jusque 200°C) (Sétra 2006a).

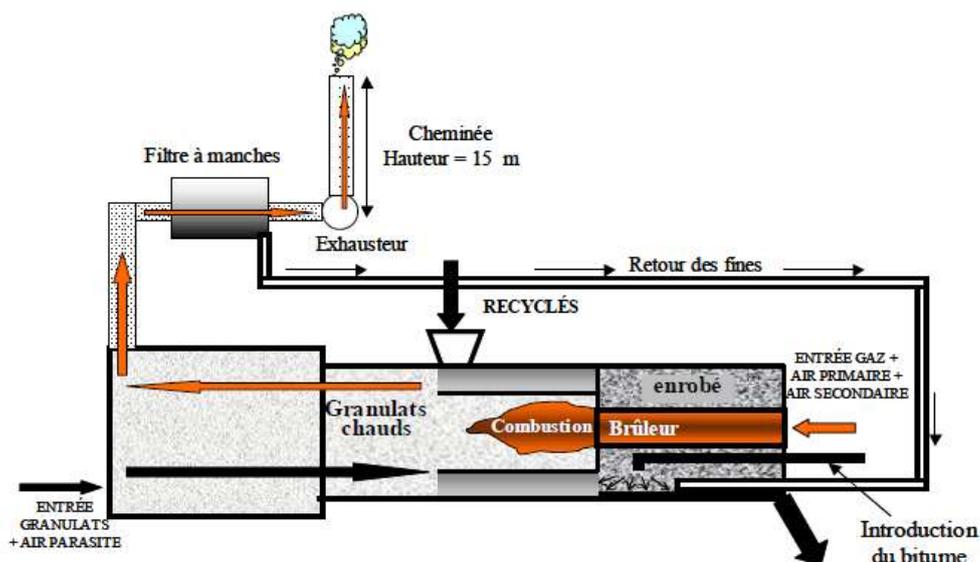


Figure 33 : Centrale d'enrobage de type TSE contre-courant (Sebben Paranhos 2007)

Progression technique des centrales d'enrobage à chaud

Au cours, des dernières décennies en France, les centrales d'enrobage ont connu quelques évolutions majeures :

- Informatisation systématique de la fabrication et développement des systèmes d'acquisition de données sur les centrales continues ;
- Dès 1976 : 90 % des centrales étaient équipées de dépoussiérage par filtres à manche et depuis 1990, pratiquement 100 % ;
- Les TSE apparus milieu des années 1970 équipent la quasi-totalité des centrales d'enrobages en mode continu ;
- Début des années 1980 : développement des systèmes à anneau de recyclage dont près de la moitié des centrales est équipée en 2003 (USIRF 2003) ;
- De 1984 à 1988 : les TSE français sont allongés afin d'éloigner la zone d'enrobage de la zone de combustion et supprimer les risques de dégradation des liants hydrocarbonés par surchauffe (émission de fumées bleues) (Sétra 2006a).

Les métiers

L'équipe d'agents travaillant dans les centrales (fixes ou mobiles) de fabrication d'enrobés à chaud en assure le fonctionnement ainsi que l'entretien courant (CISME 2012).

L'équipe est composée ainsi :

- Le mécanicien. Il entretient la centrale et effectue tous les types de réparations (soudage, électricité, peinture) ;
- Le manœuvre. Il nettoie notamment la centrale et en particulier les agrégats tombés sous les tapis extracteurs ou convoyeurs. Il incorpore aussi, si nécessaire, des additifs solides pour enrobés spéciaux en jetant directement les sacs thermo fusibles dans le sas du malaxeur ou en les déposant sur une bande transporteuse.
- Le conducteur de chargeuse. Il approvisionne en agrégats les trémies de pré-dosage à partir des aires de stockage ;

- Le conducteur de centrale. Depuis la cabine de commande, il surveille le fonctionnement de toute la centrale (chargement des matières premières, surveillance des procédés de fabrication, contrôle de l'acheminement des enrobés vers les postes de livraison ou de stockage...);
- Le chef de poste qui contrôle et coordonne l'ensemble des activités du personnel et des visiteurs. Il planifie également les travaux de maintenance et procède aux mises à jour de sécurité.

5.1.9.2 Les centrales d'enrobage à froid

Les centrales d'enrobage à froid permettent de fabriquer les graves-émulsion ainsi que les enrobés à froid.

Ces produits peuvent être élaborés dans des centrales fixes ou mobiles, le plus souvent continues pour les graves-émulsions.

Les centrales de fabrication sont de conception simple, peu encombrantes et donc très mobiles.

- Les granulats ne sont pas séchés. De l'eau est ajoutée pour faciliter la dispersion de l'émulsion ;
- Le dosage des granulats est effectué par des doseurs classiques ;
- La formule de fabrication est contrôlée par un système automatique qui pilote l'unité de dosage de l'émulsion et du filler éventuel ;
- Les granulats sont introduits dans un malaxeur à arbre parallèle où ils sont mélangés et malaxés avec l'émulsion ;
- Le malaxeur est équipé d'une trémie anti-ségrégation pour le chargement du camion(USIRF 2003).

5.1.9.3 Les centrales d'asphalte

La fabrication consiste à homogénéiser un mélange constitué de granulats, de fines, de liants (éventuellement de poudre d'asphalte) et d'adjuvants divers. Il existe 2 modes de fabrication de l'asphalte différents par les temps de malaxage :

- Fabrication classique en pétrin : le malaxage s'effectue plusieurs heures en pétrin lent à température régulée (160-200°C) ; la vitesse de rotation du malaxeur, à arbre unique, est de 5 à 12 tours/minute. La durée totale de fabrication varie de 4 à 8h suivant qu'il y ait séchage ou non des agrégats ;
- Fabrication en malaxeur rapide : un pré-mélange est effectué une ou 2 minutes dans un malaxeur à deux arbres à rotation inverse entre 30 et 60 tours/minute. Un retour en pétrin lent est cependant nécessaire (au moins 2h) pour une parfaite homogénéisation.

Le transport vers le site d'application est ensuite effectué par des porteurs équipés pour maintenir la température et l'homogénéité du mélange (d'après les informations recueillies auprès de l'Office des asphaltes).

5.2 L'étanchéité des toitures-terrasses

L'ensemble des informations détaillées dans cette partie proviennent de la Chambre Syndicale Française de l'Etanchéité.

5.2.1 La profession

Les applications industrielles reposant principalement sur l'exploitation des propriétés d'étanchéité et d'isolation des bitumes, absorbent un peu moins de 10 % de la consommation globale des bitumes.

Le secteur des travaux d'étanchéification (code NAF : 43.99A) comprend les activités de construction spécialisées qui concernent :

- Les travaux d'imperméabilisation et d'étanchéité : toitures-terrasses, ouvrages enterrés, façades, piscines ;
- les travaux de déshumidification des bâtiments, traitement contre l'humidité.

L'étanchéité impliquant l'utilisation de bitume en France se traduit par environ 300 000 tonnes de liant répartis presque à égalité entre les travaux neufs et les travaux de réfection.

Les feuilles bitumineuses sont produites en France par Axter, Siplast, Meple et Soprema ou vendues en France par la société belge DERBIGUM France.

Au début, les travaux étaient réalisés uniquement pour permettre l'étanchéité des infrastructures. Les toitures-terrasses sont devenues progressivement thermiquement isolées. Suite aux nouvelles demandes formulées ces dernières années, elles peuvent être désormais végétalisées (forte croissance depuis les années 2000). Elles doivent permettre de retenir temporairement les eaux de pluies, ou encore de soutenir des équipements (centrales de réfrigération, panneaux solaires thermiques, panneaux photovoltaïques...). C'est la raison pour laquelle les produits ont fortement évolué pour pouvoir répondre à ces demandes qui nécessitent des revêtements toujours plus performants.

5.2.2 Le complexe d'étanchéité

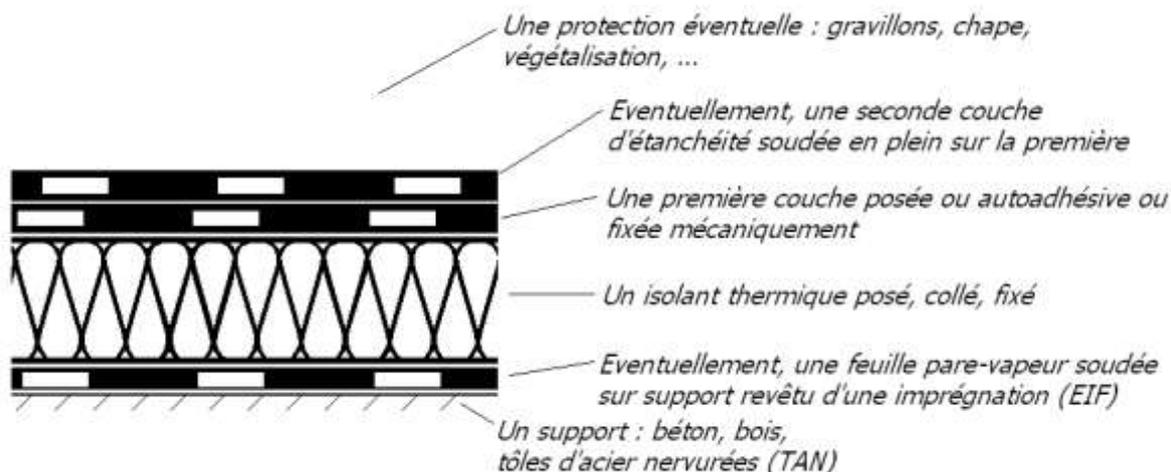


Figure 34 : Le complexe d'étanchéité

La Figure 34 illustre les différentes couches successives permettant de réaliser l'étanchéité d'une infrastructure. Le support sur lequel va reposer tout le complexe est généralement du béton. Bien qu'un peu moins répandu aujourd'hui mais en progression, ces supports peuvent être également des tôles d'acier nervuré ou encore du bois.

Juste au dessus de ce support revêtu d'enduit d'imprégnation à froid (EIF), il est possible de trouver une feuille pare-vapeur. Lorsque le support est en béton ou en bois, la mise en place de cette feuille est systématique. S'il s'agit de tôle d'acier nervuré non perforée, c'est celle-ci qui va jouer le rôle de pare-vapeur.

La couche suivante est composée d'un isolant thermique classique : panneaux de polyuréthane, laine de roche, etc.

Pour finir, une première couche de produits bitumineux est posée. Elle peut être flottante (non fixée au support), auto-adhésive ou fixée mécaniquement. Eventuellement, une deuxième couche sera soudée sur la première ; elle peut être recouverte en usine de petits granulats, ou recevoir une protection complémentaire ultérieurement.

5.2.3 Historique des produits et techniques utilisés

5.2.3.1 Années 1960

En 1960, il y avait 4 grandes types de revêtements. Il s'agissait dans tous les cas d'un système complexe multicouche (Tableau 23).

Les ciments volcaniques étaient des mélanges de brai de houille, de soufre, de résine et d'huiles anthracéniques. Les feutres goudronnés étaient collés avec du goudron fondu dans des fonderies spéciaux.

Pour l'enduit pâteux, 2 types de feutres coexistaient : l'un à base de bitume et l'autre à base de goudron de houille. Certains de ces enduits pouvaient même contenir de l'amiante. Les feutres bitumés étaient déroulés à froid et collés avec l'enduit pâteux.

Les feutres bitumés étaient constitués de carton feutre imprégné de bitume de pénétration ou surfacé de bitume oxydé (BO) en couche fine (S).

Les deux autres techniques sont très proches ; dans la plus évoluée, deux couches de feutre bituminé sont remplacées par un bitume armé constitué d'une armature surfacée par une couche épaisse de BO, et collé par un enduit d'application à chaud (EAC) composé de BO.

Avant 1970, toutes les feuilles non goudronnées étaient à base de BO. Elles pouvaient éventuellement être fillérisées et recevoir une autoprotection minérale.

Tableau 23 : Composition des revêtements en 1960

Revêtements	Ciment volcanique	Enduit pâteux	feutre bitumé	bitume armé
Détail des couches successives	<ul style="list-style-type: none"> • Feutre goudronné 27I • Ciment volcanique 	<ul style="list-style-type: none"> • Imprégnation • Enduit pâteux • Feutre bitumé 36S ou goudronné 36I • Enduit pâteux • Feutre bitumé 36Sou goudronné 36I • Enduit d'application à froid 	<ul style="list-style-type: none"> • Imprégnation • EAC • Feutre bitumé surfacé 27S • EAC • Feutre 27S • EAC • Feutre 27S • EAC 	<ul style="list-style-type: none"> • Imprégnation • EAC • BA 30 armature toile • EAC • Feutre bitumé 27S • EAC

5.2.3.2 Années 1970

Les années 1970 marquent la disparition du goudron (1976) ainsi que des cartons-feutres et de l'amiante.

C'est à cette période que commencent à se développer les bitumes polymères (PmB). Ce sont des mélanges de bitume pur plutôt mou (180/220), de polymères généralement de type SBS et de filler minéral (CaCO₃ ou poudre d'ardoise) qui sont appliqués sur les 2 faces d'armatures en voile de verre ou polyester.

5.2.3.3 Depuis les années 1980

Au cours des années 1980 à 2000, on assiste à la disparition progressive des bitumes oxydés au profit des PmB. Durant cette même période, le collage des feuilles (ainsi que des pare-vapeur) qui se faisait essentiellement au bitume chaud (EAC) est remplacé par le soudage au chalumeau.

A partir de 2000 apparaissent et se développent les feuilles auto adhésives (15 % en 2010). Le Tableau 24 ci-dessous illustre cette évolution des produits et techniques d'application.

Tableau 24 : Evolution des produits et des techniques d'application

	Principales techniques		
1980	50 % BO collé à l'EAC	50 % PmB collé à l'EAC	
1985	75 % PmB collé à l'EAC	25 % PmB soudé	
1990	40 % PmB collé à l'EAC	60 % PmB soudé	
2000	10 % PmB collé à l'EAC	85 % PmB soudé	5 % autoadhésif
2010	85 % PmB soudé	15 % autoadhésifs	

5.2.4 Les additifs

Il n'y a aucun additif ajouté sur le chantier. Tous sont incorporés au cours de la fabrication des produits.

L'additif le plus utilisé est un anti-racinaire placé dans les revêtements sous végétalisation ou pour les toitures jardins. 5 % des feuilles sont concernées.

Des résines terpéniques et des huiles (celles-ci peuvent être de nature végétale (colza par exemple) ou minérales (paraffiniques sans fraction aromatique) sont ajoutées dans les auto-adhésifs.

Enfin, certaines feuilles doivent posséder un bon comportement au feu, c'est pourquoi des additifs ignifuges tels que le borate de zinc (ou de calcium) hydraté, certains oxydes d'antimoine halogénés y sont incorporés.

5.2.5 Les produits liquides

Les produits liquides sont utilisés pour le primaire d'imprégnation. Après évaporation du primaire, il y a une imprégnation des pores du béton et de sa surface qui permet de souder la feuille bitumineuse ou d'appliquer la feuille auto-adhésive. A défaut de primaire, l'adhérence n'est pas assurée.

Ces primaires, à base de bitume (de 50 à 85 %), sont sous forme d'émulsion ou solvantés. Les solvants de dilution actuellement utilisés sont le xylène, le white spirit, l'éthanol ou le naphta. Le toluène a été éliminé il y a plus de 10 ans.

L'utilisation de colle sous forme d'émulsion ou solvantée pour fixer les feuilles bitumineuses reste marginale.

5.2.6 Le mode de collage

Le Tableau 25 ci-dessous récapitule les principaux types de collage pratiqués.

Tableau 25 : Les principaux types de collage

Désignation	Température application
Collage au bitume oxydé fondu	220 ± 30 °C (1,2 kg/m ² /couche)
Soudure au chalumeau à propane	150 à 180 °C pour la température des faces des produits au contact de la flamme 80 °C au cœur de la feuille et sur la face non chauffée
Autoadhésif	A froid

5.2.6.1 Le collage au bitume oxydé fondu (EAC)

Généralement le bitume arrive sur le chantier à l'état solide, sous forme de pains. Là, il est chauffé et fluidifié dans un fondoir situé généralement à la surface du sol. Lors des opérations, les températures du bitume varient de 190 °C à 250 °C. Les principales expositions aux fumées ont lieu lors de l'ouverture du fondoir, du remplissage et du transport manuel des récipients et du répandage du bitume.

Cette technique est en voie de disparition. Le CIRC ayant classé 2A les travaux d'étanchéité de toiture effectués avec du bitume oxydé, les fabricants français de matériaux d'étanchéité se sont engagés à ne plus mettre des pains de bitume oxydé à disposition des étancheurs à dater du 1^{er} mars 2012.

5.2.6.2 La soudure au chalumeau à propane

C'est la technique la plus pratiquée actuellement. La flamme du chalumeau est utilisée pour chauffer le support et le côté inférieur de la membrane déroulée.

La température maximale mesurée en surface du rouleau est de 80 °C et ce même si le rouleau est épais. Les émissions de fumée sont donc relativement limitées.

5.2.6.3 Les autoadhésifs

Les autoadhésifs sont des produits de plus en plus utilisés. Les membranes, à base de bitumes modifiés polymère utilisées, contiennent une résine ajoutée au bitume pour pouvoir adhérer au support sans chauffage. Un simple papier antiadhésif sur le dos de la membrane protège l'adhésif avant l'application. Seuls les joints seront soudés à chaud.

5.2.7 Quels produits pour quelles applications ?

Le Tableau 26 ci-dessous associe à chaque produit susceptible d'être utilisé, le type de liants ainsi que son mode d'application.

Tableau 26 : Tableau bilan des principaux produits et techniques

Produits	Liants		Application	
	Anciens	Actuels	Ancienne	Actuelle
Membranes	Bitume oxydé + filler minéral, Bitume pur + bitume oxydé + polymère + filler minéral, Bitume pur + polymère + filler minéral	Bitume pur+ polymère, + filler minéral Bitume pur + bitume oxydé + polymère + filler minéral, Bitume pur + polymère + filler minéral	Collage au bitume oxydé fondu	Soudure au chalumeau à propane, Autoadhésif, Collé à froid
Primaires d'imprégnation en solvant	Bitume oxydé, Bitume pur	Bitume oxydé, Bitume pur	Répandu à froid	Répandu à froid
Primaires d'imprégnation en émulsion	Bitume pur	Bitume pur	Répandu à froid	Répandu à froid

5.2.8 Le Métier d'étancheur

C'est un métier très varié comprenant plusieurs tâches.

- Lors de son arrivée, l'étancheur installe le chantier notamment par la mise en place des protections collectives ;
- Il est responsable de l'approvisionnement des matériaux ;
- Il pose l'isolant thermique ;
- Il prépare le support à la pose de l'étanchéité bitumineuse ;
- Il dépose les différentes couches bitumineuses et les soude au chalumeau ;
- Il effectue les travaux de finition, *etc.*

6 Recyclage

Le recyclage se développe en raison de contraintes principalement économiques et environnementales. La nécessité du recyclage s'est tout d'abord fait ressentir à la fin des années 1970 consécutivement aux deux chocs pétroliers. A cette époque, de nombreux chantiers de recyclage à chaud en centrale et en place sont apparus.

A l'heure actuelle, les contraintes environnementales pour une économie des ressources non renouvelables et l'obligation de recycler (loi du 13 juillet 1992), imposent la valorisation du gisement des matériaux existants dans les chaussées et entraînent par conséquent, un développement du recyclage de ces matériaux. Le recyclage dans les matériaux bitumineux peut se faire à la seule condition que le produit mis en œuvre respecte les mêmes performances que les enrobés bitumineux à base de granulats neufs.

Le recyclage peut s'effectuer à chaud ou à froid, en place ou en centrale, donnant aux maîtres d'ouvrage un large choix technique pour répondre aux différents types de dégradations des chaussées. La quantité d'enrobés recyclables chaque année en France est supérieure à 5 millions de tonnes à comparer aux 40 millions de tonnes d'enrobés produits par les centrales d'enrobage. Près de 40 % sont valorisés sans traitement et seulement 10 % sont intégrés dans la fabrication d'enrobés neufs.

D'un point de vue sémantique, le retraitement est toujours pratiqué en place et à froid. Le recyclage peut être pratiqué en place ou en centrale à chaud. Le retraitement à froid en centrale reste anecdotique. A noter que le terme « recyclage » sera utilisé sans distinction dans la suite du rapport -comme il est par ailleurs usuellement utilisé- afin de caractériser les différentes techniques. Ces dernières impliquent la même démarche notamment l'identification du matériau devant être réutilisé et la définition du ou des domaines d'emploi à partir de résultats expérimentaux. Les études seront d'autant plus conséquentes que la valorisation envisagée sera importante en termes de qualité du produit à obtenir et du taux de réutilisation (USIRF 2003).

Les taux de recyclage peuvent atteindre 60 % en centrale et aller jusqu'à 100 % en place. Le recyclage à froid représente 94 % et le recyclage à chaud en centrale 6 %. Le recyclage à chaud en place a été abandonné en 1996.

Le recyclage s'effectue beaucoup sur des chaussées nationales, départementales ou alors sur les autoroutes. En général, pour les routes à petit trafic, l'existant est recouvert d'un matériau neuf.

Les techniques à froid concernent les matériaux d'assises et les matériaux des couches de surface. Les techniques à chaud concernent les matériaux bitumineux de couches de surface ou de couches de base (Sétra 2004).

Le recyclage est une pratique en plein essor en France (Tableau 27).

Tableau 27 : Evolution des quantités d'agrégats recyclés entre 2007 et 2010 (USIRF, 2011)

Année	Matériaux récupérés (Mt)	Agrégats recyclés (Mt)
2007	7,13	1,7
2008	7,05	2,1
2009	7,07	2,3
2010	7,08	2,8

L'EAPA (European asphalt pavement association) a estimé pour l'année 2001 le nombre de sites de production d'enrobés ainsi que le nombre de sites permettant de réaliser des recyclages à chaud (EAPA 2005). Pour la France étaient recensées 404 centrales d'enrobage fixes et 100 centrales mobiles, parmi lesquelles 5 permettant le recyclage à chaud (environ 1 % du nombre total de centrales). Ce chiffre situe la France dans l'intervalle inférieur de la moyenne européenne (estimée à 32 %) loin derrière l'Allemagne (700 centrales permettant le recyclage à chaud ; ce qui représente 94 % des centrales d'enrobage disponibles dans le pays), l'Italie (150 ; 23 %), les Pays-Bas (51 ; 91 %), etc.

L'EAPA propose des statistiques pour l'année 2006 sur le recyclage au niveau européen (Tableau 28) (EAPA 2008).

Tableau 28 : Statistiques pour l'année 2006 sur le recyclage au niveau européen (EAPA 2008)

pays	Matériaux recyclés disponibles (en tonnes)	% actuellement utilisés en recyclage à chaud	% actuellement utilisés en recyclage à froid	% de la production d'enrobés à chaud contenant des matériaux recyclés
Autriche	600 000	10	10	5
Belgique	1 300 000	50		36
République tchèque	604 400	30	50	10
Danemark	240 000	>80		53
France	6 500 000	13	<2	<10
Allemagne	14 000 000	82	18	60
Grande-Bretagne	5 000 000			15
Hongrie		15	0	0,6
Irlande	48 000	38	0	2,1
Italie	14 000 000	18	2	
Luxembourg	200 000	90	10	60
Pays-Bas	3 000 000	80	20	65
Norvège	590 000	7	26	8
Pologne	1 000 000	4	55	0,2
Slovaquie	1 250			
Slovénie	22 000	50	10	15
Espagne	690 000	30	15	5
Suède	650 000	50	50	40
Suisse	945 000	50	50	

6.1 Recyclage en place à froid

Il s'agit d'une technique d'entretien et de réhabilitation des structures routières réalisée entièrement *in situ* à partir du gisement de matériaux que constitue l'ancienne chaussée. La méthode consiste, après avoir fragmenté l'ancienne chaussée et apporté éventuellement des granulats correcteurs et de l'eau, à traiter les matériaux à froid par un liant dans une machine mobile travaillant à l'avancement. Il est ainsi possible de reconstituer une nouvelle couche d'assise ou de liaison de qualité. Deux types de recyclage se distinguent :

- Le recyclage d'enrobés minces ou épais. Ceux-ci sont récupérés (par fraisage du matériau en place) ; du liant, sous forme d'émulsion, est ajouté et l'ensemble est malaxé avant d'être répandu et compacté ;
- Le recyclage de chaussée, essentiellement constituée de matériaux non traités et dont la couverture bitumineuse est faible. La chaussée est fragmentée, la granulométrie du matériau est éventuellement corrigée par répandage préalable d'un matériau correcteur, puis le liant est ajouté, l'ensemble est malaxé et mis en œuvre.

Le recyclage à froid peut être effectué soit à l'émulsion de bitume, soit avec un liant hydraulique, soit avec un liant composé (mélange d'émulsion de bitume ou de mousse de bitume et de liant hydraulique).

Les grandes étapes du recyclage à froid en place sont les suivantes :

- Fragmentation ;
- Eventuelle correction granulaire ;
- Reprofilage transversal, et parfois longitudinal ;
- Ajout de liant hydrocarboné sous forme d'émulsion de bitume ;
- Malaxage *in situ* ;
- Réglage ;
- Compactage.

La technique trouve ses limites dans la dimension maximale des matériaux du gisement. Le diamètre du granulat doit être inférieur à 80 mm pour les graves non traitées, excluant ainsi les chaussées en béton de ciment ou les chaussées pavées (Sétra 2004).

Dans certains pays, le recyclage à froid est également utilisé en remplacement du recyclage à chaud lorsque l'enrobé en place est à base de goudron susceptible de dégager des fumées en cas de chauffe (USIRF 2003).

Le recyclage en place à froid à l'émulsion de bitume a été réalisé en France pour la première fois en 1982. Il connaît son essor à partir de 1985.

6.2 Recyclage à chaud en centrale

Le recyclage en centrale d'enrobage à chaud concerne principalement les mélanges granulaires liés avec du bitume. Ils sont issus du démontage d'anciennes chaussées en place, démontage général ou partiel ou de fabrications d'enrobés mises au rebut. Cela concerne aussi bien les couches de roulement, liaison, base et fondation. Ces matériaux sont définis sous le terme d'agrégats d'enrobés dans la norme NF P 98-149. La norme européenne NF EN 13108-8 traite de la caractérisation des agrégats d'enrobés pour recyclage à chaud en centrale. Les matériaux bitumineux à recycler sont classés en trois grandes catégories en fonction de leur origine et de leur stockage :

- Les mélanges de provenance unique ;
- Les mélanges de provenances diverses stockés de façon individualisés ;

- Les mélanges de provenances diverses.

La technique consiste à malaxer en centrale des enrobés de récupération (appelés agrégats d'enrobés) avec des apports variables de granulats et de liant. Elle se définit par plusieurs étapes :

- Récupérer des matériaux bitumineux, en général par fraisage en place de couches de surfaces homogènes dégradées, ou plus rarement par concassage de plaques d'enrobés provenant de démolitions de chaussées, ainsi que de fabrications d'enrobés mises au rebut, et des excédents de mise en œuvre ;
- Transporter des matériaux sur une aire de fabrication ;
- Mélanger dans une centrale spécialement conçue ces matériaux recyclés avec une proportion de 35 à 90 % de granulats neufs ;
- Malaxer et enrober à chaud le squelette minéral ainsi obtenu avec une proportion de bitume possédant des propriétés régénérantes ou non vis-à-vis du bitume vieilli ;
- Transporter sur chantier et mettre en œuvre de manière classique ces matériaux enrobés, aptes à constituer une couche de surface ou d'assise.

Il est possible de distinguer généralement, deux types de recyclage, à savoir celui à faible taux (10 à 25 %) et celui à fort taux (30 à 65 %). Les agrégats après fraisage ou concassage/criblage doivent être en conformité avec la norme agrégats d'enrobés (norme NF EN 13108-8).

En France, le recyclage a connu un véritable essor durant la première moitié des années 1980. Depuis, si le recyclage à faible taux en centrales discontinues reste courant et s'est même généralisé dans les postes situés à proximité des grandes agglomérations, le recyclage à fort taux reste marginal et limité à quelques chantiers par an (USIRF 2003).

6.3 Recyclage en centrale à froid

Cette technique est peu utilisée et ne reste employée que lorsqu'un stock d'agrégats d'enrobés (obtenus par fraisage, ou par tri, collecte et concassage/criblage) suffisant est disponible pour être traité en centrale. L'étude de formulation est adaptée à l'usage envisagé. Il existe des mélangeurs mobiles qui produisent des enrobés à froid à partir de stocks existants ou en traitant sur place les matériaux fraisés sur la chaussée (USIRF 2003). La technique repose sur des matériaux issus de la démolition et/ou de la déconstruction des chaussées, avec adjonction ou non de liants hydrauliques, pouzzolaniques ou bitumineux, ou de matériaux correcteurs. L'adjonction de liants bitumineux type émulsion ou mousse de bitume peut être également envisagée (Sétra 2004).

6.4 Recyclage en place à chaud

Les procédés de recyclage en place à chaud consistent à réchauffer à l'avancement la couche de surface et à la décohesion par scarification du revêtement puis malaxage avec ou sans ajouts (granulats pré-laqués ou non, liants, additifs, etc) (Sétra 2004). Il existe trois alternatives impliquant le thermoprofilage, la thermorégénération et le thermorecyclage.

D'après l'USIRF, cette technique a été abandonnée en 1996 en France en raison de son coût énergétique.

6.5 Etudes préalables

La mise en place de ces différentes techniques repose sur des études préalables et des phases de contrôle durant le déroulement des opérations. En amont, il est en effet nécessaire d'avoir une connaissance approfondie du gisement de matériaux existants.

Celles de la chaussée déterminent la faisabilité technique et économique de la solution de recyclage ou de retraitement. L'objectif est d'évaluer les caractéristiques des matériaux à traiter afin de proposer un type de retraitement ou de recyclage et un dimensionnement, adaptés au cas de chantier. Ces études préalables se caractérisent par de nombreuses étapes divergentes selon le type de recyclage, le type de voieries, *etc* et se définissent notamment par un diagnostic d'état de la chaussée existante (dont une recherche de l'historique), une évaluation du gisement d'enrobés, une étude de traitement, une épreuve de formulation (USIRF 2003).

6.6 Emission de polluants

Lors des interventions menées sur la chaussée avec traitement des matériaux en place, il existe différentes sources d'émission de substances présentes dans les revêtements routiers, notamment l'amiante susceptible de libérer des fibres, mais aussi les goudrons, les fluxants, les polymères, les bitumes, les additifs, les bitumes soufrés susceptibles d'émettre des CAP ou des COV. Sont notamment concernés les travaux de rabotage qui peuvent conduire à une exposition des travailleurs à des niveaux d'empoussièrement non négligeables ainsi que les activités de recyclage.

Deux sources de contaminants peuvent être identifiées, tout d'abord, les substances intrinsèquement présentes dans les matériaux bitumineux puis les substances accumulées par transfert lors de l'usure de la route et provenant par exemple du parc automobile, des équipements routiers, *etc*.

Le projet SAMARIS, développé dans le chapitre 6.8, évoque notamment les métaux, la silice ou les composés organiques adsorbés sur les particules, libérés lors des opérations de recyclage ou de rabotage, notamment en cas de traitement à chaud.

6.6.1 Les HAP issus du goudron ou des fluxants houillers

La présence de goudron ou de ses dérivés dans le revêtement en place est établie sur la base d'un historique et de plusieurs tests d'identification (les fluxants de houille ont été utilisés jusqu'au milieu des années 2000 pour leurs caractéristiques d'adhésivité et de fluidisation des bitumes).

Le risque de contamination par les anciennes couches à base de goudron, dont la teneur en HAP est de plusieurs ordres de magnitude plus élevés que celle dans le bitume neuf, est réel (Raulf-Heimsoth, Angerer *et al.* 2008). Les entreprises de recyclage ne possèdent généralement pas les laboratoires nécessaires pour évaluer correctement les teneurs des produits à retraiter. Plusieurs méthodes de détection ont été recensées, et trois d'entre elles ont été expérimentées : le PAK Marker (développé en 1996 par Rasenberg en coopération avec un producteur de peinture en spray), l'appareil TSE (qui mesure plutôt la fraction volatile ou les COV) et la tache au toluène.

Le principe du PAK Marker consiste en une base de peinture blanche contenant un solvant déterminé pulvérisé en brume sur l'échantillon d'enrobé. Ce solvant dissout les HAP et au séchage, par réaction, fait virer la couleur de la peinture au jaune. Si la couleur de la peinture change, l'enrobé est pollué aux HAP, sinon il y a de fortes chances pour qu'il ne le soit pas. La lecture du résultat est quasi immédiate mais donne une information uniquement qualitative (INERIS 2001).

L'appareil TSE chauffe par de l'air chaud à 530 °C les déchets routiers, dont s'échappent les vapeurs de composés organiques volatils. Celles-ci sont captées à l'aide d'une pompe à vide fixée sur l'appareil et traversent un tube réactif au xylène. La coloration doit être interprétée comme une confirmation de la présence de xylène (hydrocarbure aromatique monocyclique). Il ne faut en aucun cas estimer la quantité de HAP totaux en fonction de l'importance de cette coloration sur la longueur du tube. La méthode reste uniquement qualitative (INERIS 2001).

La méthode par la tache au toluène consiste à laisser tomber quelques gouttes de toluène sur le bord d'un morceau de matériaux bitumineux (granulats ou débris centimétrique) prélevés sur un échantillon homogène, et placé sur un papier filtre. Le toluène dissout le liant qui s'écoule avec lui sur le papier filtre et forme une tache en auréole autour du morceau. La lecture du résultat est quasi immédiate mais donne une information uniquement qualitative : s'il s'agit d'un liant bitumineux, la tache est uniformément brune alors que si le liant est à base de goudron, la tache comporte une auréole orangée (INERIS 2001).

Les critères de sélection retenus pour le choix de ces méthodes sont la facilité et la simplicité d'usage sur un site (chantier ou décharge), la rapidité (délai court pour orienter les déchets à partir d'un chantier de démolition), et la fiabilité de lecture des résultats. Généralement, ces méthodes permettent d'atteindre un seuil de quantification (sic) de l'ordre de 100 mg/kg (Brazillet, Domas *et al.* 2001). Ces techniques ne sont pas très fiables et l'évaluation de risque dû à l'exposition des HAP dans les bitumes recyclés reste problématique à l'heure actuelle.

Les voies d'exposition majeures aux HAP issus du goudron lors des étapes de recyclage concernent l'inhalation de fumées contenant des HAP ou l'ingestion de poussières et le contact cutané de particules contenant des HAP. Le recyclage à chaud conduit à des niveaux d'exposition élevés difficiles à contrôler par des mesures de prévention. Le recyclage à froid limite l'exposition aux fumées mais peut contribuer à une exposition aux poussières contaminées par des HAP. Cette technique de recyclage à froid est parfois utilisée en France sous certaines conditions, notamment en tenant compte des concentrations en HAP émis ou lorsque le matériau est mélangé à froid lors du recyclage et encapsulé par le nouveau liant. Les travailleurs du secteur de l'étanchéité sont également concernés par ce type d'exposition lors des activités de réhabilitation de toitures, notamment durant les opérations d'arrachage de l'ancien revêtement puis de grattage du support susceptibles de contenir du goudron de houille (Maître 2013; McClean, Rinehart *et al.* 2007).

Aucun traitement thermique en vue de détruire les liants contenant du goudron et d'obtenir un agrégat propre n'est appliqué en France. L'incinération n'est pas non plus une option envisagée. En cas de dépôt de matériaux contaminés par du goudron dans les centres d'enfouissement, deux options existent :

- L'admission dans un centre de stockage pour les déchets inertes de classe III en accord avec les prescriptions du décret du 15 mars 2006 spécifiant que seuls les déchets appartenant à la classe 170302 sont autorisés et avant leur admission, la présence de goudron dans les déchets bitumineux doit être vérifiée. Une limite de HAP pour l'admission de ces déchets dans un centre d'enfouissement pour les matériaux inertes a été fixée à 50 mg.kg⁻¹ de déchets secs ;
- L'admission dans un centre de stockage pour déchets dangereux de classe I en accord avec les prescriptions du décret du 30 décembre 2002 dans lequel aucune spécification sur une limite de HAP issus de matériaux contaminés par du goudron n'est mentionnée.

Lorsque les goudrons ou distillats sont présents dans les enrobés à recycler, l'usage d'une technique de recyclage à chaud est à proscrire. Un document de travail de la commission européenne sur le stockage de déchets indique que les mélanges bitumineux considérés comme des déchets inertes ne doivent pas inclure plus de 25 mg.kg⁻¹ de HAP sans préciser de quels HAP il s'agit (Committee for the adaptation to scientific and technical progress of EC-legislation on waste 2002). En pratique, si la présence de goudron est identifiée, l'option de recyclage est exclue.

6.6.2 Amiante

Dans les années 1980, des fibres d'amiante ont été ajoutées de l'ordre de 0,5 à 1,4 % en moyenne pondérale lors de la construction de voiries afin d'augmenter l'épaisseur du film de bitume et renforcer le comportement à la fatigue. L'amiante utilisé était principalement du

chrysotile avec des fibres de longueur comprise entre 1,5 et 40 μm . L'usage semblait cependant restreint et régional avec un arrêt d'utilisation au début des années 1990, substitué par l'utilisation d'autres fibres minérales ou végétales. L'émission de fibres d'amiante est d'autant plus importante lorsque la route est sollicitée ou dégradée ; notamment lors des phases de destruction. C'est la raison pour laquelle lors de l'étape de fraisage, il est indispensable de protéger les travailleurs et les zones environnantes au chantier.

La base de données « Evalutil » rapporte six résultats en zone respiratoire (moyenne de 0,05 f.mL⁻¹) qui s'appliquent à l'enlèvement et à la découpe de revêtements routiers minces contenant 1 % d'amiante ; deux ont été collectés en 1994 et quatre autres en 2002. Dans la même base de données, l'évaluation des paramètres d'exposition par un groupe d'experts en santé et en sécurité du travail, effectuée à partir d'informations recueillies soit au cours d'enquêtes épidémiologiques, soit lors de relevés d'hygiène industrielle, donne une matrice d'exposition pour les manœuvres du secteur d'activité « bâtiments et travaux publics ». Toutefois, la nature du matériel contenant de l'amiante n'est pas précisée dans ces matrices. Il semble que les quelques résultats cités par Evalutil pour les manœuvres qui travaillent sur les revêtements routiers se situent plutôt près de 0,1 f.mL⁻¹ que de 1 f.mL⁻¹ (Perrault and Dion 2005).

En France, il est interdit de recycler des matériaux contenant de l'amiante. Si la présence de fibres d'amiante est identifiée, les matériaux doivent être exclus et traités. D'après le décret 2002-540 du 18 avril 2002, les matériaux routiers contenant de l'amiante ne sont pas considérés comme des déchets dangereux et peuvent être stockés dans des centres de déchets inertes. Le décret du 15 mars 2006 spécifie que les déchets d'amiante lié à des matériaux inertes peuvent être déposés après un examen visuel de l'intégrité des matériaux et un emballage avec la mention amiante. Il existe par ailleurs des guides de bonnes pratiques précisant par exemple que les déchets contenant de l'amiante libre sont interdits des centres de stockage pour déchets inertes.

6.6.3 Soufre

Le soufre est présent naturellement dans les liants bitumineux sous différentes formes (thiophène et composés sulfurés). Le contenu (entre 3 et 6 % en masse) dépend de l'origine de l'huile brute utilisée pour la production. Durant les années 1970 et 1980, plusieurs programmes ont investigué l'usage du soufre dans les matériaux routiers. Ainsi, des liants soufrés (30 à 40 % de soufre ajouté) ou des procédés incluant le soufre dans des asphaltes laminés à chaud ont été développés.

6.6.4 Particules et silice

Au cours des étapes de broyage et de concassage des anciennes routes, des particules peuvent être émises. Par ailleurs, des substances nocives peuvent être émises lors du chauffage réalisé lors du procédé de recyclage. Des données métrologiques récentes réalisées par l'INRS sur des chantiers de recyclage en France confirment la présence et l'émission systématique de silice.

6.6.5 Autres matériaux

Les industriels donnent la priorité à l'utilisation d'enrobés régénérés plutôt que de poursuivre l'inclusion d'autres matériaux dans l'enrobé provenant d'autres industries. L'utilisation de ces déchets issus d'autres provenances est soumise à certains critères, notamment l'absence d'atteintes à la santé ou à la sécurité des travailleurs ou de la population générale ainsi que l'absence d'autres impacts environnementaux. L'EAPA cite par exemple l'utilisation de caoutchouc issu de pneus usagés, de laitier de hauts fourneaux, de scories d'acier, de laitier phosphoré, de mâchefer issu de l'incinération d'ordures ménagères, les cendres issues des centrales d'électricité à charbon, du sable de fonderie, du plastique, etc. (EAPA 2005).

Le projet SAMARIS (SAMARIS management group 2004) rapporte les résultats d'une étude de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique) datée de 1997 et indique qu'en France, les scories d'acier, les laitiers de hauts fourneaux, les cendres de charbon (coalflyash), les déchets de roches minières, les granulés de laitier de hauts fourneaux, les pneus usés, les sous-produits de démolition du bâtiment, les fumées de silice étaient couramment utilisés. Les déchets plastiques, les cendres de déchets solides ménagers incinérés, les sables de fonderie étaient parfois utilisés. Les déchets plastiques sont généralement utilisés comme additif afin d'améliorer les propriétés du liant ou renforcer les mélanges de bitumes. Aucune information n'était disponible pour d'autres matériaux tels que les reliquats de carrières, les déchets de verre ou de bois, etc.

Le projet SAMARIS (SAMARIS management group 2004) rapporte également les résultats d'une étude du département des transports des Etats-Unis datée de 2000 sur l'usage des matériaux recyclés en France (Tableau 29).

**Tableau 29 : Usage des matériaux recyclés en France pour l'année 2000
(SAMARIS management group 2004)**

Matériau	Production totale (million de tonnes)	Usage pour les routes (million de tonnes)
Laitier de hauts fourneaux	5,0	1,1
Scories d'acier	1,3	0,2
Cendres de charbon	1,0	0,25
Déchets miniers de charbon	50 (estimée)	3,0
Matériaux de démolition	5,0	Non renseigné
Mâchefers issus de l'incinération des déchets solides ménagers	1,5	1,0
Sable de fonderie	Non renseigné	Faible quantité
Pneus	Non renseigné	Non renseigné
Plastiques	Non renseigné	Non renseigné

Le projet SAMARIS souligne l'intérêt d'évaluer les composants présents dans le bitume recyclé. A titre d'exemple, le contenu en métaux lourds dans les scories d'acier ou dans les cendres de centrales thermiques peut conduire à un risque sanitaire.

Dans un rapport issu du projet SAMARIS daté de 2006 (SAMARIS management group 2006), les auteurs détaillent les techniques de recyclage et de réutilisation de matériaux secondaires dans le secteur de la construction routière. Pour chaque matériau évoqué précédemment, les informations techniques concernent l'origine, les propriétés physico-chimiques du matériau déchet et du matériau ensuite recyclé, le processus de recyclage, l'usage pour la construction routière, les conséquences environnementales, et les normes techniques, les spécifications ou les lignes directrices par pays européen.

6.7 Réglementation associée au recyclage des produits routiers en France

Avant 2001, la technique du recyclage était restreinte avec une réglementation générale et aucun véritable contrôle. Certains textes réglementaires concernent indirectement les

déchets de produits routiers, notamment la loi du 13 juillet 1992 sur la notion de déchets ultimes et de valorisation, l'avis du 11 novembre 1997 sur la nomenclature des déchets et la directive 1999/31/CE du 26 mars 1999 concernant la mise en décharge des déchets.

Après 2002, plusieurs textes réglementaires spécifiques encadrent l'activité et la gestion des déchets issus du réseau routier. La circulaire du 15 février 2000 définit des prescriptions quant à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics. La circulaire 2001-39 du 18 juin 2001 définit les instructions concernant la gestion des déchets du réseau routier national et stipule qu'il est possible de réutiliser, dans la limite de 10 % des agrégats d'enrobés hydrocarbonés dans la fabrication des enrobés pour couches de fondation et pour couches de base, constituant le corps de chaussée, ainsi que dans la fabrication des enrobés pour couches de liaison moyennant une élaboration convenable (concassage, criblage). Elle impose la réalisation d'études préalables de caractérisation des agrégats et de formulation du mélange.

L'arrêté du 15 mars 2006 fixe la liste des types de déchets inertes admissibles dans les installations de stockage de déchets inertes et les conditions d'exploitation de ces installations en indiquant à l'article 11 que les déchets d'enrobés bitumineux font l'objet d'un test pour s'assurer qu'ils ne contiennent pas de goudron.

L'arrêté du 6 juillet 2011 définit les conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516 et 2517 de la nomenclature des installations classées. L'article 6 précise que les déchets d'enrobés bitumineux relevant du code 170302 (mélanges bitumineux ne contenant pas de goudron) de la liste des déchets figurant à l'annexe II de l'article R541-8 du code de l'environnement, font l'objet d'un test de détection pour s'assurer qu'ils ne contiennent pas de goudron.

Dans un rapport de 2004, le projet SAMARIS (SAMARIS management group 2004) a recensé les textes réglementaires et guides techniques relatifs aux matériaux secondaires utilisés et recyclés dans le cadre de la construction ou la rénovation de voies.

6.8 Projets de recherche

Plusieurs projets européens ont été réalisés ou sont en cours afin de valoriser et développer le recyclage des matériaux bitumineux.

Projet de recherche et de développement SCORE

Le projet SCORE (« Superior cold recycling of bituminous pavements based on potential benefits of new binder, bituminous and foamed bitumen. ») est un projet européen qui a regroupé plusieurs entreprises, laboratoires et unités de recherche universitaires appartenant à 5 pays européens afin de mettre au point des matériaux et des procédés permettant de généraliser le recyclage à froid sur place des enrobés routiers. Des techniques à base d'émulsion et de mousse de bitume permettant ce recyclage à froid existent depuis longtemps. Elles ne permettent pas cependant d'atteindre le niveau de qualité, en terme de performances mécaniques et durée de vie, requis pour des enrobés à chaud. Le projet SCORE se divisait en trois volets : tout d'abord, mieux comprendre le recyclage à froid, depuis le fraisage jusqu'au mélange et aux propriétés finales, de façon à pouvoir proposer des directives précises d'utilisation. Etaient ensuite explorées les possibilités de nouveaux liants améliorés, à partir de l'analyse détaillée des interactions entre l'ancien liant et le nouveau. Enfin, étaient développées des technologies, basées sur l'utilisation des microémulsions et des mousses de bitume.

Projet de recherche et de développement SAMARIS

Le projet SAMARIS (« Sustainable and Advanced MATerials for Road InfraStructure ») a pour objet d'apporter un soutien technique à la politique européenne en matière de développement durable, de gestion des déchets et d'efficacité énergétique en se focalisant particulièrement sur les réseaux routiers européens. Le premier axe consiste à encourager l'utilisation de matériaux secondaires et recyclés dans les travaux de construction et d'entretien routiers en détaillant comment ces matériaux peuvent être sélectionnés et testés d'un point de vue des performances environnementales et fonctionnelles. Le second axe se concentre sur le développement d'une stratégie européenne afin d'accroître la maintenance des réseaux routiers à travers des méthodes efficaces et durables.

Projet de recherche et de développement Re Road

Ce projet collaboratif européen a pour objectif de développer la connaissance et les innovations technologiques en matière de réutilisation des matériaux bitumineux. Cette démarche s'inscrit dans une réduction de la consommation en matériaux neufs et en énergie, des déchets, de l'utilisation des centres d'enfouissement techniques et par conséquent implique de minimiser les transports. Plusieurs axes ont été proposés, notamment sur l'échantillonnage et la caractérisation des agrégats d'enrobés, l'impact des caractéristiques des agrégats d'enrobés sur le dimensionnement et les performances de l'enrobé, les performances environnementales des agrégats d'enrobés, la gestion et la production des agrégats d'enrobés en centrales.

Peu de publications sur les effets ou des données d'émission et d'exposition au poste de travail lors d'opérations de recyclage sont publiées. Hugener *et al.* (Hugener, Emmenegger *et al.* 2007; Hugener, Emmenegger *et al.* 2009; Hugener, Emmenegger *et al.* 2010) ont réalisé des études en laboratoire ou sur terrain pendant des opérations de recyclage à chaud afin d'évaluer entre autres les paramètres influençant l'émission en HAP lors de ces opérations.

Legret *et al.* (Legret, Odie *et al.* 2005) ont réalisé des analyses sur des échantillons provenant d'un site expérimental avec des agrégats d'enrobés. Ils ont identifié des contaminants présents dans ces agrégats tels que des HAP issus de l'essence ou du liant goudronneux, des métaux lourds (zinc, cuivre, nickel, *etc*) issus des pneus ou des plaquettes de freinage. D'autres contaminants supplémentaires peuvent s'ajouter consécutivement à l'usure des infrastructures routières telles que les barrières de sécurité. Des particules d'agrégats d'enrobés abrasés par l'usure des routes peuvent se déposer et s'infiltrer dans la route.

Projet de recherche OFRIR

Le projet OFRIR (Observatoire français du recyclage dans les infrastructures routières), coordonné par le LCPC et associant l'ADEME, l'INERIS, le BRGM, le Setra et de nombreux laboratoires des Ponts et Chaussées a été mis en œuvre afin de collecter des données concernant le domaine du recyclage routier en France pour à terme, créer une base de données internet regroupant les informations rassemblées par tous les partenaires du projet. Ces données ont dans un premier temps, été mises à disposition de la communauté routière via internet, puis rendues accessibles au grand public.

6.9 Politiques de recyclage dans quelques pays européens

Allemagne

Les granulats de recyclage contenant du goudron (teneur jusqu'à 10 % de goudron, soit environ 20 000 mg 16 HAP-EPA/kg) sont utilisés aussi bien avec du ciment qu'avec des émulsions de bitume pour liant.

Suisse

Jusqu'en 1991, le goudron a été utilisé en Suisse. La réglementation a limité l'utilisation des revêtements contenant du goudron pour ensuite les interdire (OFEV 2006). Les revêtements à faible teneur en HAP (seuil inférieur à 5 000 mg 16 HAP-EPA /kg) peuvent être recyclés: sous forme liée à chaud (en centrale d'enrobage) ou à froid (*in situ*); sous forme non liée; stockable en décharge pour déchets inertes. Il est également possible de recycler des croûtes d'enrobés contenant jusqu'à 20 000 mg 16 HAP-EPA/kg, mais uniquement sous forme liée à chaud (en centrale d'enrobage). Au-delà de 20 000 mg 16 HAP-EPA/kg, les déchets sont orientés vers une décharge contrôlée bioactive (Hugener, Deschwanden *et al.* 1999). Des méthodes semi-quantitatives utilisées sur chantier pour évaluer rapidement les teneurs en HAP des liants bitumineux sont décrites dans la « Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux » éditée par l'Office fédéral de l'environnement.

Suède

L'administration suédoise des routes a élaboré des directives sur la manière de traiter le goudron présent (Swedish Road Administration 2004). Les lignes directrices contiennent des recommandations pour l'échantillonnage, les analyses, la communication avec les méthodes des autorités, le stockage et le recyclage. Le bitume est, chimiquement, identifié comme un « pavé de goudron lorsque la concentration de 16 HAP est plus de 70 mg/kg (matière solide) ». Aussi les liants bitumineux contiennent de petites quantités de HAP et il pourrait aussi s'agir d'une contamination par le trafic routier et des opérations de maintenance qui ajoutent des traces de HAP à un trottoir. Toutefois, cette contamination ne doit pas dépasser 70 mg/kg de 16 HAP.

7 Evaluation des expositions professionnelles

7.1 Estimation des populations professionnelles concernées

7.1.1 Données issues de la littérature et des auditions

Près de 100 000 salariés sont employés dans le secteur de l'industrie de la construction et de l'entretien des routes en France. D'après les données CNAMTS de 2010, 61 178 salariés sont affectés à la construction et l'entretien de chaussées et à la fabrication de produits asphaltés ou enrobés (CNAMTS-DPR 2011). L'USIRF estime à environ 5 000 le nombre d'opérateurs directement concernés par une exposition aux liants routiers, que ce soit pour des activités de construction ou de rénovation. De son côté, la CGT précise que 4 500 salariés sont affectés aux travaux sur machine uniquement (équipes finisseurs réguliers) et porte à environ 85 000 le nombre de salariés exposés potentiellement à la fois sur travaux manuels et sur machine.

Dans le secteur de l'étanchéité des toitures/terrasses, ce sont, d'après la chambre syndicale française de l'étanchéité (CSFE), 7000 à 8000 personnes actives qui sont concernées par les produits d'étanchéité à base de bitume (sans forcément les manipuler). L'exposition potentielle aux fumées de bitume a lieu pendant le temps de soudage qui, selon la CSFE, représente au maximum 30 % du temps de travail.

7.1.2 Données issues de l'enquête SUMER

L'enquête SUMER (surveillance médicale des expositions aux risques professionnels), réalisée tous les sept ans par la Direction de l'animation de la recherche, des études et des statistiques (DARES) et la Direction générale du travail (DGT - Inspection médicale du travail) dresse une cartographie des expositions des salariés aux principaux risques professionnels en France.

SUMER 2010 est la troisième enquête SUMER. Elargi par rapport à SUMER 2003, le champ de l'enquête couvre l'ensemble des salariés surveillés par la médecine du travail et couverts par le régime général et le régime agricole (mutualité sociale agricole), ainsi que les salariés des hôpitaux publics, d'EDF-GDF, de La Poste, de la SNCF, d'Air France, de la RATP, les gens de mer et une grande partie des agents de la fonction publique d'État et des collectivités territoriales soit 90% des salariés français en 2010.

Réalisée auprès de 48 000 salariés, de janvier 2009 à la mi-2010 avec la collaboration de 2400 médecins du travail, la collecte des informations relatives aux expositions des salariés repose sur l'expertise professionnelle du médecin du travail. Le recensement des expositions des salariés aux nuisances chimiques est réalisé par le médecin enquêteur sur les activités du salarié au cours de la dernière semaine travaillée ce qui peut entraîner une sous-évaluation des expositions liées à des activités ponctuelles ou irrégulières.

L'enquête SUMER est réalisée auprès d'un échantillon d'environ 50 000 salariés et non pas auprès de l'ensemble des salariés travaillant en France (y compris DOM). L'échantillon enquêté subit donc un redressement par pondération de manière à représenter correctement les expositions de l'ensemble des salariés du champ enquêté. Les données après pondération sont ainsi représentatives de près de 22 millions de salariés du champ de l'enquête, en revanche les résultats fournis ne sont qu'une estimation de la réalité des expositions et une certaine marge d'erreur doit être prise en compte.

D'après les résultats de SUMER 2010, la DARES a réalisé une extraction des données relatives aux salariés exposés à la nuisance chimique « goudrons de houille, huiles de houille et bitume », au niveau le plus fin possible des codes NAF pour les 4 familles professionnelles entrant dans le champ d'instruction de la saisine (la construction des routes

et autoroutes, la construction d'ouvrages d'art, la construction et entretien de tunnels ainsi que les travaux d'étanchéification).

D'après les résultats de la recherche demandée, sont recensés au total, en effectif non pondéré, 136 salariés travaillant dans les domaines d'activité spécifiés et parmi eux 32 étaient notés comme exposés, dans la semaine précédant l'enquête, par les médecins du travail. L'observation des résultats à un niveau supérieur, plus agrégé de la nomenclature des secteurs d'activités, n'apporte pas d'informations supplémentaires en termes d'effectifs, mais rajoute simplement des activités pouvant être exposantes à ces produits.

Le nombre de salariés exposés dans ces domaines d'activité est très faible et est donc non significatif au plan statistique ce qui implique qu'il n'est pas pertinent de réaliser un redressement des effectifs recensés. Par ailleurs la construction du questionnaire ne permet pas de distinguer les expositions au « bitume et ses dérivés » et celles aux « goudrons de houille et ses dérivés ». Il n'existe en effet qu'une seule question (n° 388) relative aux expositions «aux goudrons de houille, bitume et huiles de houille ».

Il n'est donc pas possible d'utiliser les résultats de SUMER 2010 pour estimer le nombre de travailleurs concernés par une exposition aux fumées de bitumes lors de travaux routiers ou d'étanchéité.

7.2 Les émissions de bitume

En 2011, 16 experts de 9 pays se sont réunis au Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) à Lyon, en France, afin de réévaluer la cancérogénicité des bitumes et de leurs émissions (Lauby-Secretan, Baan *et al.* 2011). Durant cette réunion, les experts ont décidé de retirer le terme "les fumées de bitume", anciennement utilisé dans la précédente monographie 35 et de le remplacer par "leurs émissions", qui englobe toutes les formes de dégagement des bitumes chauds : les particules en suspension, les vapeurs dont les COV, les gaz et les projections de bitume (ex : lors du répandage de la couche d'adhésion). Nous adopterons dans ce document la notion d' « émissions de bitume » lorsqu'il s'agit de toutes les formes de dégagement suscitées, et la notion de « fumées de bitume » lors qu'il ne s'agit que de ce qui est émis à la surface d'un bitume chaud par évaporation.

7.2.1 Généralités

Le processus théorique d'émission des fumées de bitume est synthétisé en Figure 35. Avec les températures auxquelles est soumis le bitume, entre 80-260 °C, il se crée un dégagement de vapeurs contenant des COV et de l'eau dans la couche limite de diffusion située entre la surface du bitume et quelques micromètres au dessus de la surface. Tous les composés émis par le bitume sont sous la forme vapeurs qui sont à saturation et des échanges se font avec la surface. Certains gaz comme le H₂S peuvent être émis à ce moment et restent dans les émissions à l'état gazeux. Au-delà de cette couche de diffusion, l'air de l'atmosphère est renouvelé ce qui crée un gradient de température élevé entre la couche de diffusion et l'atmosphère. La pression de vapeur des composés devient alors supérieure à la pression de vapeur saturante ce qui conduit à la condensation d'une partie des vapeurs sous la forme de particules (solides ou liquides) en suspension dans l'air. Le processus de condensation se produit selon une nucléation majoritairement hétérogène, sur les particules environnementales présentes dans l'atmosphère. La condensation des vapeurs émises sous forme particulaire s'arrête lorsque la pression de vapeur des composés est insuffisante pour alimenter ce processus.

Le diamètre des particules formées varie au cours du temps et au cours du transport de celles-ci dans la zone de maturation pouvant mesurer jusqu'à 30 cm. Ces particules de condensat évoluent d'une dimension nanométrique à la surface de la couche limite, à une taille micrométrique de l'ordre de 0,1 à 20 µm en fonction des conditions atmosphériques (convection, température, humidité, concentration particulaire environnementales dans la

zone de maturation) et des pressions de vapeurs des composés (Burstyn, Randem *et al.* 2002; Heikkila, Riala *et al.* 2002; McClean, Rinehart *et al.* 2004b).

Au-delà de la zone de maturation, les vapeurs et les particules sont diluées et dispersées dans l'atmosphère de travail des salariés par convection thermique et naturelle. Les vapeurs ne sont alors plus saturantes. Le déséquilibre thermodynamique qui en résulte provoque l'évaporation lente des composés les plus légers condensés à la surface des particules ; la température des particules, proche ou égale à la température atmosphérique, est alors insuffisante pour l'évaporation des composés les plus lourds constituant les particules.

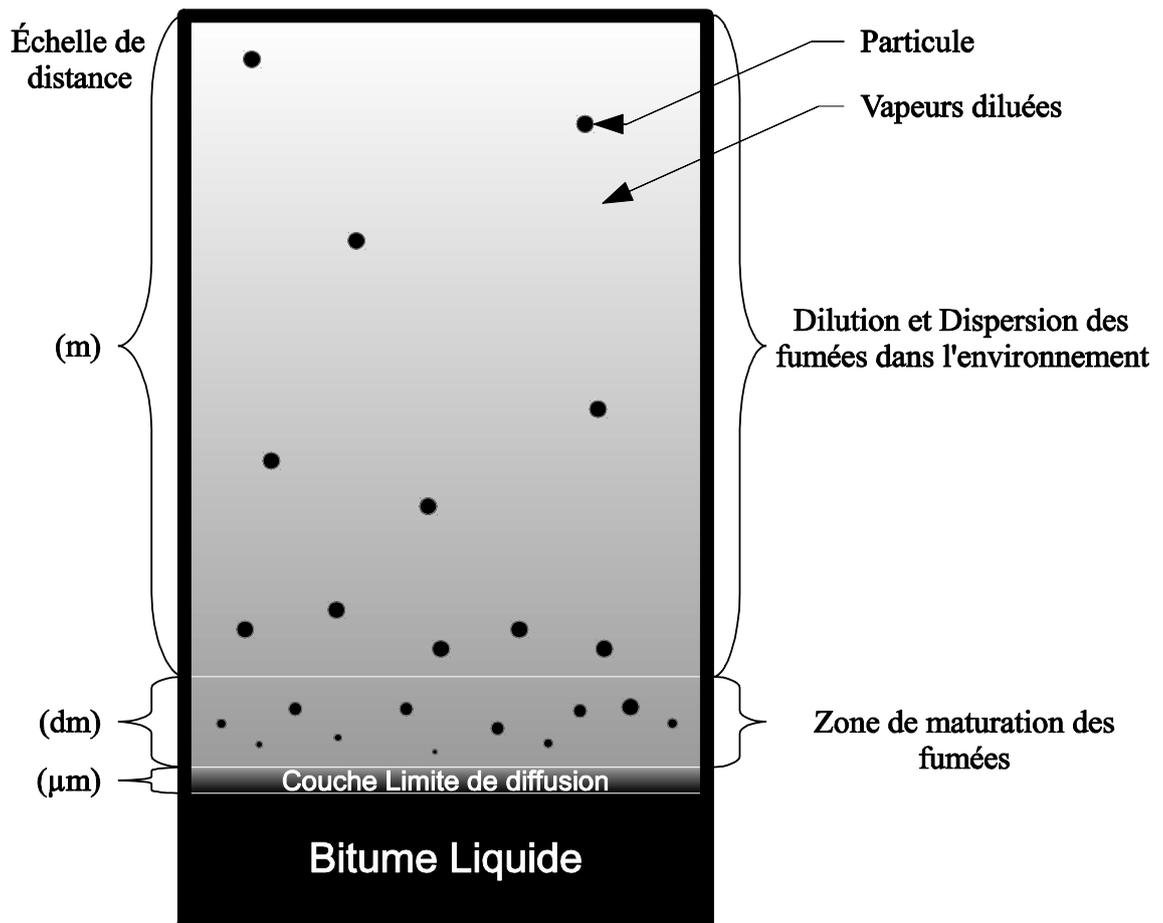


Figure 35 : Modélisation des émissions de bitume étudiées en laboratoire

Les émissions de bitume se définissent donc comme un système dynamique dans lequel coexistent plusieurs états de la matière (Binet, Bonnet *et al.* 2002).

Lorsque le bitume n'est pas utilisé à l'état pur comme dans les cas des enrobés mais « fluxé » pour le rendre plus liquide, la composition de l'émission est encore plus complexe, car l'huile utilisée comme « fluxant » participe également à l'émission du bitume. Dans ce cas, les émissions seront du même type que celles du bitume (fluxant d'origine pétrolière) ou très différentes (fluxant d'origine houillère ou agrochimique). Des gouttelettes de bitumes peuvent aussi se trouver en suspension dans l'air par simple effet mécanique lors de la pulvérisation du bitume liquide lors de l'épandage par le procédé de « gravillonnage ». Ceci est aussi considéré comme émission par le bitume, malgré son point d'ébullition extrêmement élevé.

Les salariés sont donc exposés à un mélange de particules associées à des vapeurs qui sont respectivement dispersées et diluées dans l'atmosphère de travail. Pour qu'il n'y ait pas d'ambiguïté, la notion "d'émissions" doit être bien définie car en réalité, ce ne sont pas les émissions à la source qui sont mesurées, mais ce qu'elles sont devenues au niveau de la cible (opérateur, animal de laboratoire). Aussi doit-on tenir compte des notions de distance et d'intervalle de temps entre la source d'émission (en laboratoire ou sur le terrain) et le système de mesure (immédiat ou différé) porté ou non par la cible : il est évident qu'entre l'émetteur et le récepteur, la chute de température (voire le retour à l'ambiante), ainsi que les mouvements d'air vont modifier la répartition entre vapeurs et aérosols.

7.2.2 Composition chimique des fumées de bitume

Aucune étude traitant du lien entre la constitution SARA des bitumes et les fumées de bitume n'a été répertoriée. Ceci s'explique par le fait que ces constitutions intéressent essentiellement les pétroliers et les recherches liées aux bitumes bruts. Les fumées issues de ces bitumes sont, en revanche, la préoccupation des hygiénistes du travail qui ont une approche différente et très largement centrée sur les composés polyaromatiques cités dans la liste de l'US-EPA. Seule une étude précise que dans des fumées de bitume destinées à l'activité d'étanchéité, il y a moins de 1 % de composés aromatiques et plus de 99 % de composés aliphatiques (Niemeier, Thayer *et al.* 1988). Ces proportions, déterminées par RMN, sont bien différentes de celles constatées dans les bitumes purs.

Comme exposé précédemment, la constitution des fumées de bitume en termes de molécules et/ou familles de molécules a été essentiellement orientée vers certains composés aromatiques polycycliques. Ainsi, les toxicologues et les hygiénistes se sont concentrés sur les 16 HAPs de la liste définie par l'US-EPA.

Dans l'atmosphère, les HAP les plus légers, formés de 2 ou 3 cycles, sont émis sous forme vapeur tandis que les plus lourds, de 5 à 6 cycles sont généralement émis sous forme particulaire. La répartition entre ces deux phases dépend de leurs caractéristiques physico-chimiques (masse moléculaire, point d'ébullition, nombre de cycles benzéniques). Les molécules de type fluoranthène et pyrène, constituées de quatre cycles, sont retrouvées à la fois sous forme vapeur et particulaire.

Le NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) propose une classification (NIOSH 2000), complétée par une synthèse bibliographique des études, définissant les constitutions chimiques des fumées (Binet, Bonnet *et al.* 2002; Gasthauer, Maze *et al.* 2008; Herrick, McClean *et al.* 2007). Le Tableau 30 synthétise cette classification.

Tableau 30 : Classification des composés chimiques contenus dans les fumées de bitume (NIOSH 2000)

Hydrocarbures Purs	Composés contenant de l'oxygène
Alcanes, C9 - C27	Benzofuranes, C0 - C2
Alcènes / Cycloalcanes	Dibenzofuranes, C0 - C2
Benzènes, C2 - C8	Acétophénonnes, C0 - C3
Indanes, C0 - C4	Fluorénones, C0 - C3
Indènes, C0 - C3	Dihydroindénones, C0 - C4
Naphtalènes, C0 - C5	Cycloalcénones, C6 - C11
Biphenyls, C0 - C2	Dihydrofuranones
Fluorenes / Acénaphène / Acénaphylène, C0 - C3	Isobenzofuranones, C0 - C3
Anthracènes / Phénanthrènes, C0 - C4	Phénols, C0 - C4
Pyrènes, Fluoranthènes, C0 - C2	Naphtols, C0 - C2
Chrysènes / Benz[a]anthracènes, C0-C2	Furanones, C1 - C3
	Indanones
	Alcanones, C8 - C22
	Acides alcanoïques, C5 -C14
	Acides Benzoïques, C0 - C4
Composés contenant du Soufre	Composés contenant de l'azote
Benzothiophenes, C0 - C9	carabazoles, C0 - C4
Dibenzo- / Naphto- thiophènes, C0 - C4	
Cycliques condensés tricarbo-cycliques thiophènes, C0 - C1	
Hydroxybenzenethiols, C0 - C4	

Les familles de composés sur fond orange représentent 64,1 % de la masse des condensats de fumées de bitume. Les notations C_x-C_y donnent le degré de substitution par des fonctions alkyl dont le nombre d'atomes de carbones est donné par x et y.

L'étude Binet, Bonnet *et al.* (2002) a permis de doser les HAP et certains dérivés alkylés à la fois dans un bitume et dans ses émissions à l'aide d'un système expérimental de génération dynamique de fumées. D'autres études sur le dosage de ces composés hydrocarbonés dans les émissions de bitume sont disponibles, cependant aucune ne fait de lien avec leur concentration en HAP dans le bitume expérimenté. Par conséquent, la relation de la concentration en HAP dans les émissions, en fonction de leur concentration dans le bitume, est aujourd'hui toujours difficile à estimer.

L'indice d'émissivité du bitume pour chaque composé a été calculé lorsque les concentrations dans le bitume et dans les émissions étaient disponibles. L'indice d'émissivité ε est défini d'après l'équation suivante :

$$\varepsilon = \frac{C_{atm}}{C_{bitume} \times C_{totale\ atm}}$$

Avec C_{atm} la concentration massique du composé considéré dans la proche atmosphère de la surface du bitume, C_{bitume} la concentration massique du composé considéré dans le bitume liquide, et $C_{totale\ atm}$ la concentration totale de tous les composés émis dans la proche atmosphère de la surface du bitume.

Ainsi, l'émissivité estime la capacité d'un composé ciblé présent dans le bitume à passer dans les émissions totales. Elle est dépendante de la concentration initiale du composé considéré dans le bitume, de la température du bitume et du renouvellement de la surface du bitume qui est beaucoup plus difficile à estimer.

Le Tableau 31 synthétise les concentrations en composés aromatiques dosés à la fois dans les fumées et dans le bitume lors des générations permettant d'atteindre une concentration totale en particules de $6,3\text{ mg.m}^{-3}$, d'après les données publiées par Binet et al. (2002).

Pour calculer l'émissivité d'après les données de Binet *et al.* (2002), les concentrations C_{atm} et C_{bitume} ont été calculées telles que :

- C_{bitume} est la concentration massique moyenne du composé considéré dans le bitume liquide, calculée d'après les dosages réalisés dans les différentes conditions de générations détaillées dans l'étude.
- C_{atm} est la concentration du composés considéré, calculée par la somme des concentrations déterminées sur les supports de prélèvement que sont le filtre et le tube d'adsorbant de résine XAD-2.

$C_{totale\ atm}$ est dans tous les calculs de l'émissivité, égale à $6,3\text{ mg.m}^{-3}$.

Tableau 31 : Synthèse des émissivités des composés étudiés par Binet, Bonnet *et al.* (2002) calculées pour la concentration en fumées totale de 6,3 mg.m⁻³ (Binet, Bonnet *et al.* 2002)

Hydrocarbures aromatiques polycycliques	NB. Cycles	Bitume	Fumées	Emissivité
		mg.kg ⁻¹	µg.m ⁻³	(-)
Dibenzothiophene	3	2,8167	2,6450	0,1491
Benzo(b)naphtho-[1,2-d]thiophene	4	1,3333	0,0990	0,0118
Benzo(b)naphtho-[2,1-d]thiophene	4	5,0333	0,3270	0,0103
Benzo(b)naphtho-[2,3-d]thiophene	4	0,3667	0,0450	0,0195
Naphthalene	2	0,2500	53,2040	33,7803
1-Methylnaphthalene	2	0,2567	49,8220	30,8114
2-Methylnaphthalene	2	0,5450	83,8270	24,4144
1,2-Dimethylnaphthalene	2	0,1850	15,8530	13,6019
1,3- + 1,4- + 1,5-Dimethylnaphthalene	2	0,7067	34,2820	7,7004
2,6-Dimethylnaphthalene	2	0,1500	54,2520	57,4095
2,3,5-Trimethylnaphthalene	2	0,1667	27,1710	25,8771
Fluorene	3	0,5283	12,2440	3,6785
Phenanthrene	3	2,6317	9,5460	0,5758
1-Methylphenanthrene	3	4,9483	3,0220	0,0969
2-Methylantracene	3	2,8667	2,8760	0,1592
3,6-Dimethylphenanthrene	3	0,2583	0,1550	0,0952
Benzo[a]anthracene	4	0,6300	0,0600	0,0151
Benzo[a]fluorene	4	0,8333	0,1710	0,0326
Benzo[b]fluorene	4	0,1900	0,0070	0,0058
Chrysene	4	1,7350	0,1160	0,0106
Pyrene	4	1,2133	0,1410	0,0184
3-Methylchrysene	4	1,2650	0,0710	0,0089
4-Methylchrysene	4	1,4017	0,0800	0,0091
5-Methylchrysene	4	1,6483	0,0830	0,0080
1-Methylpyrene	4	2,2417	0,1940	0,0137
Benzo[a]pyrene	5	0,6400	0,0360	0,0089
Benzo[e]pyrene	5	2,7550	0,0610	0,0035
Benzo[k]fluoranthene	5	1,0050	0,0590	0,0093

Si nous recherchons une relation entre l'émissivité du bitume testé et le point d'ébullition des composés aromatiques, nous obtenons la Figure 36 ci-dessous. Nous pouvons observer une diminution importante de l'émissivité avec l'augmentation du point d'ébullition qui peut être partiellement représentée par un modèle décroissant de type puissance.

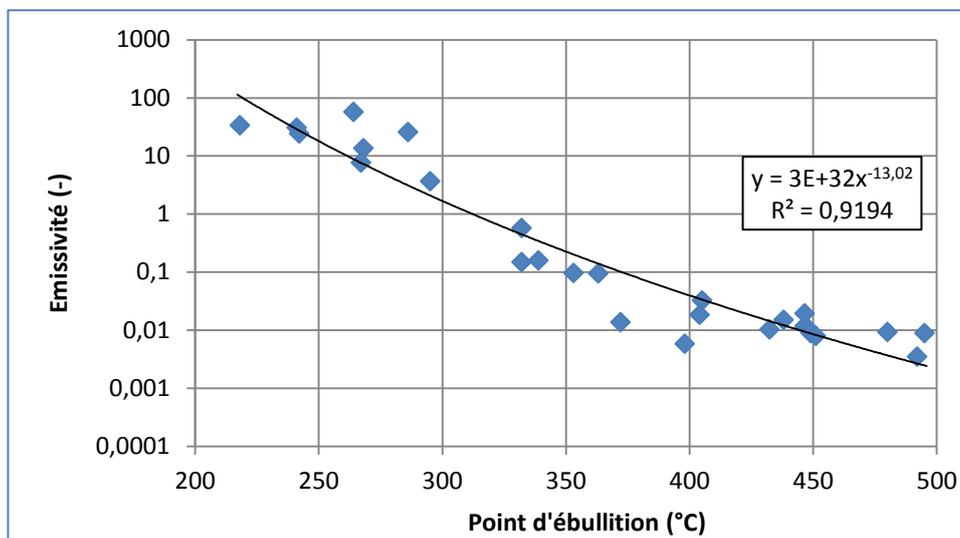


Figure 36 : Emissivité de chaque HAP en fonction de leur point d'ébullition, d'après Binet, Bonnet *et al.* (2002)

L'émissivité du bitume testé diminue environ d'un facteur 10 à chaque ajout d'un cycle dans la structure des composés ou par l'augmentation de 50°C du point d'ébullition, ce qui explique que les composés à 2 et 3 cycles seront très majoritaires dans les fumées par rapport aux composés de 4 cycles et plus.

Le calcul de l'émissivité des composés analysés par Binet, Bonnet *et al.* (2002) permet donc, pour un bitume spécifique mis en œuvre dans des conditions particulières de laboratoire, de mieux appréhender les phénomènes d'évaporation de ces composés en fonction de leur nombre de cycles.

Cette tendance a également été observée par les scientifiques de l'industrie du pétrole suite à des mesures de caractérisation d'émissions sur un système statique par l'utilisation de la méthode de laboratoire développée par le Fraunhofer Institute of toxicological and experimental medicine (Fh-ITEM) (Figure 37).

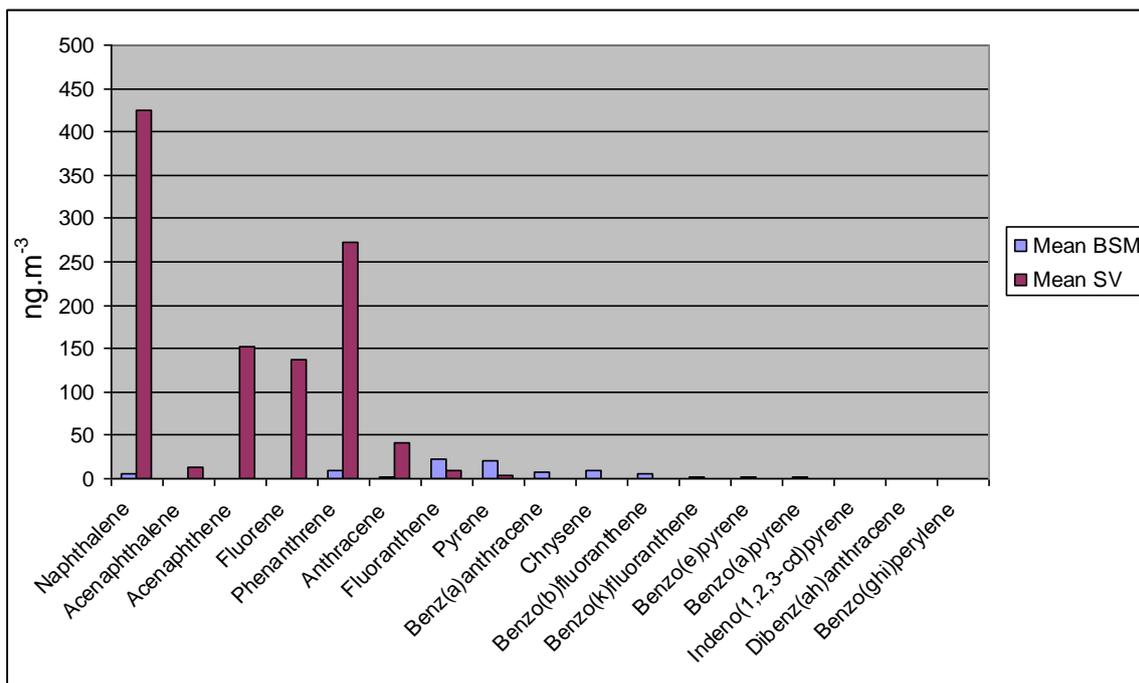


Figure 37 : Caractérisation par Fh-ITEM des fractions aérosols et vapeurs des émissions de bitumes

Les résultats de campagnes de mesures des 16 HAP de l'US-EPA uniquement dans les fumées et dans différents contextes sont disponibles dans la littérature (Breuer, Hahn *et al.* 2011; Herrick, McClean *et al.* 2007; Preiss, Koch *et al.* 2006). Cependant, ces mesures ne sont pas comparables, car les bitumes, les conditions climatiques (intérieur, extérieur), les moyens et caractéristiques de prélèvement ainsi que les techniques analytiques divergent. Ainsi, après étude de ces résultats, il paraît hasardeux de dégager des concentrations moyennes en HAP dans les fumées.

En utilisant des techniques modernes d'analyse comme la chromatographie gazeuse couplée à un spectromètre de masse (GC-MS) et des procédures de purification intensives ("Clean-Up"), la contribution d'autres composés émis dans les fumées tels les dérivés méthylés de HAP de 2 à 4 cycles, les HAP hétérocycliques soufrés (HAPS) et le niveau de composés organiques volatils (COV) et semi-volatils dans les fumées de bitume ont été réalisés (Binet, Bonnet *et al.* 2002; Huynh, Vu Duc *et al.* 2007; Vu-Duc, Huynh *et al.* 2007).

7.2.3 Facteurs de variabilité de la composition des émissions

7.2.3.1 Température

L'émission de fumée évolue en fonction de la température du bitume : plus la température est élevée, plus l'émission de fumée est importante. Quelques études laboratoire et terrain permettent de préciser l'impact de la température sur les émissions et les résultats montrent que température et émission évoluent dans le même sens. Cependant, l'amplitude de l'effet d'une élévation de température sur l'augmentation des émissions est très variable.

Dans une étude datant de 1999, Brandt et de Groot ont montré que le taux d'émissions de fumées générées en laboratoire double par incrément d'environ 12°C (Brandt and de Groot 1999). Ensuite, en utilisant des montages différents, Law, Stone *et al.* (2006) ont montré qu'il faut augmenter la température de 30°C pour doubler les émissions, puis Gaudefroy, Viranaiken *et al.* (2010) ont trouvé une augmentation des émissions de 30% pour une température incrémentée de 50°C. D'autres auteurs ont abordé ce problème (Cavallari,

Zwack *et al.* 2012), mais selon une méthodologie que le GT n'a pas jugée satisfaisante. Notons finalement qu'aucune de ces études physico-chimiques menées en laboratoire ne propose de relation entre la composition chimique du bitume et l'influence de la température sur la nature et la quantité des émissions.

Au niveau du terrain, les températures de fabrication et d'application de bitume ont diminué de façon constante depuis 20 ans. Elles sont comprises aujourd'hui entre 150 à 170°C et les nouvelles technologies tendent à passer de plus en plus à des températures de 120-130°C ou inférieures à 100°C. L'impact de la baisse de température sur les concentrations atmosphériques mesurées lors des différents chantiers est très variable et on ne peut pas donner un ordre de grandeur de cet impact sur la baisse des émissions : Watts, Wallingford *et al.* (1998) ont étudié l'intérêt des enrobés tièdes aux Etats-Unis. Ces auteurs ont noté une baisse des émissions en moyenne grâce aux enrobés tièdes, mais on constate aussi qu'à température équivalente, les expositions peuvent varier d'un facteur 10. De même, Kriech, Osborn *et al.* (2011) ont constaté un rapport de 1 à 7 entre les émissions de deux chantiers différents utilisant le même type d'enrobés, obtenus à partir de bitumes de grades similaires (PG 64-22), et posés à des températures similaires. Les auteurs estiment que cela est dû à la différence d'origine des bitumes. Là encore, en moyenne les émissions sont moindres avec les enrobés tièdes qu'avec des enrobés à chaud, mais la baisse des concentrations atmosphériques relevées est plutôt de 36% pour une baisse de température de 50°C. Finalement, McClean, Osborn *et al.* (2012) ont montré que la température d'application était positivement corrélée aux concentrations urinaires en métabolites de HAP (hydroxy-pyrène, fluorène et phénanthrène) : une augmentation de la température de 121°C à 154°C conduit quasiment à un doublement de ces concentrations. Finalement, d'après les auditions de l'USIRF et de l'IFFSTAR, les expositions aux fumées de bitume auraient diminué de 6 % par an en France.

En conclusion, l'impact de la température sur les expositions aux émissions de bitumes a été appréhendé par différents auteurs selon différentes techniques, en laboratoire et sur le terrain. Si la tendance est à la baisse des émissions pour une baisse de température, une plus grande variabilité est à attribuer à la substance utilisée, le grade seul n'étant pas suffisant pour caractériser l'ordre de grandeur des émissions.

7.2.3.2 Composition de la substance

Les émissions sont proportionnelles aux quantités de composés présents dans le mélange :

- La différence entre les émissions issues des produits bitumineux par rapport à celles issues des produits houillers montre que la proportion du composé émis dépend de sa proportion dans le produit d'origine. Le Tableau 32 ci-dessous qui décrit les concentrations en HAP dans du bitume, du brai de houille ainsi que dans les fumées de bitume et de brai de houille illustre bien cette notion.
- Une différence qualitative dans la composition des émissions est également attendue entre les bitumes oxydés et semi-soufflés, et les bitumes routiers de par l'analyse physico-chimique du système, mais aucune donnée n'est disponible sur cette question.

Au sein d'un même grade de bitume, les émissions peuvent varier de manière significative (Gaudefroy, Viranaiken *et al.* 2010; Kriech, Osborn *et al.* 2011).

Tableau 32 : Concentrations des HAP (ppm ou µg/g) dans du bitume, du brai de houille et dans les fumées (en ppm de BSM) à partir du bitume et de brai de houille (Brandt, de Groot et al. 1985).

HAP	Bitume [min-max] (ppm ou µg/g)	Brai de houille [min-max] (ppm ou µg/g)	Fumées de bitume 160-250°C [min-max] (ppm de BSM)	Fumée de brai de houille 160-250°C [min-max] (ppm de BSM)
Phenanthrene	0,32-7,3	19 850-25 700	107-842	2,0-2,5 x10 ⁵
Anthracene	0,01-0,32	4 600-7 310	3,6-22	0,56-0,76 x10 ⁵
Fluoranthene	0,1-0,72	29 000-36 000	13-32	0,76-0,92 x10 ⁵
Pyrene	0,17-1,5	21 300-27 200	15-134	0,44-0,55 x10 ⁵
Chrysene	0,8-3,9	11 200-24 510	12-40	0,12-0,059 x10 ⁵
Perylene	0,04-3,9	2 770-3 500	1,7-15	119-456
Benzo(k)fluoranthene	nd-2,2	5 250-6 010	nd-2,6	377-1 216
Benzo(a)pyrene	0,22-1,8	11 360-15 170	2,9-8,5	553-2 022
Benzo(g,h,i)perylene	1,2-5,7	3 430-3 530	6,0-15	34-200
Anthanthrene	nd-0,11	1 231-1 728	nd	9-69
Dibenzo(a,i)pyrene	nd-0,6	127-164	nd-0,5	nd-0,6
Coronene	nd-0,4	nd-120	nd-11	nd

7.2.3.3 Paramètres physiques de génération des émissions

Un certain nombre de paramètres physiques ont une influence sur la composition des émissions, notamment les paramètres liés à la surface d'échange entre le produit et l'atmosphère :

- Viscosité
- Agitation
- Surface développée (principalement lors de la manipulation des enrobés)
- Renouvellement de l'atmosphère
- Malaxage
- Entraînement par la vapeur d'eau
- etc.

L'ensemble de ces facteurs impliqués dans la variabilité de composition des émissions de bitumes expliquent la difficulté de génération d'émissions représentatives du terrain en laboratoire. Ce point constitue une limite très importante pour l'analyse et l'interprétation des études de toxicologie animale.

7.3 Métrologie atmosphérique

7.3.1 Méthodes de prélèvement

Les émissions de bitumes sont composées de particules en suspension dans l'air et de vapeurs de composés organiques issus du bitume chaud. L'évaluation de l'exposition des salariés à ces fumées passe donc par le prélèvement systématique des deux fractions inhalables, particules et vapeurs, par un dispositif d'échantillonnage porté par les salariés. Le prélèvement des deux phases de fumées de bitume est d'autant plus important que celles-ci contiennent plus de composés volatils ou semi-volatils que de composés stables sous forme particulaire (Spickenheuer, Ruhl *et al.* 2011).

Certaines méthodes préconisent uniquement le prélèvement de l'une des deux phases. La méthode NIOSH 5042 intitulée « Benzene soluble fraction and Total Particulate (Asphalte Fume) », préconise par exemple le prélèvement unique de la phase particulaire (NIOSH 1998a). Cette méthode a donc été modifiée à plusieurs reprises afin de pouvoir prélever l'ensemble des fractions des fumées de bitumes étudiées (Binet, Bonnet *et al.* 2002; Bonnet, Binet *et al.* 2000; Breuer, Hahn *et al.* 2011; Burstyn, Ferrari *et al.* 2002; Burstyn, Kromhout *et al.* 2000).

Selon la température du bitume utilisée et le poids moléculaire (ie, le nombre de cycles), les HAP peuvent être présents dans l'air sous forme de vapeurs ou adsorbés sur des particules en suspension. Les HAP liés aux particules sont recueillis par pompage de l'air à travers un filtre ou un impacteur suivi par un filtre de sauvegarde, après quoi les HAP gazeux sont adsorbés (sur un adsorbant) à partir du flux d'air passant par ce filtre. Différents filtres (par exemple, les filtres à quartz, en fibre de verre, filtres en Téflon) et des adsorbants (par exemple, les résines XAD-2 et de mousse de polyuréthane) peuvent être utilisés pour l'échantillonnage. Le système est présenté dans la Figure 38 ci-dessous :

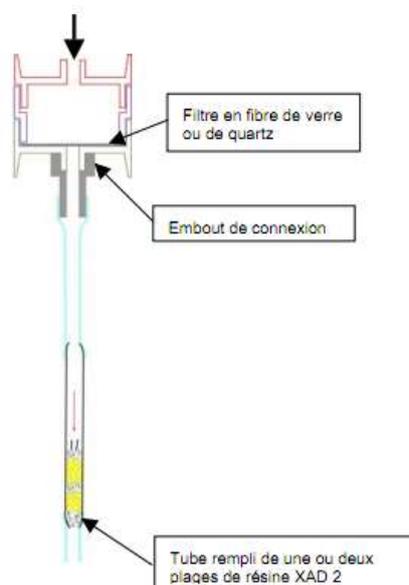


Figure 38 : Système d'échantillonnage des HAP dans les émissions de bitumes (INRS 2007)

Même s'il n'y a pas consensus sur le matériel de prélèvement et les méthodes analytiques à employer pour évaluer l'exposition des salariés aux émissions de bitume, chaque échantillonnage doit respecter un certain nombre de critères définis par des normes européennes.

La norme NF EN 482 « Exigences générales concernant les performances des modes opératoires de mesure des agents chimiques » fixe les performances minimales requises pour l'obtention des meilleurs résultats d'évaluation des expositions des salariés aux produits

chimiques. Les émissions de bitumes étant composées d'une phase particulaire et d'une phase vapeur, leur échantillonnage doit donc être conforme aux normes NF EN 13205 et NF EN 481 concernant l'échantillonnage des particules et NF EN 1076 concernant l'échantillonnage des vapeurs (AFNOR 1993; AFNOR 2002b; AFNOR 2006; AFNOR 2010).

7.3.2 Méthodes d'analyse

7.3.2.1 Méthodes globales

Bien qu'une variété importante de techniques d'échantillonnage et de méthodes d'analyse soit disponible pour évaluer le bitume des expositions de fumées, la plupart d'entre elles ne sont pas spécifiques et la méthode « d'analyse » proposée est le plus souvent gravimétrique (particules totales ou fraction soluble dans le benzène). D'autres méthodes globales similaires sont basées sur la spectrophotométrie d'absorption IR des aérosols et vapeurs des fumées de bitume (Breuer and Engel 2011). Ces méthodes présentent des limites concernant l'évaluation de l'exposition des salariés aux fumées car elles sont très généralistes. Par ailleurs, la comparaison des résultats obtenus entre laboratoires n'est pas fiable.

Toutes ces méthodes utilisent des échantillonnages différents qui produisent des résultats non comparables.

L'harmonisation au niveau international est nécessaire pour obtenir des données d'exposition fiables.

7.3.2.2 Méthodes spécifiques

En raison de l'existence de nombreux isomères structuraux de HAP, les méthodes de séparation par chromatographie en phase gazeuse (GC) couplée à l'ionisation de flamme ou par chromatographie liquide haute performance (HPLC) avec des systèmes de détection en UV ou fluorescence sont généralement utilisées pour l'identification et la quantification des HAP. Différentes méthodes d'analyse ont été proposées : NIOSH 5506 en HPLC-UV/fluor (NIOSH 1994b), NIOSH 5515 en GC-FID (NIOSH 1994a), et la Méthode 5800 en HPLC-Fluo avec une phase d'extraction et de purification à l'hexane (NIOSH 1998b).

Ces méthodes utilisent des procédures de purification sommaires, ayant un pouvoir de séparation insuffisant (colonnes HPLC) ou ayant une faible sélectivité des détecteurs (FID), pour permettre une quantification fiable des HAP dans des matrices aussi complexes que les fumées de bitume. Dans tous les cas, la technique HPLC couplée à un détecteur de fluorescence n'est pas assez robuste pour la quantification des HAP. De même, le GC avec le détecteur FID n'est pas assez performant pour venir à bout des séparations. L'utilisation conjointe de l'HPLC comme technique de fractionnement est utile pour isoler la famille des HAP à partir de mélanges complexes et permet la quantification avec des détecteurs sélectifs après une séparation supplémentaire, par exemple, par GC couplée avec la MS (Vu-Duc, Huynh *et al.* 2007; Vu-Duc, Huynh *et al.* 1995). Il est urgent de développer des méthodes analytiques plus robustes pour quantifier de manière fiable les teneurs en HAP dans les mélanges de bitumes.

Une attention particulière est requise pour le naphthalène à cause de sa volatilité. Lors du prélèvement, la cartouche XAD-2 est préférable à la mousse de polyuréthane ou le charbon actif pour le captage du naphthalène (NIOSH 2003). Pour le dernier absorbant (charbon actif), la désorption par le solvant CS₂ n'est que partielle (50%). La même attention est à considérer lors des opérations de purification, une évaporation à sec du solvant d'extraction entraîne une perte presque totale de naphthalène. A titre d'exemple, le recouvrement de naphthalène est de 99% pour un volume final de toluène de 100 µl, de 88% pour 40 µl et de 10% à sec (Huynh and Vu Duc 1999).

Le développement de matériaux de référence (MRS)¹⁵ avec les valeurs certifiées pour les HAP dans les matrices environnementales complexes permet d'évaluer de nouvelles techniques analytiques (Schubert, Schantz *et al.* 2003; Vu-Duc, Huynh *et al.* 1995; Wise, Sander *et al.* 1993).

Des procédures de purification plus performantes (double extraction liquide-liquide au DMF/Cyclohexane suivie par des purifications par fractionnement sur colonne SiO₂ en chromatographie liquide) couplées à l'utilisation de la GC-MS ont été proposées pour surmonter les difficultés de la quantification des HAP dans le bitume et les émissions de bitume (Huynh, Vu Duc *et al.* 2007; Sauvain, Vu Duc *et al.* 2001; Vu-Duc, Huynh *et al.* 2007). Les HAP soufrés (HAPS) ont également été identifiés et quantifiés par de telles méthodes (Binet, Bonnet *et al.* 2002; Vu-Duc, Huynh *et al.* 2007)

L'analyse par chromatographie liquide multidimensionnelle séquencée et détection fluorimétrique est applicable aux fumées de bitume ; très rapide (temps de préparation et d'analyse inférieurs à 45 minutes) elle est cependant limitée à l'analyse du seul B[a]P (Champmartin, Simon *et al.* 2007).

7.4 Exploitation des données métrologiques issues de la littérature

7.4.1 Evaluation de l'exposition atmosphérique

7.4.1.1 HAP

Les deux stratégies d'analyse, globale et spécifique, apportent des informations incomplètes mais complémentaires pour l'évaluation de l'exposition totale aux fumées de bitumes. En effet, les méthodes globales, à priori plus simples à mettre en œuvre, déterminent une quantité globale de matière dont la comparaison aux limites d'exposition existantes est souvent impossible. Cependant, la quantité globale de matière dosée permet de donner un indice très utile pour l'appréciation des niveaux d'exposition et pour mettre en œuvre des méthodes spécifiques pour l'évaluation de l'exposition à des molécules dont les limites d'exposition existent. Le point charnière entre les méthodes globales et spécifiques est, au jour de la rédaction de ce rapport, indéterminé faute de recherches sur ce sujet.

La base de données de littérature *PubMed* a permis d'identifier des publications se rapportant exclusivement à l'Homme. Dans certaines études ainsi que dans un rapport du NIOSH concernant les effets sur la santé de l'exposition professionnelle au bitume, apparaissent les mesures des concentrations atmosphériques des HAP émis dans les fumées de bitume (NIOSH 2000). L'ensemble des valeurs rapportées dans les études de terrain sont recensées dans le Tableau 33 et les études les plus complètes sont décrites ci-dessous. L'ensemble des concentrations recensées proviennent de prélèvements individuels.

Dans une étude de Cavallo, Ursini *et al.* (2006), l'exposition aux HAP a été mesurée chez 19 ouvriers qui épandent le bitume sur les routes et chez 22 sujets travaillant dans le domaine administratif (groupe contrôle), durant trois jours de travail consécutifs. Les HAP sont mesurés dans l'air selon la méthode 5506 du NIOSH. Quatorze des 16 HAP listés par l'US EPA ont été mesurés : 5 HAP à 2 ou 3 cycles et 9 HAP de 4 à 6 cycles.

Les concentrations sont exprimées par la moyenne (arithmétique) de chaque HAP et par la somme des moyennes des 5 HAP gazeux ou des 9 HAP particuliers. Chez les exposés aux fumées de bitume, les HAP à 2 ou 3 cycles (phase gazeuse) sont majoritaires : somme des moyennes égale à 2,693 µg.m⁻³ (dont plus de 80% pour la somme phénanthrène +

¹⁵ Matériaux naturels dont les teneurs en HAP sont certifiées.

naphtalène sur un total d'environ $2,8 \mu\text{g.m}^{-3}$). La plupart des 5-6 cycles sont à une concentration atmosphérique très faible, inférieure à $0,009 \mu\text{g.m}^{-3}$ ($0,005 \mu\text{g.m}^{-3}$ pour le B[a]P).

Burstyn, Randem *et al.* (2002) ont mesuré les concentrations atmosphériques de 19 HAP dont les 16 recommandés par l'US EPA chez des ouvriers norvégiens du bitume, sur 320 échantillons lors de travaux divers de répandage ou en centrales. Les HAP sont mesurés selon la méthode 5515 du NIOSH, légèrement modifiée (la résine est remplacée par un gel de silice). Comme dans l'étude précédemment décrite, les concentrations sont exprimées par la moyenne (arithmétique) de chaque HAP.

Les composés majoritaires (environ 76 %) sont le naphtalène et ses 2 dérivés mono-méthylés. Si l'on ne considère que les HAP de la liste EPA, le naphtalène est le plus abondant (5330 ng.m^{-3}).

Concernant les HAP de 4 à 6 cycles de la fraction particulaire, ils ne sont pas détectables dans 60 % (fluoranthène) à 97 % (BghiP) des échantillons.

Une étude de Campo, Buratti *et al.* (2006) a été menée en zones urbaine et rurale sur 100 ouvriers du bitume et 47 travailleurs non exposés aux fumées de bitume (groupe témoin). Les concentrations atmosphériques de 15 HAP sur les 16 recommandés par l'US EPA sont mesurées pendant le poste de travail : cinq HAP composés de 2 ou 3 cycles et dix HAP composés de 4 à 6 cycles. Les HAP sont mesurés selon la méthode du NIOSH 5506. Les concentrations sont exprimées par la médiane de chaque HAP.

Chez les ouvriers du bitume, les HAP les plus représentatifs sont le naphtalène, le phénanthrène, le fluorène et le pyrène. Parmi eux, le naphtalène est le plus abondant (médiane égale à 426 ng.m^{-3}) soit 70% du total des 15 HAP (somme des médianes 607 ng.m^{-3}). Les composés à 5-6 cycles sont à des niveaux très faibles : de l'ordre du ng.m^{-3} . En fait, ces valeurs sont quasiment environnementales, à peine supérieures à celles du groupe témoin (somme des médianes à 405 ng.m^{-3}) voire inférieures pour les 5-6 cycles.

**Tableau 33 : Concentration (en ng.m⁻³) des HAP dans les échantillons prélevés au cours des différentes études.
(LD : limite de détection)**

	Moyenne arithmétique	Moyenne géométrique	Médiane	[min – max]	Références
Naphtalène	6500	5400	5600		Hicks (1995)
	5330			[<LD – 152150]	Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002)
	2959				Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002)
	3200	2300		[280 – 13000]	Väänänen, Hämeilä <i>et al.</i> (2003)
	897		426	[2 – 2319]	Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
	2033			[311 – 3286]	Cavallo, Ursini <i>et al.</i> (2006)
	489		426	[44 – 13000]	Väänänen, Elovaara <i>et al.</i> (2006)
Acénaphthylène	2000	690	270		Hicks (1995)
	120			[<LD – 8530]	Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002)
Acénaphène	2000	1300	650		Hicks (1995)
	180			[<LD – 14340]	Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002)
	224		9	[<2 – 581]	Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002)
	83			[28 – 321]	Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
Fluorène	580	510	440		Hicks (1995)
	490			[<LD – 42700]	Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002)
	268		33,5	[0,2 – 284,6]	Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002)
	180			[36 – 853]	Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
Phénanthrène	550	430	480		Hicks (1995)
	1090			[<LD – 99680]	Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002)
	236				Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002)
	3200	2000		[200 – 27000]	Väänänen, Hämeilä <i>et al.</i> (2003)
			51,8	[<1,4 – 1096]	Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)

	1 330 1493			[5 – 9288] [15 – 27000]	Cavallo, Ursini <i>et al.</i> (2006) Väänänen, Elovaara <i>et al.</i> (2006)
Anthracène	52 1420 67 37	47	28 0,7	[<LD – 56180] [<0,4 – 97,7] [3 – 247]	Hicks (1995) Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002) Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006) Cavallo, Ursini <i>et al.</i> (2006)
Fluoranthène	260 690 70 164	240	240 2,8	[<LD – 60280] [<0,4 – 147,1] [16 – 917]	Hicks (1995) Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002) Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006) Cavallo, Ursini <i>et al.</i> (2006)
Benzo(a)anthracène	290 < 10 19 0,74		0,10 0,10 < 0,08	[<LD – 55820] [<0,08 – 20,06] [3 – 136] [< 0,08 – 3,71]	Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002) Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006) Cavallo, Ursini <i>et al.</i> (2006) Cirla, Martinotti <i>et al.</i> (2007)
Pyrène	170 3,1 560 120 140 47 59 117	170 80 180	160 3,5 26,3	[1,6-4,2] [<LD – 28710] [10 – 1200] [< 8 – 14] [10 – 1700] [1,2 – 282,2] [3 – 452] [< 15 – 1200] <50 (LD)	Hicks (1995) Watts, Wallingford <i>et al.</i> (1998) Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002) Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Väänänen, Hämeilä <i>et al.</i> (2003) Brossard, Certin <i>et al.</i> (2003) McClean, Rinehart <i>et al.</i> (2004a) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006) Cavallo, Ursini <i>et al.</i> (2006) Väänänen, Elovaara <i>et al.</i> (2006) Levin, Rhen <i>et al.</i> (1995)
Benzo(a)pyrène	2,1 < 10		1	[0,9-4,4]	Watts, Wallingford <i>et al.</i> (1998) Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002)

			0,33	[<0,03 – 40,25] [< 10 – 220]	Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006) Väänänen, Elovaara <i>et al.</i> (2006)
	1,45		0,33	[< 0,03 – 3,47]	Cirla, Martinotti <i>et al.</i> (2007)
Dibenzo(a,h)anthracène	10		0,16	[<0,07 – 18,61]	Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
	0,51		< 0,07	[< 0,07 – 1,13]	Cirla, Martinotti <i>et al.</i> (2007)
Chrysène	130	130	110		Hicks (1995)
	111				Burstyn, Randem <i>et al.</i> (2002)
	30		0,11	[<0,08 – 9,83]	Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
	0,79		< 0,08	[< 0,08 – 1,64]	Cirla, Martinotti <i>et al.</i> (2007)
Benzo(b)fluoranthène	2,2		1,8	[1,6-3,1]	Watts, Wallingford <i>et al.</i> (1998)
	< 10		0,8	[<0,2 – 26,5]	Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
	1,6		0,8	[<0,2 – 5,2]	Cirla, Martinotti <i>et al.</i> (2007)
Benzo(k)fluoranthène	1,2		1,2	[0,7-1,6]	Watts, Wallingford <i>et al.</i> (1998)
	< 10		0,15	[<0,03 – 18,50]	Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002) Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
	0,73		0,14	[< 0,03 – 1,76]	Cirla, Martinotti <i>et al.</i> (2007)
Benzo(ghi)pérylène			1,1	[<0,3 – 13,9]	Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
Indéno(1,2,3-cd)pyrène			0,4	[<0,3 – 6,0]	Campo, Buratti <i>et al.</i> (2006)
	0,7		< 0,3	[< 0,3 – 2,5]	Cirla, Martinotti <i>et al.</i> (2007)

De toutes ces études, il ressort de manière récurrente que pour les HAP dont la mesure est recommandée par l'US EPA, ceux présentant 2 ou 3 cycles sont majoritaires par rapport aux HAP à 4, 5 ou 6 cycles, en accord avec les notions d'émissivité évoquées précédemment (Cf. Figure 36 et commentaire attaché).

Parmi les HAP légers, on trouve surtout le naphthalène (concentrations généralement supérieures au $\mu\text{g.m}^{-3}$), le phénanthrène, le fluorène et le pyrène, concentrés essentiellement au sein de la phase gazeuse (Campo, Buratti *et al.* 2006; Väänänen, Elovaara *et al.* 2006).

Les HAP de 5 à 6 cycles émis en phase particulaire, dont le B[a]P classé cancérigène par le CIRC, ont des niveaux moyens de quelques ng.m^{-3} .

Ainsi, pour toutes les mesures réalisées dans le cadre d'études de terrain, la concentration atmosphérique du B[a]P ne dépasse pas le dixième de la valeur recommandée par la CNAMTS de 150 ng.m^{-3} .

Cependant, si l'aspect minoritaire des HAP particuliers identifiés dans ces études est incontestable, des doutes subsistent quant à la fiabilité de leur valeur absolue et de l'interprétation quantitative qui en est faite, en particulier pour la détermination du rapport somme 2-3 cycles / 5-6 cycles. En effet, dans la plupart de ces études, beaucoup des 5-6 cycles sont sous les limites de détection (LOD) des méthodes analytiques utilisées, donc non véritablement quantifiés mais pris en LOD/2. Cette démarche, souvent pratiquée par les hygiénistes pour des raisons statistiques, aboutit dans certains cas à des résultats aberrants, notamment à l'estimation de quantités de HAP à 5-6 cycles sous phase vapeur comme égales voire supérieures à celles sous phase particulaire (Cavallo, Ursini *et al.* (2006), Burstyn, Randem *et al.* (2002)).

Les niveaux d'exposition atmosphérique des travailleurs de la construction routière au naphthalène, pyrène total et benzo(a)pyrène, mesurés individuellement sur différents types de chantiers dans le cadre de la CRD menée avec le CHU de Grenoble (Maître 2013) sont recensés dans les tableaux ci-dessous (Tableau 34, Tableau 35 et Tableau 36).

Tableau 34 : Niveaux d'exposition au naphthalène dans le secteur routier (ng.m^{-3}) (Maître 2013)

	Procédé de mise en œuvre	Nombre de prélèvements	Moyenne géométrique	Médiane	[min – max]
Naphthalène	Enrobé à chaud	26	2032	1969	[493 – 30166]
	Enrobé à chaud sous tunnel	17	1361	1772	[465 – 3164]
	Enrobé tiède sous tunnel	18	923	872	[584 – 1443]
	Enduit	15	3778	829	[59 – 330724]
	Pontage	4	268	250	[236 – 349]
	PATA (émulsion)	2	4494	4775	[3161 – 6388]
	Centrale de production d'enrobé	2	463	620	[208 – 1032]
	Total	84	1579	1043	[59 – 330724]

Tableau 35 : Niveaux d'exposition au pyrène total dans le secteur routier (ng.m⁻³) (Maître 2013)

	Procédé de mise en œuvre	Nombre de prélèvements	Moyenne géométrique	Médiane	[min – max]
Pyrène total	Enrobé à chaud	25	10	13	[0,8 – 154]
	Enrobé à chaud sous tunnel	17	8	4	[1,8 – 88]
	Enrobé tiède sous tunnel	18	5	6	[1,3 – 9]
	Enduit	15	0	2	[0 – 9]
	Pontage	4	6	5	[4 – 13]
	PATA (émulsion)	2	9	10	[8 – 11]
	Centrale de production d'enrobé	2	4	7	[1 – 12]
	Total	83	0	6	[0 – 154]

Tableau 36 : Niveaux d'exposition au benzo(a)pyrène dans le secteur routier (ng.m⁻³) (Maître 2013)

	Procédé de mise en œuvre	Nombre de prélèvements	Moyenne géométrique	Médiane	[min – max]
Benzo(a)pyrène	Enrobé à chaud	25	0	0,3	[0 – 12]
	Enrobé à chaud sous tunnel	17	0	0,7	[0 – 6]
	Enrobé tiède sous tunnel	18	0	0,2	[0 – 2]
	Enduit	15	0	0,2	[0 – 0,3]
	Pontage	4	0,3	0,3	[0,2 – 0,4]
	PATA (émulsion)	2	0	0	[0 – 0]
	Centrale de production d'enrobé	2	0,5	0,6	[0,3 – 1]
	Total	83	0	0,3	[0 – 12]

Les résultats des mesures effectuées dans le secteur routier confortent les conclusions selon lesquelles les niveaux d'exposition aux HAP sont globalement faibles, notamment pour le B[a]P dont les mesures étaient inférieures à la limite de détection dans 26% des échantillons prélevés.

Le goudron de houille et ses dérivés (brai et huiles) dont la cancérogénicité est reconnue depuis plusieurs décennies (voir IARC (1985); IARC (1987); République française (2009)) ont été très utilisés comme liants hydrocarbonés au cours des années 50, avec des tonnages proches de ceux des bitumes routiers : application sous forme d'enrobés ou d'enduits superficiels, purs ou modifiés polymères, anhydres ou en émulsion. Les liants les plus chargés en HAP cancérogènes ont progressivement été diminués avec la fin des "tout goudron" (zéro bitume) début des années 70, des bitumes-goudrons début des années 90, des anti-kérosènes au milieu des années 2000, sans qu'il y ait disparition totale car toujours présents comme huiles de fluxage du bitume à la fin des années 2000. Parmi ces dernières, les huiles légères contiennent environ 10 fois plus de HAP cancérogènes que le bitume. Cependant, du fait de leur faible proportion dans le liant (10%), le produit prêt à l'emploi est à peine plus chargé que le bitume lui-même (quelques mg/kg de B[a]P) avec pour conséquence des concentrations atmosphériques en B[a]P en deçà de la recommandation à 150 ng.m⁻³ de la CNAM et, *a fortiori*, des valeurs fréquemment observées jusqu'à la fin des années 80, notamment lors de la pose d'enduits superficiels à base de bitume-goudron : ces valeurs pouvaient dépasser le µg.m⁻³ pour le vannier, lorsqu'il était encore situé à l'arrière de la répandeuse.

Compte tenu des faibles niveaux d'HAP observés lors du répandage de ce type de produits et *a fortiori* de bitumes exempts de dérivés houillers, l'intérêt de continuer à pratiquer leur métrologie a été contesté par certains hygiénistes proposant alors de se reporter sur d'autres molécules présentes dans les liants et suspectées cancérogènes (naphtalène, HAP alkylés, hétérocycles soufrés ou azotés, *etc.*) voire de privilégier des méthodes plus globales. Si effectivement il peut paraître réducteur d'attribuer aux seuls HAP un éventuel potentiel cancérogène des fumées de bitume, leur évaluation reste cependant incontournable car quelques situations peuvent être encore génératrices d'émissions non négligeables d'HAP, notamment lors de l'utilisation encore possible de certains fluxants non recommandés, de travaux en milieux confinés mal ventilés et surtout au cours de réfections ou de recyclage d'anciennes chaussées (Breuer, Hahn *et al.* 2011; Hugener, Emmenegger *et al.* 2010). Cette pratique, qui consiste à réutiliser les anciens matériaux est en plein essor : de 25% en 2010, la quantité de produits recyclés devrait passer à 60% en 2012. La présence plus que probable de dérivés houillers, dont les plus chargés en HAP, dans ces matériaux justifie pleinement le maintien d'une "métrologie HAP", qu'elle soit effectuée dans le produit massif avant fraisage ou par prélèvements atmosphériques et urinaires lors de la réutilisation à chaud comme à froid, en centrale ou *in situ* (des informations complémentaires sont disponibles en Annexes 8 et 9).

7.4.1.2 Autres composés

Parmi les composés autres que les 16 HAP définis par l'US-EPA identifiés dans les produits bitumineux et leurs émissions, certains commencent à être étudiés (HAP soufrés, méthylés, COV, COSV, *etc.*). Une recherche bibliographique complémentaire sur la mesure de ces paramètres a été initiée par le GT. Néanmoins, à l'heure actuelle, peu d'études décrivent les niveaux de concentrations de ces composés en lien avec une exposition atmosphérique aux liants bitumineux et leurs émissions.

Les Tableaux suivants (Tableau 37 et Tableau 38) montrent respectivement les niveaux de COV et de HAPS dans les émissions de bitume correspondant à la moyenne de 6 déterminations ; la concentration d'hydrocarbures aliphatiques (C6-C17) est déterminée comme représentant 27,4% du poids des vapeurs recueillies.

Tableau 37 : Concentration de COV en mg.g⁻¹ de condensats de fumées de bitume recueillies lors de génération de fumées à 170 °C (Vu-Duc, Huynh *et al.* 2007)

	Poids moléculaire	moyenne (%CV)
Benzene	78	nd
3-Methylhexane	100	2,34 (38)
Toluene	91	1,21 (39)
Tetrachloroethylene	165,8	0,01 (40)
Ethylbenzene	90,5	1,46 (40)
m+p-Xylene	106	4,11 (40)
o-Xylene	106	3,11 (37)
Styrene	104	0,34 (23)
Isopropylbenzene	120	0,44 (36)
Propylbenzene	120	1,03 (36)
4-Ethyltoluene	120	2,13 (38)
2-Ethyltoluene	120	1,84 (34)
1,3,5-Trimethylbenzene	120	1,00 (35)
1,2,4-Trimethylbenzene	120	7,04 (34)
1,2,3-Trimethylbenzene	120	3,75 (31)
Phenol	94	2,23 (32)
1,2-Diethylbenzene	134	5,63 (32)
Other isomers diethylbenzene	134	5,10 (31)
Biphenyl	154	0,30 (11)
2-Methylbiphenyl	168	0,06 (13)

Tableau 38 : Concentrations de HAPS (en ppm ou µg/g) dans le bitume brut (origine Arabain) et dans les fumées générées à 170°C (µg/g de vapeurs recueillies) (Vu-Duc, Huynh *et al.* 2007)

	Nombre de cycles	Poids moléculaire	Bitume brut Moyenne (%CV)	Fumée de bitume à 170°C moyenne (%CV)
Benzo(b)thiophene	2	134	0,1 (17,2)	Non détecté
Dibenzothiophene	3	184	3,6 (15,3)	384,1 (9,9)
Benzo(b)naphtho(1,2-d)thiophene	4	234	1,3 (20,7)	15,0 (5,9)
Benzo(b)naphtho(2,1-d)thiophene	4	234	7,6 (6,2)	54,4 (6,6)

L'évaluation des expositions par inhalation peut également être estimée de manière plus globale via la mesure des poussières, particules, de la fraction soluble dans le benzène, des COV totaux, *etc.*

Les données en ce sens recensées dans la littérature seront en partie évoquées dans les analyses des études épidémiologiques développées dans le chapitre 8 « Effets sanitaires ».

7.4.2 Evaluation de l'exposition cutanée aux HAP

L'exposition des travailleurs aux HAP a lieu de façon assez évidente par inhalation, mais l'exposition par voie cutanée est aussi à prendre en compte. La revue de van Rooij and Jongeneelen (2007) rapporte une absorption cutanée pouvant être responsable de 50 % de la dose interne à partir de données chez des volontaires. Les auteurs indiquent la possibilité d'une surestimation de cette valeur liée aux conditions d'exposition.

En effet, les HAP présents dans les émissions de bitumes (fumées de bitumes et projection directe de gouttelettes) peuvent également retomber sur la peau des ouvriers entraînant une absorption cutanée parfois non négligeable par rapport à l'absorption pulmonaire. Les pratiques personnelles d'hygiène au travail représentent également un facteur important de la variabilité de l'exposition par voie cutanée notamment. En effet, les contacts avec les vêtements et les outils souillés peuvent se produire de façon prolongée et/ou fréquente, entraînant une absorption cutanée non négligeable par rapport à l'inhalation.

McClean, Osborn *et al.* (2012) ont cherché à identifier les principales voies d'absorption des produits bitumineux afin de proposer des stratégies de réduction de l'exposition aux HAP des travailleurs impliqués dans les travaux routiers. Leurs résultats ont suggéré une absorption cutanée significative des HAP atmosphériques. Les auteurs ont par conséquent proposé une stratégie de réduction des expositions basée sur le port de protection cutanée et la substitution du diesel par le biodiesel comme agent de nettoyage. En outre, la température d'application était positivement corrélée aux concentrations urinaires en métabolites hydroxylés de certains HAP : une augmentation de la température la plus basse d'application (121°C) à la plus élevée (154°C) a été associée à une augmentation de 72% en ΣOH-fluorène et du 1-OH-pyrène et une augmentation de 82% en ΣOH-phénanthrène. Par conséquent, afin de réduire les expositions aux HAP des ouvriers travaillant sur des chantiers routiers, McClean, Osborn *et al.* (2012) ont recommandé de réduire la température d'application des liants bitumineux, afin de réduire l'absorption par voie respiratoire et par voie cutanée, et le lavage des mains et des outils et équipements avec des solvants appropriés.

Enfin, il est important de souligner que l'absorption cutanée peut être favorisée par les produits de distillation du pétrole, ajoutés aux produits bitumineux, qui assèchent la peau, affaiblissant ainsi la barrière cutanée (NIOSH 2000).

Si l'évaluation des quantités inhalées peut être facilement mesurée, l'absorption par contact cutané reste beaucoup plus délicate à mesurer. Des méthodes de quantification de la matière organique déposée sur des surfaces de peau prédéfinies ont été développées dans la littérature (Boeniger, Neumeister *et al.* 2008; Burstyn, Ferrari *et al.* 2002; Clark, Burnett *et al.* 2011; Roy, Kriech *et al.* 2007). Des mesures de contamination surfacique (phénanthrène et pyrène) effectuées sur des prélèvements par patch disposés au niveau du poignet de travailleurs du bitume pendant toute la journée de travail montrent une bonne corrélation avec les concentrations urinaires mesurées en fin de poste pour les mêmes substances (Fustinoni, Campo *et al.* 2010).

Cependant ces méthodes d'évaluation de l'exposition cutanée par contact surfacique restent actuellement à l'état de recherche et nécessitent le développement de référentiels pour l'évaluation quantitative des niveaux d'exposition par cette voie. Par exemple, la revue de van Rooij and Jongeneelen (2007) précédemment citée rapporte des concentrations retrouvées sur la peau de travailleurs du bitume comprises entre 0,1 et 20 ng.cm⁻² (14 à 360 µg.j⁻¹), valeurs difficilement interprétables. Plusieurs éléments manquent pour l'interprétation des résultats :

- Les paramètres de transfert sur les patches en comparaison aux paramètres de transfert sur la peau ne sont pas connus ;
- L'estimation des doses absorbées (ou doses internes) n'est pas standardisée ;
- Les données toxicocinétiques concernant la perméation cutanée sont limitées (animal ou homme) ;
- Les paramètres de toxicocinétique (distribution, métabolisation y compris localement, élimination) ont très peu été mesurés suite à des expositions cutanées (animal, homme) ;
- Les effets des matrices sont peu connus (fumées, condensats, additifs).

Finalement, il est important de constater que l'ensemble des données mentionnées dans ce chapitre concernent l'exposition consécutive aux émissions de bitumes, qui se condensent sur la peau. L'exposition par contact direct avec la substance n'est généralement pas considérée, en raison du risque de brûlure. Le GT attire l'attention sur le manque de données concernant l'exposition cutanée résultant du contact avec un produit froid (ECF) ou utilisé à des températures peu élevées (40 à 60°C pour les émulsions). Dans ces cas, la présence de tensio-actifs dans le liant, même en faibles quantités, peut avoir un impact non-négligeable sur le transfert cutané, soit en raison de leur caractère irritant, soit en raison de la profonde modification des propriétés physico-chimiques du liant.

7.4.3 Autres voies d'exposition

Comme cité précédemment concernant l'exposition cutanée, les pratiques personnelles d'hygiène sur le lieu de travail constituent un facteur très important de la variabilité inter-individuelle de l'exposition. Outre le contact cutané par les vêtements et les outils souillés, le contact mains-bouche (ou gants bouche) peut être à l'origine d'une pénétration non-négligeable des agents chimiques dans l'organisme, par la voie orale. Des facteurs sont connus pour être responsables de l'ingestion de produits chimiques comme l'hygiène corporelle (ne pas se laver les mains en quittant le poste) et les habitudes de travail ou les facteurs organisationnels (manger et fumer proche de la source de pollution).

7.4.4 Indicateurs biologiques d'exposition

7.4.4.1 Introduction

La surveillance biologique et la métrologie atmosphérique sont deux approches complémentaires pour évaluer les niveaux d'exposition des professionnels à des substances. La surveillance biologique permet d'évaluer l'exposition d'un travailleur à un agent donné en intégrant toutes les voies de pénétration de l'agent chimique dans l'organisme (poumon, peau, tube digestif). Elle est plus particulièrement intéressante lorsque les substances ont un effet systémique et :

- lorsque d'autres voies que l'inhalation contribuent largement à l'absorption ;
- et/ou lorsque le polluant est cumulatif ;
- et/ou lorsque les conditions de travail (port de protections respiratoires, différences interindividuelles de la ventilation respiratoire...) déterminent d'importantes différences de dose interne entre individus non prises en compte par la métrologie atmosphérique.

7.4.4.2 HAP

Le rassemblement des données issues de la littérature scientifique a permis l'identification des indicateurs biologiques potentiels pour la surveillance biologique en milieu professionnel. La base de données PubMed a été consultée avec les mots-clés « polycyclic aromatic hydrocarbons », « occupational exposure » et « biomarkers ». Une première recherche bibliographique a permis d'identifier 12 indicateurs biologiques d'exposition (IBE). Les métabolites du naphthalène, du phénanthrène, du fluorène et du pyrène (HAP retrouvés en majorité dans la phase gazeuse) sont excrétés dans les urines (Tableau 39). Les métabolites du B[a]P sont éliminés essentiellement par la voie biliaire. Bien qu'ils soient excrétés en majorité dans les fèces, les méthodes actuellement développées sont très sensibles et permettent de détecter le 3-hydroxybenzo[a]pyrène (3OHB[a]P) dans les urines, ce qui en fait un indicateur biologique d'exposition potentiel.

Tableau 39 : Indicateurs biologiques d'exposition identifiés dans la littérature

Nom de l'indicateur biologique d'exposition (IBE)	Matrice de prélèvement
Pyrène inchangé et 1-hydroxypyrene	Urines
Phénanthrène inchangé et hydroxyphénanthrènes	Urines
Naphtalène inchangé et hydroxynaphtalènes	Urines
Fluorène inchangé et hydroxyfluorènes	Urines
3-hydroxybenzo[a]pyrène	Urines

Bien que le caractère cancérigène du pyrène soit faible au regard des autres HAP classiquement analysés, le 1-OHP est l'indicateur biologique d'exposition le plus rapporté dans la littérature pour l'étude des expositions aux HAP et le plus souvent mis en application sur le terrain. Facile à doser, il a beaucoup été étudié dans divers secteurs d'activité pour essayer d'en faire un traceur de l'exposition aux HAP. L'idée étant de relier les concentrations atmosphériques de pyrène (ou d'autres HAP) aux concentrations urinaires de 1-OHP afin de pouvoir utiliser cet IBE pour le contrôle des expositions en prenant en compte toutes les voies de pénétration. La variabilité du pyrène parmi les mélanges d'HAP émis en fonction du type de source limite cependant fortement l'usage du 1-OHP comme traceur des expositions aux HAP.

Le 3-OHB[a]P est un indicateur biologique d'exposition développé depuis quelques années (Barbeau, Maitre *et al.* 2011; Lafontaine, Champmartin *et al.* 2006; Lafontaine, Gendre *et al.* 2004; Simon, Lafontaine *et al.* 2000). Il paraît intéressant dans la mesure où il est le métabolite d'un HAP dont la cancérogénicité est connue, le B[a]P. Ainsi, la mesure du 3-OHB[a]P, pourrait être un IBE intéressant pour le contrôle des expositions au B[a]P et éventuellement à plusieurs HAP de structure et de propriétés physico-chimiques similaires. Le 3-OHB[a]P présente cependant l'inconvénient d'être principalement éliminé par les fèces, ce qui a longtemps limité son usage du fait de capacités analytiques insuffisantes.

L'analyse est effectuée par chromatographie liquide multidimensionnelle séquencée (commutation de colonnes). Après hydrolyse, l'échantillon urinaire est injecté dans le système composé de trois colonnes de purification et d'une colonne analytique. Le 3-OHB[a]P est quantifié par fluorimétrie. Cette méthode, appliquée dans divers secteurs industriels, a permis d'identifier une corrélation entre les concentrations urinaires de 3-OHB[a]P et les concentrations atmosphériques de B[a]P (Lafontaine, Gendre *et al.* 2004). Elle est suffisamment sensible pour apprécier de très faibles expositions aux HAP (quelques ng.m^{-3} de B[a]P) et s'approcher du bruit de fond environnemental dû aux habitudes alimentaires, au tabagisme, etc. (Lafontaine, Champmartin *et al.* 2006).

La surveillance biologique de l'exposition aux HAP par les métabolites du phénanthrène [1-, 2-, 9-, 3- et 4-hydroxyphénanthrène (OHPH)] est aussi rapportée dans la littérature comme pouvant être une alternative de traceur des expositions aux HAP (Raulf-Heimsoth, Angerer *et al.* 2008).

Quelques publications rapportent des données de terrain pour les IBE cités précédemment, dans lesquelles des concentrations urinaires de quelques métabolites d'HAP ont été mesurées.

Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants (Tableau 40, Tableau 41, Tableau 42, Tableau 43 et Tableau 44) :

Tableau 40 : Synthèse des concentrations urinaires de pyrène inchangé et 1-hydroxypyrene mesurées dans des études de terrain et en population générale

Pyrène inchangé								
Professionnels exposés			DP	FP	Population générale (adultes)			
Campo, Addario <i>et al.</i> (2006)	DS	Médiane	28	-	Non renseigné			
	MS	ng.L ⁻¹	28	54				
Campo, Fustinoni <i>et al.</i> (2007)	DS	Médiane	4	-				
	MS	ng.L ⁻¹	5	6				
1-hydroxypyrene								
Burgaz, Borm <i>et al.</i> (1992b)	FS	MA ng.g ⁻¹ créat	-	1 166			National Center for Environmental Health (2009)	MG ng.L ⁻¹ ng.g ⁻¹ créat
Burgaz, Borm <i>et al.</i> (1992a)	FS	MA ng.g ⁻¹ créat	-	1 177				
Levin, Rhen <i>et al.</i> (1995)	DS	Médiane ng.L ⁻¹	200	210	Médiane ng.L ⁻¹ ng.g ⁻¹ créat	83,8 73,5		
Burgaz, Erdem <i>et al.</i> (1998)	FS	MA ng.g ⁻¹ créat	-	1 504				
Karakaya, Yucesoy <i>et al.</i> (1999)	-	MA ng.g ⁻¹ créat	-	1 775				
Szaniszlo and Ungvary (2001)			-	1 133				
Heikkila, Riala <i>et al.</i> (2002)	-	MA ng.L ⁻¹	595	1 226				
Väänänen, Hämeilä <i>et al.</i> (2003)	-	MA ng.g ⁻¹ créat	457	699				

Données INRS	-	MA ng.g ⁻¹ créat	305	401	Maître (2013) (population témoin)		
McClellan, Rinehart et al. (2004b)	DS	MA	400	1 600			
	MS	ng.g ⁻¹ créat	1 000	2 000			
Karakaya, Ates <i>et al.</i>	FS	MA ng.g ⁻¹ créat	-	992 (NF : 733) (F : 1255)			
Cavallo, Ursini <i>et al.</i> (2006)	-	MA ng.g ⁻¹ créat	270	810		MG	
Marczynski, Raulf-Heimsoth <i>et al.</i> (2006)	MS	MA ng.g ⁻¹ créat	165	296		nmol.mol ⁻¹ créat	0,0417 0,0274 (NF) 0,0957 (F)
	DS		325	-		Médiane	
Buratti, Campo <i>et al.</i> (2007)	MS	MA ng.L ⁻¹	485	620		nmol.mol ⁻¹ créat	0,0414 0,0311 (NF) 0,1086 (F)
	DS	MG	375	-			
Sobus, McClellan <i>et al.</i> (2009)	MS		708	2 110			
	DS	MA	347	-			
Karaman et Pirim (2009)	FS	ng.g ⁻¹ créat	-	753			
	FS	MG nmol.mol ⁻¹ créat	-	0,1136 (NF : 0,0771) (F : 0,1771)			

DP : début de poste ; FP : fin de poste ; DS : début de semaine ; FS : fin de semaine ; MA : moyenne arithmétique ; MG : moyenne géométrique ; F : fumeurs ; NF : non-fumeurs

Tableau 41 : Synthèse des concentrations urinaires du phénanthrène inchangé et des phénanthrènes monohydroxylés mesurées dans des études de terrain et en population générale

Phénanthrène inchangé						
professionnels exposés		DP	FP	Population générale (adultes)		
Campo, Addario <i>et al.</i> (2006)	DS	Médiane	23	Non renseigné		
	MS	ng.L ⁻¹	31			48
Campo, Fustinoni <i>et al.</i> (2007)	DS	Médiane	22	-		
	MS	ng.L ⁻¹	25			50
1-hydroxyphénanthrène						
Non renseigné			National Center for Environmental Health (2009)		MG	157
					ng.L ⁻¹	
					ng.g ⁻¹ créat	151
					Médiane	
				ng.L ⁻¹	167	
				ng.g ⁻¹ créat	147	
2-hydroxyphénanthrène						
Non renseigné			National Center for Environmental Health (2009)		MG	61,5
					ng.L ⁻¹	
					ng.g ⁻¹ créat	58,7
					Médiane	
				ng.L ⁻¹	64,9	
				ng.g ⁻¹ créat	54,8	

3-hydroxyphénanthrène							
	DS		245	-		MG ng.L ⁻¹	114
Buratti, Campo <i>et al.</i> (2007)	MA				National Center for Environmental Health (2009)	ng.g ⁻¹ créat	109
	MS	ng.L ⁻¹	507	982		Médiane ng.L ⁻¹	118
						ng.g ⁻¹ créat	99,1
4- hydroxyphénanthrène							
Non renseigné					National Center for Environmental Health (2009)	MG ng.L ⁻¹	25,3
						ng.g ⁻¹ créat	24
						Médiane ng.L ⁻¹	25,8
						ng.g ⁻¹ créat	23,3
Somme des phénanthrènes monohydroxylés							
Marczynski, Raulf-Heimsoth <i>et al.</i> (2006)	MS	MA	850	1 556	Non renseigné		
		ng.g ⁻¹ créat					
Raulf-Heimsoth, Angerer <i>et al.</i> (2008)	MS	MA ng.g ⁻¹ créat	878	1 544			
Sobus, McClean <i>et al.</i> (2009)	DS	MA	1 640	-			
	MS	ng.L ⁻¹	2 400	7 930			

DP : début de poste ; FP : fin de poste ; DS : début de semaine ; FS : fin de semaine ; MA : moyenne arithmétique ; MG : moyenne géométrique ; F : fumeurs ; NF : non-fumeurs

Tableau 42 : Synthèse des concentrations urinaires du naphtalène inchangé et des naphtalènes monohydroxylés mesurées dans des études de terrain et en population générale

Naphtalène inchangé										
Professionnels exposés		DP	FP	Population générale (adultes)						
Campo, Addario <i>et al.</i> (2006)	DS	Médiane	53	-	Non renseigné					
	MS	ng.L ⁻¹	122	82						
Campo, Fustinoni <i>et al.</i> (2007)	DS	Médiane	69	-						
	MS	ng.L ⁻¹	90	117						
1-hydroxynaphtalène										
Non renseigné				National Center for Environmental Health (2009)				MG ng.L ⁻¹	3 020	
						ng.g ⁻¹ créat	2 900			
						Médiane ng.L ⁻¹	2 650			
						ng.g ⁻¹ créat	2 520			
2-hydroxynaphtalène										
Buratti, Campo <i>et al.</i> (2007)	DS		11 075	-	National Center for Environmental Health (2009)		MG ng.L ⁻¹	3 360		
	MS	MA	13 950	13 225			ng.g ⁻¹ créat	3 230		
		ng.L ⁻¹					Médiane ng.L ⁻¹	3 180		
							ng.g ⁻¹ créat	2 910		
Somme des naphtalènes monohydroxylés										
Sobus, McClean <i>et al.</i> (2009)	DS	MG	9 200	-	Non renseigné					
	MS	ng.L ⁻¹	10 500	17 600						

DP : début de poste ; FP : fin de poste ; DS : début de semaine ; FS : fin de semaine ; MA : moyenne arithmétique ; MG : moyenne géométrique ; F : fumeurs ; NF : non-fumeurs

Tableau 43 : Synthèse des concentrations urinaires du fluorène inchangé et des fluorènes monohydroxylés mesurées dans des études de terrain et en population générale

Fluorène inchangé							
Professionnels exposés			DP	FP	Population générale (adultes)		
Campo, Addario <i>et al.</i> (2006)	DS	Médiane	3	-	Non renseigné		
	MS	ng.L ⁻¹	<1	7			
Campo, Fustinoni <i>et al.</i> (2007)	DS	Médiane	6	-			
	MS	ng.L ⁻¹	6	6			
2-hydroxyfluorène							
Buratti, Campo <i>et al.</i> (2007)	DS		1 070	-		National Center for Environmental Health (2009)	MG ng.L ⁻¹
		MA ng.L ⁻¹			ng.g ⁻¹ créat		310
	MS		1 352	2 195	Médiane ng.L ⁻¹		290
					ng.g ⁻¹ créat	208	
3-hydroxyfluorène							
Non renseigné					National Center for Environmental Health (2009)	MG ng.L ⁻¹	134
						ng.g ⁻¹ créat	128
					Médiane ng.L ⁻¹	105	
					ng.g ⁻¹ créat	88,2	

9-hydroxyfluorène

Non renseigné		National Center for Environmental Health (2009)	MG	
			ng.L ⁻¹	277
			ng.g ⁻¹ créat	267
			Médiane	
			ng.L ⁻¹	279
			ng.g ⁻¹ créat	243

DP : début de poste ; FP : fin de poste ; DS : début de semaine ; FS : fin de semaine ; MA : moyenne arithmétique ; MG : moyenne géométrique ; F : fumeurs ; NF : non-fumeurs

Tableau 44 : Synthèse des concentrations urinaires de 3-hydroxybenzo[a]pyrène mesurées dans des études de terrain et en population générale

3-hydroxybenzo[a]pyrène

Professionnels exposés		DP	FP	Population générale (adultes)		
Données INRS	MA	0.056	0.080	Lafontaine, Champmartin <i>et al.</i> (2006)	Médiane ng.g ⁻¹ créat	(F) 0,054 (NF) 0,024
	ng.g ⁻¹ créat				Moyenne ng.g ⁻¹ créat	(F) 0,071 (NF) 0,033
Maître (2013)	FS	-	0,0108 0,0091 (NF) ; 0,0133 (F)	Maître (2013) (population témoin)	Médiane nmol.mol ⁻¹ créat	0,0143 (F) 0,0085 (NF)
					MG nmol.mol ⁻¹ créat	0,0149 (F) 0,0093 (NF)

DP : début de poste ; FP : fin de poste ; DS : début de semaine ; FS : fin de semaine ; MA : moyenne arithmétique ; MG : moyenne géométrique ; F : fumeurs ; NF : non-fumeurs

Les concentrations urinaires mesurées en milieu professionnel sont cohérentes avec les niveaux d'exposition déterminés précédemment. Les concentrations des métabolites du naphthalène sont les plus élevées par rapport aux autres métabolites. De façon plus générale, les concentrations urinaires des métabolites des HAP sous forme gazeuse sont logiquement beaucoup plus fortes que les concentrations mesurées pour le 3-OHB[a]P. Il n'existe aucune valeur limite recommandée pour les professionnels exposés. En revanche, en France, l'INRS propose pour le 3-OHB[a]P une valeur seuil de $0,35 \text{ nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ de créatinine ($0,83 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ de créatinine) pour un prélèvement urinaire effectué en début de poste du 2^{ème} jour d'exposition. Cette valeur correspond à une exposition journalière en B[a]P atmosphérique de $150 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$.

Parmi les valeurs citées dans le Tableau 40 et le Tableau 44, figurent les données obtenues lors d'une importante enquête menée en France au début des années 2000 par plusieurs services de Médecine du Travail, les CARSATs et l'INRS (Brossard, Certin *et al.* 2003). Ces données non publiées ont été transmises sur demande de l'Anses par l'INRS et sont mentionnées dans le rapport en tant que « Données INRS ».

Cette enquête couvrait des chantiers de tailles (routes et autoroutes, parkings, petites réfections...) et de techniques diverses (enrobés à chaud, enduits superficiels avec liants anhydres ou émulsionnés...) : au total, 19 chantiers avec 89 opérateurs représentatifs des différents postes de travail, soit 257 échantillons urinaires exploités pour le 1-OHPyrène (36 pour le 3-OHB[a]P) correspondant au début, à la fin et 3 h après la fin du poste de travail.

En général, les valeurs urinaires en 1-OHPyrène sont faibles, inférieures à $0,5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ créat, en accord avec les valeurs atmosphériques. On note cependant une augmentation significative en fin de poste et après (avec un maximum approchant $2 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ créat, supérieur au bruit de fond environnemental) pour 14 opérateurs dont 10 fumeurs et 4 non fumeurs, témoignant d'expositions non négligeables aux HAP légers. Ces valeurs sont surtout observées lors de conditions de travail défavorables (températures extérieures élevées, confinement). Pour 3 de ces non fumeurs, la donnée "fin de poste + 3 heures" très supérieure à celle de fin de poste, indique l'existence d'une exposition importante par voie cutanée.

Quant au 3-OHB[a]P, les concentrations correspondantes sont par contre très faibles, du niveau de la population générale, excepté pour un tireur râteau (fumeur) dont les valeurs restent cependant inférieures à la VLB (valeur limite biologique) proposée par l'INRS.

7.5 Exploitation des données métrologiques issues des bases de données

Dans ce chapitre sont recensés les niveaux d'exposition professionnelle aux fumées de bitume issus des bases de données métrologiques suivantes :

- La base de données COLCHIC, gérée par l'INRS et alimentée depuis 1986 par les résultats des mesures d'exposition effectuées par les huit Laboratoires interrégionaux de chimie des caisses régionales d'assurance maladie (CRAM)/caisses d'assurance retraite et de santé au travail (CARSAT) et les laboratoires spécialisés de l'INRS ;
- La base de données CIMAROUT (Centre d'Information sur les Matériaux Routiers), créée par l'USIRF en 2010, fait un état des lieux des connaissances scientifiques concernant les études d'exposition aux fumées de bitume réalisées par les entreprises en lien ou non avec les autorités sanitaires. Cette base est intégrée au site internet CIMAROUT. Elle retrace dix années d'études d'exposition des entreprises et constitue une traçabilité collective des expositions.

7.5.1 La base de données COLCHIC

7.5.1.1 Description des données

La base COLCHIC a pour objectif de centraliser les données de mesurages des laboratoires des CARSAT. Ces mesurages sont réalisés dans le cadre des actions de préventions des laboratoires inter-régionaux de chimie (LIC) des CRAM/CARSAT : suspicions d'exposition anormales pour objectiver des actions de prévention et suite à la mise en œuvre d'actions. Cette base n'a donc pas pour vocation d'évaluer l'exposition *stricto sensu* des salariés et ne peut être exhaustive. Néanmoins, une interprétation des données enregistrées peut être réalisée dans le but d'identifier les situations et les postes de travail les plus exposants.

Les résultats fournis dans ce rapport ont été obtenus à partir des mesures sur une période allant de 1986 à 2011. Ils concernent l'exposition professionnelle aux fumées de bitume.

Afin de couvrir les domaines d'activité énoncés dans la demande [travaux publics : fabrication et rénovation des routes, tunnels, ouvrages d'art (ponts, viaducs), stations-services et tarmacs d'aéroport) et secteurs du BTP : activités d'étanchéité], l'extraction et l'exploitation des données de la base COLCHIC ont été réalisées dans un premier temps pour les deux grandes familles de tâches suivantes (selon la nomenclature COLCHIC) :

- **B34** : Travaux routiers – Travaux d'étanchéité des ouvrages d'art et bassins, en retirant la tâche B3430 « Travaux de conduite et surveillance de la centrale d'enrobage », exclue du champ de la demande par décision de l'ensemble du GT en juillet 2011.
- **B32** : Travaux de second oeuvre et travaux d'entretiens des bâtiments en retirant 4 tâches, exclues du champ de la demande :
 - B3200 : Travaux de second oeuvre et travaux d'entretien des bâtiments ;
 - B3210 : Travaux de ravalement de façades (sauf application de peinture) ;
 - B3260 : Mise en oeuvre de matériaux ou produits isolants ;
 - B3299 : Autres travaux de second oeuvre ou d'entretien non codifiés par ailleurs.

Pour information, les concentrations de benzo[a]pyrène et de pyrène n'ont pas fait l'objet de mesures pour ces 4 dernières opérations.

Les données extraites concernent les mesures de concentrations des polluants suivants : Benzo[a]pyrène ; Pyrène ; Poussières totales ; Poussières inhalables ; Poussières alvéolaires ; La fraction soluble dans le dichlorométhane.

Pour la grande famille de tâche B34, travaux routiers – travaux d'étanchéité des ouvrages d'art et bassins, l'exploitation statistique a été réalisée dans le domaine des travaux routiers en prenant en compte les secteurs d'activité pertinents (stat) selon la « Nomenclature d'Activité Française » NAF suivante :

- 42.11Z : Construction de routes et autoroutes ;
- 43.99A : Travaux d'étanchéification ;
- 42.99Z : Construction d'autres ouvrages de génie civil n.c.a.

Pour ces secteurs d'activité, lorsque la base de données recense des concentrations pour l'un des polluants précédents, un focus est réalisé sur les diverses opérations ou « sous-tâches » s'effectuant entre la sortie de la centrale d'enrobage jusqu'à la pose du revêtement. Ces opérations ont la nomenclature COLCHIC suivante :

- B3400 : Travaux routiers – **Travaux d'étanchéité** des ouvrages d'arts et bassins ;
- B3410 : Construction de routes – **Utilisation d'enrobés** – Travaux d'étanchéité des bassins ;
- B3420 : Réfection des routes – **Utilisation d'enduits superficiels**.

Pour la grande famille de tâche B32, travaux de second oeuvre et travaux d'entretiens des bâtiments, l'exploitation statistique a été réalisée à partir du code « NAF » suivant :

- 43.99A : Travaux d'étanchéification.

Les autres secteurs d'activité n'ayant pas de rapport avec les travaux d'étanchéité dans le secteur du bâtiment.

Le Tableau 45 ci-dessous récapitule l'ensemble des secteurs d'activité et sous-tâches exploitées par grande famille de tâche.

Tableau 45 : Tableau récapitulatif des données exploitées

Grandes familles de tâches	Secteurs d'activité NAF	Sous-Tâches	Exploitation
B34 Travaux routiers – Travaux d'étanchéité des ouvrages d'art et bassins	42.11Z Construction de routes et autoroutes	B3400 Etanchéité	Non
		B3410 Route / Enrobés	Oui
		B3420 Enduits	Oui
	43.99A Travaux d'étanchéification	B3400 Etanchéité	Non
		B3410 Route / Enrobés	Non
		42.99Z Construction d'autres ouvrages de génie civil	B3420 Enduits
B32 Travaux de second œuvre et travaux d'entretiens des bâtiments	43.99A	-	Non

7.5.1.2 Résultats

Le traitement des résultats d'extraction de la base de données suit les règles suivantes :

- Nombre de données < 10 : la moyenne est donnée à titre d'information.
- Les valeurs suivent une loi normale : la moyenne arithmétique est exploitée.
- Les valeurs ne suivent pas une loi normale : la moyenne géométrique est exploitée.

Lorsqu'une valeur enregistrée est inférieure à la limite de détection déclarée, la valeur est recalculée comme étant égale à la moitié de la limite de détection. Cette démarche, souvent pratiquée par les hygiénistes pour des raisons statistiques, aboutit dans certains cas à des

résultats aberrants, notamment à l'estimation de quantités de HAP à 5-6 cycles sous phase vapeur comme égales voire supérieures à celles sous phase particulaire.

Par ailleurs, les résultats ont été scindés systématiquement en deux groupes avec les prélèvements ayant eu lieu de 1986 à 2000 et les prélèvements ayant eu lieu de 2001 jusqu'en 2011. Ces deux périodes sont différentes en termes de technique analytiques mais aussi en termes de nombres de prélèvements réalisés. En effet, une campagne de mesure importante a été réalisée en 2001 par la CARSAT des Pays de la Loire.

Les résultats des extractions réalisées sur les grandes familles de tâches B32 (Travaux publics) et B34 (Bâtiment et travaux publics) sont détaillés en Annexe 10.

7.5.1.3 Conclusions – Tâches B34 / B32

Les résultats de ces extractions font apparaître une carence en données d'exposition, toutes grandes familles de tâches confondues.

En effet, de 1986 à 2000, c'est-à-dire sur une période de 14 ans, 87 prélèvements ont été effectués pour le B[a]P contre 7 pour le Pyrène, 135 prélèvements pour les poussières inhalables et 2 prélèvements pour la Fraction Soluble dans le dichlorométhane (CH_2Cl_2).

Concernant la période de 2001 à 2011 (10 ans), les données ne sont pas beaucoup plus complètes. Ont été recensés sur cette période 165 prélèvements pour le B[a]P contre 107 prélèvements pour le Pyrène, 136 prélèvements de poussières inhalables et 110 prélèvements pour analyse de la Fraction Soluble dans le CH_2Cl_2 .

Les nombres de prélèvements sont insuffisants pour permettre la réalisation d'une évaluation quantitative de l'exposition que ce soit par tâches, secteurs d'activité, familles de tâche et totalement impossible par poste.

L'exploitation des données de cette base COLCHIC sera donc uniquement qualitative. Le Tableau 46 présente la synthèse des résultats pour le B[a]P, la fraction soluble dans le dichlorométhane, le pyrène et les poussières inhalables avant 2000 et après 2001 pour les deux familles de tâches B32 et B34.

Tableau 46 : Synthèse des résultats d'extraction de la base de données COLCHIC

		BaP (ng.m^{-3})		Fraction soluble CH_2Cl_2 (mg.m^{-3})		Pyrène (ng.m^{-3})		Poussières Inhalables (mg.m^{-3})	
		1986 -2000	2001 - 2011	1986 -2000	2001 - 2011	1986 -2000	2001 - 2011	1986 -2000	2001 - 2011
Famille de tâches B34	Nombre de prélèvements	69	145	2	97	7	99	85	49
	Moyenne (arithmétique ¹ / géométrique ²)	3.3 ²	3.7 ¹	/	0.2 ²	21.7 ¹	10.5 ²	0.7 ²	0.5 ²
	étendue (min - max)	0.2 - 740	0.1 - 77.4	/	0.01 - 1.6	8.0 - 49.0	0.6 - 725	0.01 - 63.8	0.01 - 3.0
Famille de tâches B32	Nombre de prélèvements	18	20	/	13	/	8	50	87
	Moyenne (arithmétique ¹ / géométrique ²)	2.9 ²	4.4 ¹	/	0.2 ¹	/	24.23 ¹	1.53 ²	3.3 ²
	étendue (min - max)	1.0 - 360	0.05 - 30.9	/	0.1 - 0.9	/	1.3 - 64.0	<0.01 - 96.7	0.1 - 54.8

D'après le Tableau 46 ci-dessus, les concentrations moyennes en B[a]P sont pour les deux périodes et pour les deux familles de tâches considérées inférieures à 5 ng.m^{-3} et donc très inférieures à la valeur limite d'exposition de 150 ng.m^{-3} . Les maxima observés sont beaucoup plus faibles d'un facteur dix environ pour la période de 2001 à 2011 par rapport à la période 1986 – 2000.

L'évolution des concentrations moyennes en Pyrène n'est pas interprétable dans la mesure où aucun prélèvement n'a été réalisé pour la famille de tâches B32 pendant la période 1986 – 2000. Les concentrations moyennes sont dans tous les cas inférieures à 25 ng.m^{-3} .

Concernant les concentrations moyennes en fraction soluble dans le dichlorométhane, les valeurs pour la période 1986 – 2000 sont trop peu nombreuses pour établir une moyenne interprétable. Pour la période 2001 – 2011, les concentrations moyennes sont identiques et égales à $0,22 \text{ mg.m}^{-3}$.

Enfin, les concentrations moyennes en poussières inhalables évoluent peu pour la famille de tâches B34 sur les deux périodes. Une diminution du maximum de 63.80 à 2.97 est à noter. Pour la famille de tâches B32, la concentration moyenne augmente de 1,53 à 3,30 mg.m^{-3} tout en diminuant la valeur maximale de 96,70 à 54,79 mg.m^{-3} . Les valeurs moyennes sont dans tous les cas inférieures à la valeur limite d'exposition de 5 mg.m^{-3} .

7.5.2 La base de données CIMAROUT

L'USIRF a mis en place depuis octobre 2010 une base de données qui répond au besoin de rassembler et diffuser un état des connaissances actuelles en matière de santé sur les matériaux de l'industrie routière : CIMAROUT. Cette base de données, mise à disposition de l'Anses, présente 2 « banques » d'informations :

- Un regroupement des études scientifiques, toxicologiques ou épidémiologiques publiées en France et à l'étranger concernant le bitume et les produits bitumineux ;
- Les résultats des études d'exposition effectuées sur les chantiers d'application des produits bitumineux.

Ces études sont complétées par une documentation concernant les agents chimiques constitutifs des produits mis en œuvre par les entreprises et les publications de l'ensemble des partenaires. CIMAROUT ne concerne actuellement que les produits bitumineux mais devrait rapidement être complétée par les informations de l'ensemble des matériaux que l'industrie routière utilise, y compris les liants hydrauliques, les granulats, etc.

Sur la demande de l'Anses, l'USIRF a réalisé une extraction des données issues de cette base concernant les paramètres usuellement mesurés dans le cadre des suivis professionnels (concentrations atmosphériques des HAP dont B[a]P, pyrène et naphthalène ; poussières totales ; poussières inhalables ; fraction soluble dans le dichlorométhane, etc.).

Une distinction a été faite pour chaque paramètre, entre d'une part, les données issues des CARSAT et de la médecine du travail et d'autre part, celles issues des entreprises. Par ailleurs, afin d'assurer une homogénéité avec les données recensées dans COLCHIC, lorsqu'une valeur est inférieure à la limite de détection, la valeur retenue est calculée en divisant par 2 la limite de détection.

Parmi les données biométriques recensées, aucune précision n'est donnée quant au moment où les analyses ont été faites ou concernant le tabagisme des salariés. La base CIMAROUT présente l'avantage par rapport à la base de données COLCHIC d'avoir une description des tâches beaucoup plus précise. Ce point est également un inconvénient puisque de ce fait, le nombre de données recensées par poste est parfois très faible (1 ou 2 données par poste) et donc non statistiquement interprétable. L'exploitation des données de cette base a été, de la même manière que pour la base COLCHIC, uniquement qualitative.

L'analyse globale des données extraites de la base CIMAROUT confirme les tendances relevées d'après l'étude de la base COLCHIC. Le détail de ces données est présenté en Annexe 11.

7.6 Caractérisation des expositions potentielles – Approche comparative

Afin de réaliser une comparaison de l'exposition des salariés aux différents postes de travail identifiés sur un chantier, le GT s'est attaché à recenser les paramètres qui semblaient être les plus influents, s'appuyant sur les informations disponibles.

A l'issue de ces investigations, les différents procédés de mise en œuvre des produits bitumineux, les postes de travail rapportés pour chaque pratique ainsi que la nature des liants classiquement utilisés ont été regroupés dans un tableau (Tableau 47 ci-dessous).

Il est à noter que cette évaluation empirique à visée indicative s'appuie sur le jugement d'experts. Elle est fondée sur des hypothèses fortes et vise à comparer les postes de travail sans préjuger des niveaux d'exposition réels, mais en cherchant à identifier des expositions potentielles.

Pour construire ce tableau, le GT a retenu 4 paramètres sur lesquels il est possible de se positionner.

Le premier paramètre identifié est la **distance du travailleur par rapport à la source des émissions** bitumineuses (notée de 1 à 5 ; plus la note est élevée, plus cela signifie que le salarié travaille près de la source). 3 plages de distances ont ainsi été choisies < 3 mètres, de 3 à 15 mètres et >15 mètres. De manière logique, plus le salarié travaille près de la source d'émissions de fumées, plus il serait exposé à une quantité importante d'émissions.

Le second paramètre retenu est la **température d'application** des produits (notée de 1 à 5). 5 zones de températures correspondantes aux diverses techniques ont été identifiées ; de 0 à 40°C, de 40 à 100°C, de 100 à 140°C, de 140 à 180°C et > 180°C. Les émissions étant fortement liées à la température du bitume, plus la température d'application est élevée, plus les émissions et donc l'exposition du salarié pourraient s'avérer importantes.

Le troisième paramètre est le **débit respiratoire** ou **débit ventilatoire** de travail (noté de 1 à 3 ; f (faible), m (moyen), F (Fort)). En effet, la pénétration par voie respiratoire des substances potentiellement toxiques émises à partir des produits bitumineux est liée non seulement à leur concentration dans l'air ambiant, mais également à la quantité d'air inhalé par le travailleur. En prenant comme référence les débits ventilatoires moyens en litre par minute (L/min) calculés par l'INRS d'après les niveaux d'activités physiques décrits par la norme ISO/DIS 8996, le GT propose d'utiliser comme bornes les valeurs de débits respiratoires suivantes : f < ou = 18 L/min, 18 L/min < m < 36 L/min et F > ou = 36 L/min.

Le quatrième paramètre identifié est la **durée-fréquence d'exposition potentielle** des travailleurs (notée de 1 à 3 ; f (faible), m (moyen), F (Fort)). Si ce dernier paramètre conditionne *a priori* le niveau d'exposition des travailleurs, il est néanmoins le plus délicat à évaluer. Les 3 niveaux retenus par le GT correspondent à une exposition approximative de 6 h/jour, 5 jours/semaine, < 3 mois/an pour f, 6 mois/an pour m et 10 mois/an pour F.

D'autres critères non recensés dans ce tableau ont une influence sur l'exposition des travailleurs mais présentent une importante variabilité et sont donc difficilement appréciables :

- La nature et les quantités de substances utilisées ;
- Les technologies mises en œuvre ;
- Les paramètres physiques de génération des émissions (viscosité, agitation, surface développée, renouvellement de l'atmosphère, malaxage, entraînement par la vapeur d'eau...) ;
- Les conditions météorologiques (vitesse du vent, hygrométrie, etc.)
- etc.

La subdivision du tableau par grands types de procédés (enrobés-enduits-asphalte-étanchéité-petits travaux) permet néanmoins d'appréhender de manière globale ces paramètres.

Tableau 47 : Approche comparative des postes de travail rapportés par grands types de procédés de mise en œuvre des produits bitumineux, suivant la nature des liants classiquement utilisés

Procédé	poste	liant	distance	/ t° application	débit respiratoire	durée fréquence	total
			A				
ESU	conducteur répandeuse	anhydre	3	4	1	2	10
	"	émulsion	3	2	1	2	8
	vannier/lancier	anhydre	5	4	2	2	13
	"	émulsion	5	2	2	2	11
	conducteur gravilloneuse	anhydre	3	4	1	2	10
	"	émulsion	3	2	1	2	8
	gravillonneur	anhydre	3	4	2	2	11
	"	émulsion	3	2	2	2	9
	suieteur/tireur	anhydre	4	4	3	2	13
	"	émulsion	4	2	3	2	11
	conducteur compacteur	anhydre	1	4	1	2	8
	"	émulsion	1	2	1	2	6
	chef d'équipe	anhydre	2	4	2	2	10
	"	émulsion	2	2	2	2	8
enrobé	conducteur camion enrobé	semi tiède	3	2	1	1	7
	"	tiède	3	3	1	1	8
	"	chaud	3	4	1	3	11
	conducteur répandeuse	émulsion	3	2	1	3	9
	conducteur finisseur	semi tiède	5	2	1	1	9
	"	tiède	5	3	1	1	10
	"	chaud	5	4	1	3	13
	régleur	ECF	4	1	2	2	9
	"	semi tiède	4	2	2	1	9
	"	tiède	4	3	2	1	10
	"	chaud	4	4	2	3	13
	tireur	ECF	4	1	3	2	10
	"	semi tiède	4	2	3	1	10
	"	tiède	4	3	3	1	11

	"	chaud	4	4	3	3	14
	conducteur compacteur	ECF	1	1	1	2	5
	"	semi tiède	1	2	1	1	5
	"	tiède	1	3	1	1	6
	"	chaud	1	4	1	3	9
	conducteur traineau	ECF	3	1	1	2	7
	chef d'équipe	ECF	2	1	2	2	7
	"	semi tiède	2	2	2	1	7
	"	tiède	2	3	2	1	8
	"	chaud	2	4	3	3	12
asphaltage	conducteur pétrin	chaud	3	5	1	3	12
	"	BT	3	3	3	3	12
	aide asphaltteur	chaud	5	5	3	3	16
	"	BT	5	3	3	3	14
	asphaltteur	chaud	5	5	3	3	16
	"	BT	5	3	3	3	14
	régleur finisseur	chaud	4	5	2	2	13
	"	BT	4	3	2	2	11
	chef d'équipe	chaud	2	5	2	3	12
"	BT	2	3	2	3	10	
réfection petits chantiers	lancier PAT	émulsion	5	2	2	2	11
	pelleteur	émulsion	4	2	3	2	11
	ratisseur	émulsion	4	2	3	2	11
	conducteur PATA	émulsion	3	2	1	2	8
	opérateur arrière PATA	émulsion	5	2	2	2	11
	compacteur	émulsion	1	2	1	2	6
	brouetteur enrobé manuel	chaud	5	4	3	2	14
	ratisseur enrobé manuel	chaud	5	4	3	2	14
	compacteur	chaud	1	4	1	2	8
	réparateur nid de poule	enrobé froid	5	1	2	1	9
	"	grave émulsion	5	2	2	1	10
	"	enrobé chaud	5	4	2	1	12
	préparateur fissure		5	5	2	1	13
	ponteur		5	4	2	1	12
étanchéité	aide étancheur	bitume fondu	5	5	3	2	15
	étancheur	bitume fondu	5	5	3	2	15
	"	soudure chalumeau	5	3	2	2	12

Après estimation pour chaque colonne des critères adaptés à chaque situation de travail, une notation a été attribuée à chacun des paramètres, en considérant tous les paramètres d'égale importance et en prenant pour hypothèse le fait que les postes ne soient pas protégés, c'est-à-dire en excluant le port d'EPI souillés ou non, le travail en cabine ou la présence de systèmes de captage des émissions.

Une note globale (ABCD), somme des notes attribuées aux 4 paramètres, a finalement été calculée pour chacune des situations de travail identifiées.

Au final, les scores les plus élevés font ressortir les postes suspectés au préalable par le GT comme pouvant être plus exposants par rapport aux autres :

- Pour les travailleurs de l'application des enduits superficiels d'usure (ESU), les postes de vannier/lancier et de suiveur/tireur ressortent comme *a priori* les plus exposés, notamment dans cas de l'utilisation de liants anhydres dont les températures de mise en œuvre sont supérieures à celles des émulsions.

Lors des opérations de mise en œuvre des enduits superficiels à chaud, le gravillonneur, qui règle l'inclinaison de la benne verseuse de granulats, et l'opérateur lance, chargé d'appliquer l'enduit à l'aide d'une lance manuelle aux endroits difficilement accessibles pour la répandeuse et qui intervient également lors d'opérations de Point à Temps, seraient les postes les plus exposés.

Le réglage du débit des vannes depuis la plate-forme arrière de la répandeuse, auparavant effectué par le vannier (ou rampiste), représentait le poste de travail de loin le plus exposé aux projections et émissions de liant, de par notamment sa position, à l'aplomb des buses de diffusion. Le poste de vannier a disparu suite au transfert des commandes des vannes au poste de conduite de la répandeuse.

- Pour les travailleurs de la pose d'enrobés, la manipulation d'enrobés à chaud pour les postes de conducteur de finisseur, tireur au râteau et régleur apparaissent comme étant *a priori* les activités les plus exposantes. Mis en œuvre à des températures d'environ 150 °C et plus, les enrobés à chaud génèrent une quantité importante d'émissions.

Le conducteur du finisseur et le régleur exercent leur activité sur ou à proximité du finisseur et seraient donc particulièrement exposés, notamment au niveau de la trémie qui reçoit l'enrobé à l'avant du camion.

Les tireurs au râteau évoluant à proximité du finisseur seraient exposés aux émissions de l'enrobé fraîchement déposé.

Certains équipements des machines tels les cabines ventilées d'isolation du conducteur ou encore la mise en place de systèmes intégrés de captage des fumées permettent de diminuer les expositions au poste de conducteur de finisseur.

- Parmi les applicateurs de l'asphalte coulé, les postes d'aide asphalteur, d'asphalteur et de régleur finisseur ressortent comme *a priori* les plus exposés, quelle que soit la nature du liant mis en œuvre, principalement en raison des températures élevées d'application qui génèrent une production importante de fumées associée au fait que ces travailleurs sont très proches de la source des émissions.

Dans l'organisation du travail, les porteurs de seaux apportent l'asphalte du camion porteur jusqu'à la surface d'application. Suivant la taille des chantiers, l'approvisionnement de l'asphalte peut-être manuel (95% - via des seaux ou brouettes) ou mécanisé (5% - par dumpers ou staccos). L'applicateur, accroupi au sol, étale l'asphalte chaud, en principe à des températures inférieures à 200°C depuis fin 2010, à l'aide d'une palette en bois. Dans le cas de chantiers mécanisés, l'asphalte sera appliqué à l'aide d'un finisseur spécifique, un régleur placé à l'arrière du finisseur ou à proximité, est alors chargé d'assurer la bonne épaisseur et

l'homogénéité de l'asphalte. Il s'agit des 3 postes *a priori* les plus exposants, en particulier l'applicateur.

- Pour les travailleurs de l'étanchéité, les postes d'étancheur et d'aide étancheur utilisant la méthode de collage au bitume oxydé fondu représentent *a priori* les postes les plus exposants.

Le collage au bitume oxydé fondu implique le chauffage et la fluidification de pains de bitume solide, dans un fondoir à des températures variant de 190°C à 250°C. Les principales expositions aux fumées ont lieu au cours de l'ouverture du fondoir, du remplissage et du transport manuel des récipients ainsi que lors du répandage du bitume. Particulièrement exposante, cette pratique est aujourd'hui en voie de disparition. En principe, depuis février 2012, les fabricants français ne devraient plus mettre à disposition des étancheurs des pains de bitume oxydé.

- Concernant les travailleurs affiliés aux travaux de petit entretien ou de réparation, le brouetteur et le ratisseur d'enrobés à chaud ainsi que le préparateur de fissures sont les postes qui sembleraient être les plus exposants.

Pour réaliser des travaux de réparation, bouchage de nids de poule, pontage de fissures, *etc*, les mêmes produits et pratiques utilisés pour la pose d'enrobés, l'asphaltage et l'application d'ESU sont mis en œuvre. En revanche, compte tenu des surfaces d'interventions moindres, ces opérations sont effectuées manuellement ou à l'aide de matériel plus léger. Les travailleurs affectés à ces tâches manuelles, tels le brouetteur ou le ratisseur seraient donc plus exposés.

Dans le cadre du pontage manuel à chaud (170°C) d'une fissure, avant l'injection du produit de bouchage (potentiellement un bitume modifié élastomère), le préparateur de fissure assèche cette dernière par soufflage d'air chaud à l'aide d'une lance thermo pneumatique (400°C).

Pour réparer les nids de poules, une grande diversité de matériaux (sont privilégiés les matériaux localement disponibles) et de techniques peuvent être utilisés pour combler le trou formé dans la chaussée : enrobés à froid, graves-émulsions, enrobés à chaud.

Cette matrice, construite en se basant sur des données chiffrées, des expériences de terrain et de nombreuses hypothèses, est par définition imprécise et ne peut avoir qu'une valeur indicative. Néanmoins, elle présente l'intérêt de permettre une comparaison entre eux des différents postes de travail identifiés au sein d'un même procédé.

8 Effets sanitaires

8.1 Etudes considérées

Le nombre de composés entrant dans la composition des bitumes et de leurs émissions est très important, la plupart n'ont pas été identifiés. Comme mentionné précédemment, il n'est pas possible d'établir un profil type de composition. Ainsi, il n'est pas pertinent, en l'état actuel des connaissances, de procéder à une caractérisation des effets sanitaires liés à une exposition à un tel mélange via une approche composé par composé. En conséquence, les experts du GT ont réalisé une évaluation des dangers liés à la manipulation des produits bitumineux via une analyse des données disponibles dans la littérature considérant la substance "bitume" dans sa globalité.

Les études expérimentales et épidémiologiques proviennent de la littérature scientifique publiée. Les publications ont été recensées jusqu'en mai 2012 à partir de la base de données *PubMed* avec les mots clés suivants :

- Bitumen ou asphalt ;
- Health ;
- Occupational pour les études épidémiologiques/de terrain.

Pour les études expérimentales les mots-clés utilisés en combinaisons variables : « bitumen » et/ou « asphalt » et/ou « fumes » et/ou « condensates » et/ou « aerosol », et/ou « in vitro » et/ou « in vivo », et/ou « rat », et/ou « mouse » ou « mice » et/ou « workers » et/ou « exposure » et/ou « lung » et/ou « skin » et/ou « adverse effect » et/ou « inflammation » et/ou « mutagenicity » et/ou « genotoxicity » et/ou « cancerogenicity » et/ou « cancer », etc ont également été utilisés en limitant la recherche aux études chez l'animal.

Les publications n'ayant pas été jugées pertinentes (effets étudiés sans données d'exposition, effets non-rapportés, confusion entre bitume et goudron et produits de valorisation à partir du bitume naturel notamment au Canada) ne sont pas décrites dans ce rapport de synthèse.

Plusieurs études épidémiologiques sont issues de la cohorte multi-centrique Européenne des salariés du bitume « Asphalt workers cohort », constituée à la fin des années 90. Elle inclut 7 pays européens (Allemagne, Danemark, Finlande, France, Norvège, Pays-Bas, Suède) et Israël réunissant un total d'environ 80 000 travailleurs. La première phase de l'étude a permis de suivre la mortalité de la cohorte. L'*American Journal of Industrial Medicine* a consacré un numéro spécial de sa collection aux résultats de ces analyses de manière globale et pays par pays (vol 43,n°1, 2003). La seconde phase de l'étude a permis le développement d'une étude cas témoins sur les cancers du poumon au sein de la cohorte. Le résultat a été publié sur l'ensemble des pays afin de garantir à l'analyse une puissance statistique satisfaisante (Olsson, Kromhout *et al.* 2010). Ces deux études ont donné lieu à de nombreuses publications centrées sur l'étude des effets cancérigènes (étudiées dans le cadre de l'expertise du CIRC) et non cancérigènes (Bergdahl, Toren *et al.* 2004; Burstyn, Boffetta *et al.* 2003a; Burstyn, Kromhout *et al.* 2005; Randem, Langard *et al.* 2003; Toren, Bergdahl *et al.* 2007) en lien avec une exposition aux émissions de bitume.

L'évaluation des expositions de la cohorte internationale européenne repose sur une matrice développée spécifiquement dans le cadre de cette étude. Cette matrice est appelée ROCEM pour Road Construction Worker's exposure matrix. Elle a été développée à partir de l'exploitation statistique d'une base de données de prélèvements atmosphériques sur des chantiers routiers (AWE : Asphalt workers exposure), des questionnaires de l'industrie routière et des avis d'experts.

La base de données AWE regroupe tous les résultats des prélèvements atmosphériques réalisés sur des ouvriers de chantiers routiers dans les différents pays, que l'entreprise

employant ces ouvriers soit incluse ou non dans la cohorte européenne. Environ 70% des données provenaient des pays nordiques (35% de Norvège). La majorité des prélèvements avaient été réalisés à la fin des années 70 et au cours de la période 1985-1997. Aucun prélèvement n'était postérieur à 1999. Les résultats fournis spécifiaient le pays, la date, le type de chantier, le métier du porteur du dispositif, les méthodes d'analyse, la stratégie d'échantillonnage et d'éventuelles caractéristiques météorologiques. Les mesures en France avaient été réalisées par l'INRS. Au total, la base de données incluait 2007 mesures qui ont été modélisées.

Le questionnaire de l'industrie routière (par entreprise incluse dans la cohorte) avait pour objectif de faire décrire précisément par période, les techniques d'enrobés et autres mixtures appliquées par l'entreprise ainsi que l'organisation du travail au sein de l'entreprise (périodes hiver/été, horaires de travail...). Une réunion finale avec l'industrie et les experts nationaux en hygiène industrielle a été organisée pour présenter les résultats de la modélisation. Au total, chaque cellule de la matrice était définie par une combinaison unique d'un pays, une entreprise, un métier, une période et un agent.

Cette matrice a permis d'obtenir des niveaux d'exposition quantitatifs uniquement pour les « paving workers » concernant les émissions de bitume, les vapeurs organiques et le B[a]P et correspondaient au niveau moyen d'exposition sur 8h d'une personne à temps plein.

Une échelle semi quantitative d'exposition aux émissions de bitume, vapeurs organiques, et HAP lors de road paving, asphalt mixing, waterproofing/roofing, ground construction et building construction a été élaborée. Cette échelle est basée sur les estimations quantitatives modulées par des hypothèses d'exposition relatives aux 3 paramètres décrits ci-dessus selon différents scénarios.

Une évaluation semi quantitative d'exposition aux émissions de moteur diesel, à l'amiante, à la silice et au charbon a également été développée à partir des estimations déclarées dans les questionnaires d'entreprise.

Le chapitre concernant les affections cutanées, a été principalement rédigé à partir de documents de synthèse (Fitzpatrick, Eisen *et al.* 1993; NIOSH 2000).

De manière générale, la littérature rapportée est présentée par ordre chronologique. Les effets rapportés sont présentés chez l'Homme puis chez l'animal en les distinguant par la localisation du système atteint.

Par ailleurs, il a été réalisé une analyse de données issues du réseau National de vigilance et de prévention des Pathologies Professionnelles (RNV3P). La base de données RNV3P enregistre, au niveau national, des problèmes de santé au travail (PST) de patients qui ont consulté dans un Centre de Consultation de Pathologie Professionnelle (CCPP). Les CCPP disposent d'experts médicaux et d'une plateforme technologique *ad hoc* pour identifier l'origine professionnelle d'une pathologie. L'ensemble des PST enregistrés dans la base n'est pas à proprement parler représentatif des pathologies professionnelles. Cependant, les informations recueillies permettent d'observer des tendances et, ce faisant, d'orienter les priorités de surveillance sanitaire dans le champ des pathologies professionnelles. La base de données comprend à la date de décembre 2009, 111 852 PST (enregistrés depuis 2001).

Dans le contexte de l'évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs, les recherches ont été réalisées à partir des codes « nuisances » suivants :

- 33360 : houille (produits de décomposition thermique) ;
- 33460 : houille (produits dégagés lors de...) ;
- 333CO : produits noirs (goudron bitume, produits de la décomposition thermique) ;
- 334CO : produits noirs (goudron bitume, créosote, asphalte, produits dégagés lors de ...)

- 36F00 : produits noirs (asphalte, goudrons, créosote) ;
- 36FY0 : déchets de produits noirs ;
- C1A01 : préparation de goudron.

Le détail des résultats de l'extraction est donné en Annexe 13.

La suite des résultats présentés ci-dessous ne concernent que les pathologies professionnelles en lien avec les codes retenus en nuisance.

La base de données compte 192 PST classés sous cette terminologie associés aux codes nuisances cités.

104 PST pour lesquels « les nuisances notifiées » et « l'imputabilité de ces nuisances dans l'apparition de la pathologie considérée comme professionnelle avec un niveau d'imputabilité au minimum faible ou aggravée par le travail » ont été retrouvés dans la base nationale du RNV3P.

Pour information, ils se répartissent de la manière suivante : 36 PST avec une imputabilité égale à 1¹⁶ ; 30 PST avec une imputabilité égale à 2 et 38 PST avec une imputabilité égale à 3. Les PST concernent 1 femme âgée de 34 ans et 103 hommes âgés en moyenne de 57 ans.

Les groupes de pathologies rapportées en relation avec une exposition professionnelle aux produits bitumineux sont très divers (voir Annexe 13).

Les groupes de pathologies les plus fréquemment rapportées sont les suivants :

1. **les tumeurs (72%)** parmi lesquelles 45% sont des tumeurs malignes des organes respiratoires et intrathoraciques, 32% sont des tumeurs malignes des voies urinaires et 15% sont des mélanomes malins et autres tumeurs malignes de la peau ;
2. **les maladies de l'appareil respiratoire et l'hyperactivité bronchique (15%)** parmi lesquelles 69% sont des maladies chroniques des voies respiratoires inférieures ;
3. **les maladies de la peau et du tissu cellulaire sous-cutané (7%)** qui sont majoritairement des dermatoses et eczémas.

Concernant les secteurs d'activité mis en cause dans les PST résultant de cette recherche (qu'ils soient actuels dans le parcours professionnel du patient ou bien antérieurs), le secteur de la construction et celui des industries manufacturières rassemblent à eux seuls 72 % des PST notifiés.

Les professions liées aux expositions aux produits bitumineux dans les PST déclarés correspondent aux métiers de la construction de chaussées et sols sportifs pour 17 % et aux travaux d'étanchéification pour 9 %.

Les limites des possibilités d'analyse proviennent principalement du fait que la nuisance « fumées de bitume » n'existe pas dans le thésaurus des nuisances utilisé, c'est pourquoi dans le cadre de notre étude nous avons dû procéder à une sélection des codes les plus « pertinents » parmi la liste disponible. D'autre part, les codes nuisances disponibles ne permettent pas d'appréhender les pathologies professionnelles imputables directement à une exposition aux produits bitumineux puisqu'ils ne font pas la distinction entre le goudron et le bitume.

Pour autant, les observations rapportées dans ce rapport permettent de décrire les cas de pathologies professionnelles vus par les spécialistes dans les centres de consultation

¹⁶ Le niveau de relation entre l'exposition et la maladie est estimé par les médecins grâce à un degré d'imputabilité : nulle (0), possible (1), probable (2), certaine (3).

français, et qui ont été expertisés comme étant en lien avec des expositions professionnelles impliquant les codes nuisances listés plus haut.

8.2 Pathologies non cancéreuses

8.2.1 Pathologies cutanées

L'exposition aux produits bitumineux peut occasionner en premier lieu des brûlures thermiques liées au contact direct de la peau avec ces produits manipulés à température élevée. D'autre part, le contact de la peau avec la substance « bitume » et les additifs qui l'accompagnent peut provoquer une agression de type chimique. Dans une première phase, la réaction de la peau est non-immunologique, liée aux propriétés irritantes des produits considérés, puis dans un second temps peuvent apparaître des réactions de type allergique.

8.2.1.1 Dermite de contact par irritation

L'exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions pourrait déclencher une dermite de contact irritative. Les irritants chimiques tels les savons, détergents, solvants, acides, alcalins, *etc.*, peuvent induire ce type de réaction avec de fortes variabilités individuelles. Dans la plupart des cas, les dermatites d'irritation, consécutives à des expositions chroniques, moins sévères que la brûlure par agents chimiques, surviennent après une période d'exposition relativement longue. Elles sont le résultat de contacts répétés avec des substances modérément irritantes. Il existe des facteurs favorisant ou aggravant le développement de ces pathologies : réaction individuelle, localisation, occlusion, transpiration, pigmentation, sécheresse et autres pathologies cutanées associées. Le facteur génétique personnel (dermatite atopique) joue un grand rôle.

Par définition, un irritant est une substance qui endommage la peau par action directe et un mécanisme non immunitaire. L'irritation se traduit par une sensation de brûlure, une rougeur suivie de démangeaisons (prurit), et, en cas de répétition, d'une hyperkératose (épaississement épidermique) associée ou non à une infiltration dermique.

Aucune étude épidémiologique relative à cette pathologie liée spécifiquement à une exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions n'a été recensée dans la littérature.

8.2.1.2 Dermite allergique de contact

Une sensibilisation allergique de contact peut survenir en complication d'une dermite de contact par irritation. Cette évolution n'est pas réversible. La guérison ne peut être obtenue, dans la majorité des cas que par une soustraction du travailleur à l'exposition à vie (mise en place de dispositifs de protection individuelle appropriés, éviction du poste dans le pire des cas).

Parfois cette allergie de contact se présente comme un urticaire caractérisé par démangeaison, rougeur et gonflement sous-épidermique (œdème d'apparition rapide) (Fitzpatrick, Eisen *et al.* 1993). Il existe des agents qui initient une urticaire de contact non allergique mais ce type de réaction n'a pas été documenté chez les travailleurs exposés aux bitumes.

Aucune étude épidémiologique relative à cette pathologie liée spécifiquement à une exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions n'a été recensée dans la littérature.

8.2.1.3 Acné induite par les produits présents dans l'environnement

Il s'agit de papules folliculaires et de pustules apparaissant dans les zones de contact. Il semblerait que ce type de lésion ait été rapporté lors de contacts avec les bitumes (Fitzpatrick, Eisen *et al.* 1993).

Aucune étude épidémiologique relative à cette pathologie liée spécifiquement à une exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions n'a été recensée dans la littérature.

8.2.1.4 Facteurs mécaniques

Les réactions cutanées sont la conséquence de traumatismes mécaniques répétés qui augmentent la susceptibilité du tégument aux effets directs des irritants chimiques : hyperkératoses, cals, fissures, lichénification, bulles, angio-œdèmes, eczématides. L'exposition à la chaleur peut induire une réaction de type miliaire accompagnée de rougeur, signant la rétention de sueur après fermeture des pores cutanés.

Aucune étude épidémiologique relative à cette pathologie liée spécifiquement à une exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions n'a été recensée dans la littérature.

8.2.1.5 Photosensibilité induite par des agents chimiques et réponses anormales aux rayonnements UV

Des réponses anormales cutanées sont induites par l'interaction de certaines molécules organiques avec la lumière (rayonnements UV et visible). En général, les agents chimiques photosensibilisants ont en commun des composés di- et tri-cycliques accompagnés d'un noyau isoprène à double liaison. Ils absorbent alors les radiations (UVA le plus souvent). L'énergie véhiculée par les radiations est absorbée par la molécule.

Les très rares photoallergies sont toujours précédées d'une phototoxicité, l'intensité des réactions allergiques ne dépend pas de la concentration en agents phototoxiques.

Aucune étude épidémiologique relative à cette pathologie liée spécifiquement à une exposition aux produits bitumineux et à leurs émissions n'a été recensée dans la littérature. Il est néanmoins à noter que des brûlures ont été fréquemment observées sur les chantiers routiers et d'étanchéité.

8.2.2 Irritations oculaires

Randem, Ulvestad *et al.* (2004) ont réalisé une étude de terrain avec 64 travailleurs norvégiens (âge moyen 37 ans ; durée moyenne d'emploi 11 ans ; 53 % fumeurs) exposés aux émissions de bitume (bitume de 4 à 5 % mélangé avec du granulat (crushed stone) à 70°C dans certains cas mais le plus souvent de 140 à 150°C pour les travaux routiers (road paving) mais aussi de bitume de 4 à 13 % à 220°C pour l'asphaltage (mastic asphalt)). Un groupe de 195 travailleurs en travaux publics, non exposés aux émissions de bitume a également été étudié (âge moyen 40 ans ; durée moyenne d'emploi 16 ans ; 53 % fumeurs). Ces 2 groupes de professionnels (exposés et non-exposés) étaient comparables en termes sociodémographiques. Des prélèvements atmosphériques de certains HAP, de vapeurs organiques et de la phase particulaire ont été réalisés individuellement (sur toute la durée du poste). Dans un second article de Burstyn, Randem *et al.* (2002), des tests spirométriques (mesure du volume expiratoire maximum seconde VEMS, de la capacité vitale forcée CVF et indice de Tiffeneau) ont été réalisés sur des travailleurs exposés ou non aux émissions de bitume et tous les employés ont rempli un questionnaire. Tous les symptômes d'irritation étudiés (oculaires et respiratoires) étaient significativement augmentés chez les professionnels exposés aux émissions de bitume par rapport aux professionnels non-exposés aux émissions de bitume. Les irritations oculaires étaient 3 fois plus fréquentes chez les travailleurs exposés (OR (Odds ratio) = 2,8 ; IC95% (Intervalle de confiance à 95 %) [1,2 – 5,9]).

Il convient de préciser que les auteurs ne disposaient pas d'éléments pour caractériser des expositions antérieures, ni les expositions concomitantes aux émissions de moteur diesel.

Tepper, Burr *et al.* (2006) ont réalisé une étude multicentrique dans six états des Etats-Unis entre 1994 et 1997 sur l'exposition des travailleurs du secteur du bitume. Des prélèvements atmosphériques individuels ont été réalisés pendant toute la durée du poste et les résultats sont rapportés dans le Tableau 48. Les professionnels (exposés et non exposés) ont rempli un questionnaire des symptômes ressentis avant le poste, toutes les 2 heures pendant le poste et en fin de poste. Le débit expiratoire de pointe (DEP) a été mesuré chez les professionnels exposés en fin de poste. Les travailleurs du bitume présentaient plus de symptômes d'irritation oculaire que les personnes non exposées. Les auteurs ont étudié l'association entre chaque symptôme et chaque type d'exposition (particules totales, fraction soluble dans le benzène, HAP 2 à 3 cycles et HAP 4 à 6 cycles). Les auteurs ont rapporté, après une première analyse statistique, que les symptômes d'irritation oculaire étaient significativement associés aux expositions aux particules totales mais pas spécifiquement aux particules solubles dans le benzène, ni aux composés aromatiques polycycliques. En analysant de façon plus précise les résultats concernant l'association entre les symptômes d'irritation et les concentrations atmosphériques en particules totales, les auteurs concluent à une association entre les symptômes d'irritation oculaire et des concentrations atmosphériques (individuelles, sur 8 heures) en particules totales uniquement lorsque celles-ci sont supérieures à 0,5 mg.m⁻³. Les auteurs ont indiqué que les symptômes d'irritation pourraient apparaître en-dessous de 0,5 mg.m⁻³ de particules totales. Il y avait cependant plus de fumeurs chez les exposés et l'échantillon manquait de puissance statistique pour apporter des résultats clairs.

Tableau 48 : Concentrations atmosphériques (mg.m⁻³ pour les particules totales et solubles dans le benzène et µg.m⁻³ pour les composés aromatiques polycycliques) mesurées individuellement d'après Tepper, Burr *et al.* (2006)

	Moyenne géométrique [min-max]					
	Conducteurs de camions d'enrobé (truck dumper)	Conducteur de finisseur (paver operator)	Régleur (screed operator)	Ratisseur (raker)	Conducteur de compacteur (roller operator)	Autres
Particules totales	0,40 [0,15 – 0,89]	0,22 [0,01 – 1,3]	0,18 [0,04 – 1,0]	0,20 [0,05 – 0,51]	0,07 [0,02 – 0,35]	0,12 [0,01 – 0,46]
Particules solubles dans le benzène	0,15 [0,04 – 0,49]	0,36 [0,20 – 0,82]	0,17 [0,07 – 0,37]	0,08 [0,05 – 0,12]	0,02 [0,01 – 0,06]	0,11 [0,03 – 0,35]
CAP						
Absorbant à 370 nm (CAP 2 à 3 cycles)	12 [8,3 – 22]	11 [1,1 – 84]	4,9 [0,65 – 191]	7,8 [5,0 – 16]	0,43 [0,1 – 17]	1,4 [0,30 – 14]
Absorbant à 400 nm (CAP 4 à 6 cycles)	1,7 [1,1 – 2,9]	1,8 [0,16 – 12]	0,7 [0,09 – 25]	1,3 [0,61 – 4,2]	0,09 [0,01 – 3,4]	0,26 [0,07 – 2,1]

8.2.3 Effets sur l'appareil respiratoire

8.2.3.1 Etudes chez l'homme

Hansen (1991) a suivi une cohorte de 679 travailleurs du bitume de 1959 à 1986 et s'est intéressée aux causes de mortalité. Elle a montré une surmortalité non significative (SMR (« Standardized Mortality Ratio » ou Ratio standardisé de mortalité) de 207 ; IC 95 % 95 - 393) par BPCO (Broncho-pneumopathie chronique obstructive), emphysèmes et asthme. L'auteure n'a pas pu contrôler les analyses pour différents facteurs de confusion, dont le tabagisme, les goudrons de houille.

Norseth, Waage *et al.* (1991) ont suivi plusieurs groupes de travailleurs du bitume en Norvège et ont mesuré leur exposition à des COV pendant 5 jours. Les auteurs ont constitué 3 groupes d'étude en fonction du niveau d'exposition : un 1^{er} groupe de 79 travailleurs aux postes les plus exposants (conducteur de camion, ratisseur, opérateur), un 2^{ème} groupe de 254 autres travailleurs du bitume et un dernier groupe de 247 agents de maintenance non exposés au bitume. Les concentrations atmosphériques mesurées individuellement pendant le poste de travail sont rapportées dans le Tableau 49. Les symptômes présentés par les salariés ont été recueillis au moyen de questionnaires médicaux. Les caractéristiques du bitume, les conditions météorologiques ainsi que le trafic automobile ont été notifiés. La fréquence de certains symptômes (fatigue, appétit réduit, irritations des voies aériennes supérieures et toux) était plus élevée chez les travailleurs exposés que chez les professionnels non-exposés. Aucune différence n'a été rapportée entre ces 2 groupes concernant la fréquence d'apparition des autres symptômes considérés (maux de tête, nausées, douleurs abdominales, perte de sommeil, modification de l'odorat, réactions cutanées). Des scores ont été calculés à partir des résultats des questionnaires sur les symptômes (somme des scores de tous les symptômes). Les travailleurs en milieu confiné (ou souterrain dans la publication : garage, tunnels) présentaient un score significativement supérieur à celui des travailleurs hors milieu souterrain/confiné. Les travailleurs exposés aux émissions de produits bitumineux présentaient de façon générale un score supérieur aux travailleurs de la maintenance. Ces résultats sont confirmés en comparant les travailleurs de la construction routière et les travailleurs de la maintenance. Tous ces résultats ont été obtenus après ajustement sur les facteurs de confusion potentiels (tabagisme, âge, nombre d'heures travaillées...). Les scores n'étaient pas corrélés aux conditions climatiques, à la densité du trafic mais uniquement à la température d'application des produits bitumineux. Avec une augmentation significative des scores lorsque les bitumes étaient appliqués au dessus de 145 ou 155°C. Les auteurs ont indiqué que l'addition d'amines dans les produits n'augmentait pas les scores mais les diminuaient. Les auteurs soulignent que les produits contenant des amines étaient appliqués à des températures inférieures (144°C au lieu de 161°C). La différence était plus nette pour les professionnels travaillant avec des produits bitumineux (sans amines) chauffés à plus de 155°C. Les professionnels travaillant avec ses produits bitumineux les moins « durs » (> 18 mm de pénétration) présentaient un score significativement diminué par rapport à ceux travaillant avec des produits plus « durs », mais les auteurs soulignent là aussi la différence de température, respectivement 128 et 160°C. Il y a une corrélation significative entre les scores et les concentrations atmosphériques de certains COV. La plus forte corrélation est retrouvée avec les concentrations atmosphériques de 1,2,4-triméthyle benzène, alors qu'elle est négative avec les concentrations atmosphériques de meta- et para-xylène et d'éthylbenzène. Les scores n'augmentent pas lorsque la concentration atmosphérique des COV totaux augmente mais augmentent significativement avec les concentrations des émissions de bitumes avec un seuil à 0,4 mg.m⁻³ (le score passe de 1,3 à 3).

Tableau 49 : Concentrations atmosphériques mesurées lors de travaux de construction routière d'après Norseth, Waage *et al.* (1991)

Composés aliphatiques (ppb)	Moyenne arithmétique Médiane [min-max]
C5	0,18 0,08 [ND – 1,17]
C6	0,07 0,05 [ND – 0,26]
C7	0,07 0,06 [ND – 0,49]
<i>meta</i> - et <i>para</i> -xylène (ppb)*	12,4 1,9 [ND – 105]
<i>ortho</i> -xylène (ppb)*	2,3 1,6 [ND – 12,2]
Ethyle benzène (ppb)*	2,1 ND [ND – 29,4]
1,2,4-triméthyle benzène (ppb)*	1,5 0,6 [ND – 12,2]
1,3,5-triméthyle benzène (ppb)*	0,1 ND [ND – 1,1]
Isopropyle benzène (ppb)*	1 ND [ND – 7,9]
1,2,3-triméthyle benzène (ppb)*	0,4 ND [ND – 6,8]
Composés aromatiques (ppb)*	
C9-C12	0,53 0,25 [0,01 – 3,93]
C9-C13	3,96 2,31 [0,3 – 27,5]
C9-C15	0,14 0,01 [ND – 1,12]
Emissions de bitume ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	358 208 [200 – 1 290]

* Ces concentrations ont été calculées à partir des concentrations rapportées dans la publication en $\text{ppm}\cdot 10^{-2}$

Une étude a été réalisée par Gamble, Nicolich *et al.* (1999) sur 170 travailleurs exposés aux émissions de bitume dans 5 secteurs d'activité : fabrication d'enrobés, pose d'enrobés, centrales d'approvisionnement, fabrication et pose de produits d'étanchéité (respectivement hot mix asphalt manufacturing, hot mix asphalt paving operations, asphalt distribution terminals, roofing manufacturing and roofing application). L'exposition des travailleurs a été évaluée individuellement par des badges pour doser la concentration en particules totales, la fraction alvéolaire et COV de l'air inspiré. Le badge était posé au début du poste de travail et gardé pendant deux jours consécutifs. Des prélèvements passifs ont été réalisés individuellement pour la mesure du NO₂, SO₂, H₂S, formaldéhyde, et CO, mais la majeure partie des échantillons ne dépassait pas les limites de détection. La concentration d'ozone a été mesurée dans des prélèvements d'ambiance révélant une concentration maximale de 92 ppb (travaux d'étanchéité de toiture). Un examen clinique incluant la mesure de la fonction pulmonaire (CVF, VEMS et DEP) a été réalisé en début et en fin de poste, ainsi qu'un questionnaire portant sur l'expression de différents symptômes cliniques non spécifiques (maux de tête, perte d'appétit, *etc.*). Les concentrations atmosphériques retrouvées lors de la pose d'enrobé et les méthodes de prélèvement et d'analyse sont renseignées dans le Tableau 50.

L'analyse montre qu'il n'y a pas d'association significative entre les expositions (particules totales, fraction alvéolaire, fraction soluble dans le benzène ou COV) et les effets sur la fonction respiratoire. Aucune association n'a été retrouvée entre les expositions mesurées au niveau individuel et les symptômes décrits par les travailleurs.

Tableau 50 : Concentrations atmosphériques (mg.m⁻³) en particules totales, particules alvéolaires, composés solubles dans le benzène et composés organiques volatils mesurés individuellement d'après Gamble, Nicolich *et al.* (1999)

	Particules totales	Particules alvéolaires	Fraction soluble dans le benzène	COV
Méthode de prélèvement et analyse	NIOSH 0500	NIOSH 0600	NIOSH 5023	NIOSH 1500 et 1501 (charbon actif)
Concentrations atmosphériques mg.m ⁻³ Moyenne géométrique (max)				
Pose d'enrobé (n = 80)	0,33 (1,66)	0,1 (1,08)	0,09 (0,65)	0,38 (7,72)
Chef d'équipe (n = 6)	0,39 (1,09)	0,13 (0,52)	0,08 (0,34)	0,44 (1,34)
Contrôleur de chantier (n = 7)	0,26 (0,47)	0,09 (0,17)	0,06 (0,13)	0,22 (1,61)
Ouvrier (n = 20)	0,39 (1,52)	0,15 (0,39)	0,1 (0,49)	0,73 (7,72)
Conducteur de finisseur (n = 7) (paver operator)	0,45 (0,71)	0,21 (0,67)	0,11 (0,38)	0,77 (2,56)
Conducteur de compacteur (n = 13) (roller operator)	0,23 (0,64)	0,05 (0,24)	0,06 (0,28)	0,17 (3,22)
Régleur (n = 12) (screed operator)	0,72 (1,66)	0,27 (1,08)	0,27 (0,65)	1,45 (5,72)
Contrôle de la circulation (n = 13) (traffic control)	0,16 (0,71)	0,03 (0,06)	0,06 (0,24)	0,09 (0,41)
Conducteur de camion (n = 2) (truck driver)	0,21 (0,34)	0,05 (0,08)	0,06 (0,09)	0,28 (0,33)
Fabrication d'enrobés (n = 20)	0,45 (1,31)	0,1 (0,6)	0,06 (0,14)	1,06 (6,28)
Centrales d'approvisionnement (n = 47)	0,19 (2,51)	0,06 (0,16)	0,05 (1,32)	1,58 (19,80)
Fabrication de produits d'étanchéité	0,6 (6,16)	0,08 (0,56)	0,08 (1,32)	0,7 (8,73)
Pose de produits d'étanchéité	0,34 (2,73)	0,14 (1,38)	0,12 (1,23)	0,3 (6,71)

Randem, Langard *et al.* (2003) ont étudié les associations possibles entre l'exposition professionnelle au bitume et la mortalité par pathologies non malignes dans une cohorte de travailleurs masculins norvégiens incluse dans la cohorte multi-centrique européenne. La

cohorte était composée de 8 610 salariés d'entreprises de travaux routiers de sexe masculin suivis entre 1970 et 1996, ce qui correspond à 127 636 personnes-années. Des données de consommation tabagique ont été obtenues pour 799 travailleurs, et sont semblables à celles de la population masculine norvégienne. Les auteurs ont donc considéré que la population des travailleurs étudiés ne différait pas de la population générale en matière de comportement tabagique.

La mortalité toutes causes des travailleurs exposés aux produits bitumineux était significativement inférieure à celle de la population générale (SMR = 0,92 ; IC95% [0,86 – 0,99]). La mortalité cardiovasculaire était légèrement inférieure à la celle de la population générale mais de manière non significative (SMR = 0,93 ; IC95% [0,83 – 1,03]), de même que la mortalité par affections digestives (SMR = 0,92 ; IC95% [0,58 – 1,40]). En revanche, les résultats ont mis en évidence une augmentation non significative de 25% de la mortalité par pathologies respiratoires non cancéreuses (SMR=1,25 IC95% [0,97-1,59]). Au sein de cette catégorie, l'augmentation non significative de la mortalité par asthme semblait plus importante mais le faible nombre de décès pour cause principale d'asthme rend l'interprétation de ce résultat difficile (SMR = 1,80 IC95% [0,93 – 3,14]). L'application de la matrice emploi-exposition semi-quantitative (ROCEM) a mis en évidence une faible augmentation de la surmortalité par pathologies respiratoires en fonction de l'exposition, évaluée soit par l'indice d'exposition cumulée aux HAP ($\text{ng.m}^{-3}.\text{an}$) soit par l'exposition cumulée aux émissions de bitume ($\text{mg.m}^{-3}.\text{an}$) mais la tendance n'est pas statistiquement testée. Les résultats sont les suivants :

	Mesure	Groupe d'exposition	n	SMR	Intervalle de confiance à 95 %
HAP	Indice d'exposition cumulée ($\text{ng.m}^{-3}.\text{an}$)	Inconnu	1	0,91	0,02 – 5,05
		0 à 23,49	17	0,99	0,58 – 1,58
		23,5 à 59,9	17	1,27	0,74 – 2,03
		> 60	18	1,14	0,68 – 1,81
Emissions de bitume	Indice d'exposition cumulée ($\text{mg.m}^{-3}.\text{an}$)	Inconnu	1	0,91	0,02 – 5,05
		0 à 9,9	17	1,02	0,60 – 1,64
		10 à 25,89	17	1,21	0,70 – 1,93
		> 25,9	18	1,16	0,68 – 1,83

Burstyn, Boffetta *et al.* (2003a) ont travaillé sur la cohorte multicentrique européenne. Les relations entre la mortalité par pathologies respiratoires non malignes (BPCO, emphysème et asthme) et certains agents chimiques seuls ou en mélanges ont été évaluées à l'aide de la matrice emploi-exposition ROCEM (définie en introduction de ce chapitre). Le risque de mortalité par pathologies respiratoires non malignes augmentait significativement avec l'indice d'exposition cumulée estimé pour le B[a]P ($\text{ng.m}^{-3}.\text{an}$). Le risque était d'ailleurs statistiquement augmenté dans le premier groupe d'exposition (233 à 624 $\text{ng.m}^{-3}.\text{an}$). Les auteurs n'ont pas montré d'augmentation du risque de mortalité par troubles respiratoires ou pulmonaires en relation avec l'exposition moyenne au B[a]P estimée (ng.m^{-3}).

Les auteurs n'ont pas observé d'augmentation du risque de mortalité par troubles pulmonaires ou par pathologies respiratoires non malignes lorsque l'indice d'exposition cumulée ou la concentration atmosphérique, estimés pour les émissions de bitume, augmentaient (avec ou sans prise en compte de la présence de goudrons de houille).

Les résultats pour les travailleurs de la construction routière sont présentés dans le Tableau 51.

Tableau 51 : Risque de mortalité par troubles pulmonaires et pathologies respiratoires non malignes chez les travailleurs de la construction routière (pavers) d'après Burstyn, Boffetta *et al.* (2003a)

	Mesure	Groupe d'exposition	Troubles pulmonaires		BPCO, emphysème et asthme	
			Risque relatif	Intervalle de confiance à 95 %	Risque relatif	Intervalle de confiance à 95 %
B[a]P	Indice d'exposition cumulée (ng.m ⁻³ .an)	0 - < 233	1,00		1,00	
		233 - < 624	1,36	0,78 – 2,38	1,55	0,68 – 3,54
		624 - < 1 414	2,24	1,20 – 4,17	2,97	1,25 – 7,07
		≥ 1 414	2,94	1,32 – 6,55	4,06	1,35 – 12,19
		<i>p</i>	< 0,001		< 0,001	
	Exposition moyenne (ng.m ⁻³)	>0 - < 90	1,00		1,00	
		90 - < 128	1,43	0,82 – 2,48	2,68	1,05 – 6,81
		128 - < 254	1,27	0,70 – 2,30	1,77	0,66 – 4,73
		≥ 254	1,52	0,80 – 2,88	2,67	1,01 – 7,03
		<i>p</i>	0,22		0,08	
Emissions de bitume	Indice d'exposition cumulée (mg.m ⁻³ .an)	> 0 - < 1,65	1,00		1,00	
		1,65 - < 3,73	1,16	0,68 – 1,98	0,91	0,42 – 1,96
3,73 - < 8,52		1,08	0,58 – 2,00	1,48	0,69 – 3,17	
≥ 8,52		1,22	0,45 – 3,34	1,24	0,26 – 5,94	
<i>p</i>		0,70		0,39		
	Exposition moyenne (mg.m ⁻³)	> 0 - < 0,95	1,00		1,00	
		0,95 - < 1,16	1,23	0,71 – 2,15	1,46	0,57 – 3,73
		1,16 - < 1,29	1,52	0,83 – 2,78	1,98	0,79 – 5,00
		≥ 1,29	0,89	0,47 – 1,70	1,33	0,51 – 3,42
		<i>p</i>	0,83		0,64	
Émissions de bitume sans goudron de houille	Indice d'exposition cumulée (mg.m ⁻³ .an)	> 0 - < 1,65	1,00		1,00	
		1,65 - < 3,73	1,04	0,49 – 2,21	0,65	0,17 – 2,52
3,73 - < 8,52		1,02	0,39 – 2,69	2,04	0,57 – 7,31	
≥ 8,52		1,67	0,38 – 7,23	2,22	0,18 – 27,2	
<i>p</i>		0,71		0,43		
	Exposition moyenne (mg.m ⁻³)	> 0 - < 0,95	1,00		1,00	
		0,95 - < 1,16	1,51	0,76 – 3,01	2,08	0,63 – 6,85
		1,16 - < 1,29	1,55	0,59 – 4,07	2,78	0,63 – 12,3
		≥ 1,29	0,68	0,22 – 2,12	1,63	0,31 – 8,54
		<i>p</i>	0,88		0,35	

Bergdahl, Toren *et al.* (2004) ont suivi 317 629 travailleurs (hommes) dans le secteur de la construction et réalisé une étude de la mortalité de 1971 à 1999. L'exposition aux poussières minérales (amiante, fibres synthétiques ou artificielles minérales, poussières de ciment, béton et de quartz), aux gaz et aux irritants (résines époxy, isocyanates et solvants organiques), aux fumées (bitume, gaz d'échappement de moteur diesel, métal), et à la poussière de bois a été estimée grâce à une matrice emploi-exposition. Un groupe de témoins, travailleurs de la construction non exposés aux émissions de bitume, a été intégré à l'étude après ajustement sur l'âge et le tabagisme. Le risque de mortalité par BPCO était augmenté de 12% chez les travailleurs exposés, sans distinction du type d'exposition, (RR =

1,12 ; IC95% [1,03 – 1,22]) et de 22% chez les travailleurs exposés aux fumées (RR = 1,22 ; IC95% [1,04 – 1,42]). Chez les travailleurs n'ayant jamais fumé, l'effet de l'exposition aux fumées sur le risque de mortalité par BPCO est nettement plus visible et est quasiment triplé par rapport aux travailleurs non-exposés (RR = 2,72 ; IC95% [1,31 – 3,68]). Il est cependant difficile d'attribuer ces observations à une exposition en particulier compte tenu de la complexité de l'exposition.

Randem, Ulvestad *et al.* (2004) ont également réalisé une étude de terrain décrite précédemment. Tous les symptômes d'irritation et les pathologies respiratoires étudiées étaient significativement augmentés chez les professionnels exposés aux émissions de bitume par rapport aux professionnels non-exposés aux émissions de bitume :

- Oppression thoracique (OR = 2,8 ; IC95% [1,3 - 5,9])
- Essoufflement à l'effort (OR = 4,1 ; IC95% [1,3 - 13,0])
- Respiration sifflante (OR = 2,6 ; IC95% [1,4 - 4,9])
- Asthme (OR = 7,9 ; IC95% [2,3 - 26,8])
- BPCO (OR = 2,8 ; IC95% [1,2 – 6,5])

Il convient de préciser que les auteurs ne disposaient pas d'éléments pour caractériser des expositions antérieures, ni les expositions concomitantes aux particules émises par les moteurs diesel.

Tepper, Burr *et al.* (2006) ont réalisé une étude multicentrique dans six états des Etats-Unis décrite précédemment. Les auteurs ont rapporté, après une première analyse statistique, que les fréquences des symptômes d'irritation nasale et pulmonaire rapportés étaient significativement augmentées lorsque les concentrations atmosphériques en particules totales augmentaient. En revanche les fréquences des différents symptômes d'irritation rapportés n'augmentaient pas avec les concentrations atmosphériques en particules solubles dans le benzène (BSF) ou en composés aromatiques polycycliques (HAP370 et HAP 400) :

Symptôme		OR [IC95%]
Yeux	Particules totales	1,34 [1,12 – 1,60]
	BSF	1,09 [0,99 – 1,19]
	HAP370	Non renseigné
	HAP400	Non renseigné
Nez	Particules totales	1,22 [1,00 – 1,49]
	BSF	1,05 [1,00 – 1,11]
	HAP370	1,00 [0,99 – 1,02]
	HAP400	1,03 [0,92 – 1,16]
Gorge	Particules totales	1,40 [1,06 – 1,85]
	BSF	1,03 [1,01 – 1,04]
	HAP370	1,00 [0,99 – 1,01]
	HAP400	1,01 [0,94 – 1,09]
Toux	Particules totales	1,23 [0,98 – 1,53]
	BSF	Non renseigné
	HAP370	1,01 [0,99 – 1,02]
	HAP400	1,06 [0,95 – 1,18]

En analysant de façon plus précise les résultats concernant l'association entre les symptômes d'irritation et les concentrations atmosphériques en particules totales, les auteurs concluent à une augmentation de la fréquence de certains symptômes d'irritation (yeux OR = 7,5 ; IC95% [1,1 – 50], gorge OR = 15 ; IC95% [2,3 – 103] et toux OR 4,6 ; IC95% [1,0 – 20]) lorsque les concentrations atmosphériques (système individuel de mesure des concentrations atmosphériques) en particules totales sont supérieures à 0,5 mg.m⁻³. La fréquence des symptômes rapportés pour l'irritation nasale n'est en revanche pas augmentée (OR = 1,5 ; IC95% [0,28 – 8]). Les auteurs ont indiqué que les symptômes d'irritation pourraient apparaître lors d'expositions en-dessous de 0,5 mg.m⁻³ de particules totales. Cependant, les auteurs ont précisé qu'il y avait plus de fumeurs chez les exposés et l'échantillon manquait de puissance statistique pour apporter des résultats clairs. En effet, les calculs de mesures d'association ont également été réalisés pour les travailleurs exposés à des concentrations atmosphériques en particules totales inférieures à 0,5 mg.m⁻³ et aucune tendance n'a pu être observée :

	< 0,5 mg.m ⁻³	≥ 0,5 mg.m ⁻³	< 0,4 mg.m ⁻³	≥ 0,4 mg.m ⁻³	< 0,3 mg.m ⁻³	≥ 0,3 mg.m ⁻³
Irritation des yeux (brulures, démangeaisons, douleurs)	N = 4	N = 5	N = 3	N = 6	N = 3	N = 6
	OR = 7,5 IC95% [1,1 – 50]		OR = 6,1 IC95% [0,97 – 39]		OR = 4,0 IC95% [1,0 – 16]	
Irritation des muqueuses nasales (brulures, démangeaisons, nez bouché)	N = 11	N = 4	N = 8	N = 7	N = 7	N = 8
	OR = 1,5 IC95% [0,28 – 8]		OR = 3,0 IC95% [0,63 – 15]		OR = 3,1 IC95% [0,85 – 11]	
Irritation de la gorge (inflammation, sécheresse)	N = 4	N = 6	N = 4	N = 6	N = 4	N = 6
	OR = 15 IC95% [2,3 – 103]		OR = 7,8 IC95% [0,86 – 72]		OR = 2,5 IC95% [0,44 – 15]	
Toux	N = 4	N = 3	N = 4	N = 3	N = 4	N = 3
	OR = 4,6 IC95% [1,0 – 20]		OR = 3,15 IC95% [0,97 – 9,8]		OR = 1,7 IC95% [0,61 – 4,9]	

Raulf-Heimsoth, Pesch *et al.* (2007) ont étudié 202 asphaltateurs (âge moyen 37 ans ; durée moyenne d'emploi 6,5 ans ; 42 % fumeurs) travaillant avec des bitumes chauffés entre 230 et 250 °C. 55 cantonniers (roadside construction workers) non professionnellement exposés aux émissions de bitume ont également été inclus dans cette étude (âge moyen 40 ans ; durée moyenne d'emploi 8 ans ; 66 % fumeurs). Des prélèvements (système individuel de mesure des concentrations atmosphériques) d'émissions vapeurs et particules ont été réalisés (sur toute la durée du poste). La médiane des concentrations atmosphériques des émissions de bitumes était égale à 3,7 mg.m⁻³ (interquartile : 1,7 à 7,1). Des tests spirométriques (mesure du VEMS et de la CVF) ont été réalisés et certains médiateurs de l'inflammation ont été mesurés dans les produits d'expectoration et les sécrétions nasales (en début de poste DP et fin de poste FP). Les auteurs rapportent une diminution des capacités respiratoires en fin de poste (non retrouvée avant la prise de poste) dans le groupe de professionnels exposés aux émissions de bitume. L'ensemble des résultats des paramètres biologiques mesurés dans les sécrétions nasales et les crachats sont rapportés dans le Tableau 52. Les auteurs indiquent que les professionnels exposés aux émissions de bitume présentent une irritation sub-chronique des voies-aériennes inférieures (tests spirométriques et augmentation des IL-8 dans les produits d'expectoration en particulier en début de poste ce qui pourrait signifier une chronicité de l'effet). En revanche, ils n'expliquent

pas les résultats rapportés sur les sécrétions nasales qui n'indiquent pas d'irritation particulière des voies aériennes supérieures.

Tableau 52 : Résultats des paramètres biologiques mesurés dans les sécrétions nasales et les crachats des professionnels exposés ou non aux émissions de bitume d'après Raulf-Heimsoth, Pesch *et al.* (2007)

	Interleukine 1 β ($\mu\text{g.L}^{-1}$)			Interleukine 8 ($\mu\text{g.L}^{-1}$)			polynucléaires neutrophiles (%)		
	DP	FP	p^{**}	DP	FP	p^{**}	DP	FP	p^{**}
Sécrétions nasales									
Non-exposés	1,8	1,4	0,22	205,1	150,3	0,08	47	36,4	0,026
Exposés	1,1	0,7	0,0003	157,3	108,3	0,0001	35	27,3	0,003
p^*	0,0014	0,0002		0,22	0,14		0,015	0,08	
Crachats									
Non-exposés	Non renseigné			1347,2	914,3	0,0477	4,0	3,1	0,47
Exposés				3185,4	2949,4	0,4	1,8	1,0	0,0009
p^*				0,0003	0,0001		0,0328	0,0013	

* significativité de la différence des valeurs des paramètres mesurés entre les professionnels exposés aux émissions de bitume et les professionnels non-exposés

** significativité de la différence des valeurs des paramètres mesurés entre le début et la fin de poste

Ulvestad, Randem *et al.* (2007) ont étudié 124 travailleurs en Norvège (âge moyen 45 ans ; 25 % fumeurs), dont un groupe de 76 travailleurs de la construction routière (conducteurs de finisseur, régléur, conducteur de compacteur et décapeur) et un groupe de 48 travailleurs hors de la construction routière (opérateurs de centrale et conducteurs de camion) exposés aux émissions de bitume (bitume mélangé 4 à 5 %). Un groupe de 126 professionnels non exposés aux émissions de bitume a été inclus dans l'étude (âge moyen 46 ans ; 23 % fumeurs). Des prélèvements atmosphériques individuels des particules, des HAP totaux et des brouillards d'huile ont été réalisés (sur toute la durée du poste). Les concentrations sont présentées dans le Tableau 53. Un examen médical a été réalisé en début de poste en avril-mai 2005 (avant la saison de construction routière) et en septembre-octobre 2005 (fin de saison) pendant lequel des tests spirométriques (mesure du VEMS, de la CVF et du débit expiratoire forcé à 50 % (DEM50)) ont été réalisés. Des échantillons de sang ont été également prélevés pour la mesure de l'Interleukine 6 (IL-6), de la protéine C-réactive (CRP) et du fibrinogène. Tous les travailleurs ont rempli un questionnaire de santé. Les marqueurs de l'inflammation et la fonction respiratoire ont été analysés en séparant les travailleurs de la construction routière et les conducteurs de camion (avec les opérateurs de centrale). La concentration d'IL-6 mesurée dans les deux groupes ne présentait pas de différence significative en début de saison. Seul le groupe des travailleurs de la construction routière a montré une augmentation significative de cette concentration entre le début et la fin de saison (après ajustement sur le statut tabagique). Concernant les autres marqueurs d'inflammation (fibrinogène et CRP), aucune différence entre les deux groupes en début de saison ainsi qu'entre le début et la fin de saison n'a été observée. Concernant la fonction respiratoire, avant même la saison de construction routière, tous les travailleurs exposés aux émissions de bitume présentaient une altération des débits respiratoires par rapport aux personnes non exposées (VEMS et un DEM50 significatifs et CVF non significatif). Seuls les régléurs ont présenté, en plus, une diminution significative des capacités pulmonaires (CVF et VEMS) entre le début et la fin de saison. L'altération de la fonction respiratoire n'était pas corrélée avec la durée moyenne d'exposition. Selon les auteurs, l'exposition aux émissions de bitume pourrait avoir un effet délétère sur la fonction respiratoire.

Tableau 53 : Concentrations atmosphériques (mg.m^{-3} pour les particules totales et solubles dans le benzène et $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour les HAP) mesurées individuellement d'après Ulvestad, Randem *et al.* (2007)

Moyenne géométrique (écart-type)						
	n	Particules totales	n	Brouillards d'huile	n	HAP totaux
Conducteur de finisseur (paver operator)	16	0,3 (1,9)	7	0,23 (3,4)	12	1,8 (1,9)
Régleur (screedman)	32	0,3 (2,5)	9	0,09 (2,3)	29	1,6 (2,2)
Conducteur de compacteur (roller driver)	8	0,4 (2,7)	-	NR	7	1,3 (4,3)
Décapeur (asphalt stripper)	9	2,4 (1,5)	4	0,19 (2,6)	9	0,5 (1,8)
Opérateur de centrale (plant operator)	9	0,9 (1,8)	-	NR	12	0,5 (1,7)
Conducteur de camion (lorry driver)	10	0,1 (2,4)	-	NR	6	0,3 (1,4)

Le Tableau 54 présente la synthèse des données relatives aux affections respiratoires issues des études chez l'homme énoncées dans ce chapitre.

Tableau 54 : Synthèse des données concernant les affections respiratoires chez l'homme en fonction des différentes expositions rapportées dans les études

	Paramètres d'exposition Moyennes (MA = moyenne arithmétique ; MG = moyenne géométrique) et/ou médiane (med) [min-max]									Pathologies	
	Particules totales mg.m ⁻³	Emissions de bitume (mg.m ⁻³)	Particules alvéolaires mg.m ⁻³	Fraction soluble dans le benzène mg.m ⁻³	CAP µg.m ⁻³	Composés aromatiques	Composés aliphatiques	HAP totaux µg.m ⁻³	COV mg.m ⁻³		Solvants ppb
Hansen (1991)	Pas d'exposition renseignée dans l'étude									Surmortalité non significative par BPCO	
Norseth, Waage <i>et al.</i> (1991)		(MA) 358 (med) 208 [200 – 1290]				C9-C12 (MA) 0,53 (med) 0,25 [0,01 – 3,93]	C5 (MA) 0,18 (med) 0,08 [ND – 1,17]			meta- et para-xylène (MA) 12,4 (med) 1,9 [ND – 105] ortho-xylène (MA) 2,3 (med) 1,6 [ND – 12,2] Ethyle benzène (MA) 2,1 [ND – 29,4] 1,2,4-triméthyle benzène (MA) 1,5 (med) 0,6 [ND – 12,2] 1,3,5-triméthyle benzène (MA) 0,1 [ND – 1,1] Isopropyle benzène (MA) 1 [ND – 7,9] 1,2,3-triméthyle benzène (MA) 0,4 [ND – 6,8]	Fréquence de symptômes d'irritation des VAS et de la toux augmentée chez les professionnels exposés
Gamble, Nicolich <i>et al.</i> (1999)	(MG) 0,19 à 0,6 [NR – 6,3]		(MG) 0,06 à 0,14 [NR – 1,38]	(MG) 0,05 à 0,12 [NR – 1,32]				(MG) 0,3 à 1,58 [NR – 19,8]		Pas d'association entre les niveaux d'exposition individuels et la réduction de la fonction respiratoire ou l'augmentation de l'incidence des symptômes	
Burstyn, Boffetta <i>et al.</i> (2003a)		Indice d'exposition cumulée (mg.m ⁻³ .an) Concentration atmosphérique (mg.m ⁻³)			B[a]P indice d'exposition cumulée (ng.m ⁻³ .an) Concentration atmosphérique (ng.m ⁻³)					Association significative entre exposition au B[a]P (sous forme IEC) et risque de mortalité par pathologie respiratoire Pas d'association entre exposition au B[a]P (concentration atmosphérique) et risque de mortalité par pathologie respiratoire Pas d'association entre exposition aux émissions de bitumes (avec ou sans goudrons de houille ; IEC ou concentration atmosphérique) et risque de mortalité par pathologie respiratoire	

Randem, Langard <i>et al.</i> (2003)		Indice d'exposition cumulée (mg.m ⁻³ .an)			Indice d'exposition cumulée (ng.m ⁻³ .an)						Surmortalité (non statistiquement significative) par pathologies respiratoires non cancéreuses Tendance à la surmortalité par pathologies respiratoires qui augmentait avec l'exposition que celle-ci aient été évaluée en indice d'exposition cumulée aux HAP (ng.m ⁻³ .an) ou en indice d'exposition cumulée aux émissions de bitume (mg.m ⁻³ .an) mais les résultats ne pas significatifs
Bergdahl, Toren <i>et al.</i> (2004)	Pas d'exposition renseignée dans l'étude									Le risque de mortalité par BPCO était augmenté chez les travailleurs exposés aux « fumées » et nettement augmenté en ne prenant en compte que les travailleurs non-fumeurs	
Randem, Ulvestad <i>et al.</i> (2004)	Pas d'exposition renseignée dans l'étude									Augmentation significative des symptômes et des affections respiratoires associées à l'exposition aux émissions de bitume	
Tepper, Burr <i>et al.</i> (2006)	(MG) 0,07 à 0,4 [0,01 – 1,3]			(MG) 0,02 à 0,36 [0,01 – 0,82]	2 à 3 cycles (MG) 1,4 à 12 [0,1 – 191] 4 à 6 cycles (MG) 0,09 à 1,7 [0,01 – 25]					Augmentation des symptômes d'irritation associée à une exposition supérieure à 0,5 mg.m ⁻³ en particules totales Pas d'augmentation des fréquences des symptômes rapportés lorsque la concentration atmosphérique en PT est inférieure à 0,5 mg.m ⁻³ Les fréquences des différents symptômes d'irritation n'augmentaient avec les concentrations atmosphériques en particules solubles dans le benzène (BSF) ou en composés aromatiques polycycliques (HAP370 et HAP 400)	
Raulf-Heimsoth, Pesch <i>et al.</i> (2007)		(med) 3,7 Quartile : 1 ^{er} = 1,7 3 ^{ème} = 7,1								Les professionnels exposés aux émissions de bitume présentent une irritation sub-chronique des voies-aériennes inférieures Pas d'explication des résultats négatifs rapportés pour les sécrétions nasales n'indiquant pas d'irritation des VAS	
Ulvestad, Randem <i>et al.</i> (2007)	(MG) 0,1 à 2,4							(MG) 0,3 à 1,6		Altérations des fonctions respiratoires, effets délétères observés en début de saison (chroniques ?)	

CAP : composés aromatiques polycycliques ; COV : composés organiques volatils

8.2.3.2 Etudes chez l'animal

Ma, Rengasamy *et al.* (2003) ont réalisé une étude sur des rates Sprague Dawley exposées en chambre d'inhalation (corps entier) à des émissions de bitumes chauffées à 150°C pendant 3,5 heures ou 6 heures/j durant 5 jours à 2 niveaux de concentration. Les concentrations atmosphériques (gaz + particules) étaient respectivement de 10,4 et 23,6 mg.m⁻³ dans la condition 3,5 heures/j, et 16,7 et 57,8 mg.m⁻³ dans la condition 6 heures/j. Le nombre de rates inclus par couple durée/concentration était de 8. Quatre groupes contrôles (8 rates par groupe) ont été exposés en chambre d'inhalation à de l'air filtré pendant les mêmes durées. Des lavages broncho-alvéolaires ont été réalisés à la fin de l'exposition et analysés pour étudier une potentielle inflammation pulmonaire au travers d'une numération et d'une formulation cellulaires, et pour rechercher une éventuelle toxicité au niveau des cellules de l'épithélium pulmonaire, au travers de l'étude de l'activité de la Lactate DésHydrogénase (LDH). L'activité macrophagique alvéolaire a été étudiée via la mesure de cytokines pro-inflammatoires (TNF- α et IL-1 β). Les résultats de l'étude sont présentés dans le Tableau 55. Les auteurs concluent que des expositions de courte durée aux émissions de bitumes n'induisent pas d'infiltration des neutrophiles, n'altèrent pas l'activité LDH, ni le contenu protéique ou l'activité macrophagique au niveau des poumons. Ils suggèrent que les expositions n'induisent pas de toxicité aigue ou d'inflammation au niveau pulmonaire. Les auteurs ont également mesuré l'activité et l'expression des cytochromes P450 1A1 et 2B1 (respectivement CYP1A1 et CYP2B1) intervenant dans la métabolisation des HAP. Ils ont observé une augmentation significative de l'activité et de l'expression des CYP1A1 et une réduction significative de l'activité et de l'expression des CYP2B1 chez les rates exposées aux émissions de bitume. Les auteurs ont indiqué que ces modifications des capacités de métabolisation des HAP pouvaient favoriser l'activation de ces composés et augmenter leur toxicité au niveau pulmonaire.

Tableau 55 : Résultats des paramètres mesurés dans les 8 groupes d'animaux étudiés d'après Ma, Rengasamy *et al.* (2003)

	Liquide de lavage bronchique			Activité macrophagique alvéolaire			
	PNN (x10 ⁶)	LDH (U/L)	Protéine (mg.mL ⁻¹)	TNF-α (ng/10 ⁶ AM)		IL-1β (dpm/10 ⁶ AM)	
				- LPS	+ LPS	- LPS	+ LPS
Moyenne arithmétique (écart-type)							
3,5 h/j – 10,4 mg.m ⁻³ (182 mg.hr/m ⁻³)							
Contrôles	Non renseigné			388 (83)	15 038 (3 153)	906 (157)	84 504 (11 878)
Exposés				382 (134)	12 522 (3 248)	851 (68)	60 798 (12 091)
3,5 h/j – 23,6 mg.m ⁻³ (413,5 mg.hr/m ⁻³)							
Contrôles	1,04 (0,15)	49 (5)	0,57 (0,06)	Non renseigné			
Exposés	0,79 (0,05)	56 (5)	0,5 (0,04)				
6 h/j – 16,7 mg.m ⁻³ (547 mg.hr/m ⁻³)							
Contrôles	0,72 (0,08)	49 (4)	0,37 (0,04)	396 (61)	3 001 (1 578)	1 756 (168)	3 509 (905)
Exposés	0,79 (0,06)	60 (5)	0,4 (0,05)	740 (187)	5 162 (1 993)	1 550 (201)	2 529 (496)
6 h/j – 57,8 mg.m ⁻³ (1 734 mg.hr/m ⁻³)							
Control	1,22 (0,16)	85 (4)	0,43 (0,01)	1 507 (340)	Non renseigné	2 011 (243)	Non renseigné
Exposés	0,71 (0,07)	83 (11)	0,42 (0,03)	3 723 (1 111)		2 080 (378)	

Antonini, Roberts *et al.* (2003) ont réalisé une étude sur 6 rats Sprague Dawley exposés à des émissions de bitumes chauffées à 120 °C (72,6 ± 4,95 mg.m⁻³, particules totales) à raison de 6 heures/j pendant 5 j. Un groupe contrôle de 6 rats exposés par inhalation en chambre d'inhalation à de l'air filtré a été également inclus dans l'étude. 24 heures après le début de l'exposition, les rats ont été infectés par une inoculation intratrachéale de *Listeria monocytogenes* à 5 x 10⁵ cellules. Des prélèvements de liquide de lavage broncho-alvéolaire (LBA) ont été réalisés avant l'infection puis 3 et 7 jours après. Des comptages cellulaires (macrophages et PNN), des mesures de l'activité LDH, de l'activation lymphocytaire (Lymphocytes T (LT) CD4+ et CD8+), de la production d'espèces réactives de l'azote (ERN) et de l'oxygène (ERO), des concentrations de cytokines (interféron-γ, TNF-α, et interleukines-1β, 2, 6 et 10), et d'albumine ont été réalisés dans ces liquides. Les auteurs indiquent que le groupe des rats exposés aux émissions de bitume présentait, avant l'infection bactérienne, une augmentation du nombre de macrophages dans les liquides de LBA alors que les autres marqueurs d'inflammation (PNN) et d'altération de l'homéostasie bronchopulmonaire (albumine et activité LDH) n'étaient pas modifiés. Les mesures d'ERO et d'ERN, des interférons et interleukines n'ont pas montré d'augmentation du stress oxydant (e.g. ERO et ERN) et de l'inflammation (e.g. cytokines) au niveau pulmonaire chez les rats exposés aux émissions de bitumes. Ces mêmes variables étaient augmentées après la réalisation de l'infection mais aucune différence n'a été observée entre les groupes exposés à l'air filtré ou aux bitumes.

Une étude de Sikora, Stone *et al.* (2003) a été menée sur 7 rates Sprague Dawley exposées en chambre d'inhalation (corps entier) aux émissions de bitume générées à 150 °C à une concentration en gaz et particules de 16 mg.m⁻³ à raison de 3,5 heures/j pendant 5 j. Le groupe contrôle était composé de 7 rates exposées à de l'air filtré dans les mêmes conditions. L'étude a montré une réaction inflammatoire chez les rats exposés par rapport au groupe contrôle avec une augmentation significative des proportions de cellules inflammatoires neutrophiles, 5,3 % et 1,3 % en moyenne respectivement de macrophages, 22 % et 2,4 % en moyenne, dans le liquide de lavage de la cavité nasale.

Fuhst, Creutzenberg *et al.* (2007) ont réalisé une étude de cancérogénèse chez des rats de souche Wistar exposés pendant 24 mois par inhalation uniquement « nose-only » à des condensats de fumées de bitumes. Cette étude est la seule étude *in vivo* de cancérogénèse ayant trait à l'exposition à des condensats de fumées de bitumes par inhalation « nose-only » publiée à ce jour. D'après les auteurs, le modèle de rongeurs utilisé dans cette étude (Wistar) avait déjà montré une sensibilité aux effets biologiques pulmonaires induits par les HAP.

Fuhst, Creutzenberg *et al.* (2007) ont développé un protocole expérimental dans l'objectif de se rapprocher au plus près des conditions d'exposition observées dans les études de terrain. Il s'agit d'exposer des rongeurs, mâles et femelles, âgés de 8 semaines au début de l'étude, à des condensats de fumées de bitumes collectés à 175°C. Ces condensats étaient constitués majoritairement (~70%) de bitumes de classe 2 (*i.e.* « air-rectified bitumens » ; CAS 64742-93-4), la fraction résiduelle (~30%) renfermant des bitumes de classe 1 (*i.e.* « straight-run bitumens » ; CAS 64741-56-6). En se référant à des études relatives au développement puis à la validation de procédés de laboratoire permettant la génération/régénération de fumées de bitumes ainsi que le prélèvement et la caractérisation physicochimique de condensats de fumées de bitumes (Pohlmann, Preiss *et al.* 2006a; Pohlmann, Preiss *et al.* 2006b; Preiss, Koch *et al.* 2006), les auteurs ont indiqué que leur protocole d'exposition était représentatif des situations d'exposition réelles des travailleurs sur les chantiers de travaux routiers.

Deux groupes de rats de souche Wistar d'exposition dite « moyenne » (constitués de 50 rats mâles et 50 rats femelles chacun) et un groupe d'exposition dite « élevée » (constitué de 86 rats mâles et 86 rats femelles) ont été exposés par inhalation « nose-only » à des concentrations de condensats de fumées de bitumes respectivement équivalentes à 4, 20 et 100 mg d'hydrocarbures totaux/m³, 6h/j, 5j/sem, pendant une période maximale de 24 mois. Le groupe contrôle était constitué de 86 mâles et 86 femelles exposés à de l'air purifié. Par ailleurs dans chaque groupe (contrôle ou exposés) 6 rats ont fait l'objet d'un lavage broncho-alvéolaire à 7 jours (2 rats par groupe), 90 jours (2 rats par groupe) et 52 semaines (2 rats par groupe).

Les auteurs rapportent une mortalité comparable dans tous les groupes d'exposition, avec toutefois une sensibilité légèrement accrue, non expliquée, des femelles comparativement aux mâles. Des hyperplasies broncho-alvéolaires ont été observées chez les mâles et les femelles exposées à la plus forte concentration de condensats de bitumes (*i.e.* 100 mg d'hydrocarbures totaux/m³).

Fuhst, Creutzenberg *et al.* (2007) ont aussi montré des effets non-néoplasiques. (*i.e.* irritants), peu à plus marqués, suite à l'exposition pendant 24 mois aux condensats de fumées de bitumes, principalement au niveau de la cavité nasale et des poumons (*i.e.* lésions dégénératives dépendantes de la dose, inflammatoires et prolifératives). A plusieurs reprises, des résultats apparaissent comme discordants entre les groupes de rats de souche Wistar mâles et femelles sans que les auteurs n'apportent d'éléments susceptibles de supporter leurs observations. Les auteurs ont fait l'hypothèse que les lésions hyperplasiques des cellules épithéliales olfactives et respiratoires, peut-être associées à un phénomène régénératif, étaient potentiellement pré-néoplasiques (voir Tableau 56 ci-après). Il est

cependant à noter que le choix du modèle animal utilisé dans cette étude n'est peut-être pas pertinent dans la mesure où les animaux non exposés présentent eux-mêmes un taux de tumeurs spontanées très élevé pour certains organes cibles.

**Tableau 56 : Effets respiratoires non-néoplasiques
(Fuhst, Creutzenberg *et al.* 2007)**

	Mâles				Femelles			
	Contrôle	4 mg.m ⁻³	20 mg.m ⁻³	100 mg.m ⁻³	Contrôle	4 mg.m ⁻³	20 mg.m ⁻³	100 mg.m ⁻³
Cavités nasales/para nasales								
<i>Hyperplasie des cellules basales de l'épithélium olfactif</i>	0	1	1	20***	0	0	3	27***
<i>Hyperplasie de l'épithélium respiratoire</i>	0	3	3	13***	0	0	2	20***
<i>Hyperplasie des cellules muqueuses</i>	1	11**	25***	46***	7	10	37***	47***
<i>Inclusions cytoplasmiques éosinophiles de l'épithélium olfactif</i>	1	13***	16***	31***	12	11	27***	38***
<i>Inclusions cytoplasmiques éosinophiles de l'épithélium respiratoire</i>	2	5	7	22***	7	3	21**	24***
<i>Infiltration de cellules mononucléées / inflammatoires dans la muqueuse</i>	2	8	18***	27***	11	5	22*	34***
Poumons								
<i>Hyperplasie bronchiolo-alvéolaire (bronchiolisation de l'épithélium alvéolaire)</i>	4	1	22***	46***	6	7	21**	44***
<i>Histiocytose alvéolaire</i>	32	31	47***	50***	39	34	44	50***
<i>Granulome à cholestérol</i>	0	3	8**	3	0	0	6*	1
<i>Infiltration de cellules mononucléées / inflammatoires</i>	7	2	9	37***	2	3	8	39***
Ganglions lymphatiques pulmonaires								
<i>Accumulation de macrophages spumeux (histiocytose)</i>	1	1	0	12**	1	2	5	26**

Différence significative dans un test exact de Fisher, entre le groupe contrôle et le groupe exposé : *P < 0,05 ; **P < 0,01 ; ***P < 0,001

Parker, Schreiner *et al.* (2011) ont réalisé une étude sur des rats Wistar (12 mâles, 12 femelles et 12 femelles gestantes pour chaque dose) exposés (nose-only) à des condensats de fumées de bitumes (BURA, CAS 64742-93-4) à 30, 100 et 300 mg.m⁻³ (HCT : hydrocarbures totaux), 6 heures/j, 7 jours/sem pendant 28 jours. Les condensats ont été générés selon un processus se rapprochant au mieux des conditions d'exposition observées dans des études de terrain. Un groupe contrôle (12 mâles, 12 femelles et 12 femelles gestantes) a été exposé à de l'air filtré selon le même protocole d'exposition. Les auteurs rapportent une augmentation significative des poids relatifs des poumons dans les 3 groupes d'animaux (mâles, femelles et femelles gestantes), à la concentration de 300 mg.m⁻³. Les autres effets étudiés sont présentés au chapitre 8.3.5.1. Les auteurs ont observé une

augmentation du poids des poumons, sans donner d'explication particulière (mécanique ou biologique).

8.2.4 Effets sur le système cardiovasculaire

8.2.4.1 Etudes chez l'homme

Randem, Langard *et al.* (2003), cités précédemment, ont également étudié les associations possibles entre l'exposition professionnelle au bitume et la mortalité par pathologies cardio-vasculaires dans une cohorte de travailleurs masculins norvégiens incluse dans la cohorte multi-centrique européenne. Pour rappel, la mortalité chez les travailleurs exposés aux produits bitumineux était non significativement inférieure à celle de la population générale (SMR = 0,92 ; IC95% [0,86 – 0,99]). Certaines causes de mortalité étaient moins fréquentes chez les travailleurs du bitume qu'en population générale : affections cardio-vasculaires (SMR = 0,93 ; IC95% [0,83 – 1,03]) et affections digestives (SMR = 0,92 ; IC95% [0,58 – 1,40]). L'application de la matrice semi quantitative emploi-exposition (ROCEM) a par ailleurs mis en évidence une diminution de la mortalité par pathologies cardio-vasculaires en fonction de l'exposition cumulée aux HAP ($\text{ng.m}^{-3}.\text{an}$) ou de l'exposition cumulée aux émissions de bitume ($\text{mg.m}^{-3}.\text{an}$). Les résultats sont les suivants :

	Mesure	Groupe d'exposition	n	SMR	Intervalle de confiance à 95 %
HAP	Exposition cumulée ($\text{ng.m}^{-3}.\text{an}$)	Inconnu	11	1,28	0,64 – 2,29
		0 à 23,49	121	0,96	0,80 – 1,14
		23,5 à 59,9	93	0,94	0,76 – 1,15
		> 60	85	0,83	0,67 – 1,04
Émissions de bitume	Exposition cumulée ($\text{mg.m}^{-3}.\text{an}$)	Inconnu	11	1,28	0,64 – 2,29
		0 à 9,9	115	0,94	0,79 – 1,13
		10 à 25,89	98	0,94	0,760 – 1,14
		> 25,9	86	0,86	0,69 – 1,06

Burstyn, Kromhout *et al.* (2005) ont étudié la relation entre l'exposition aux HAP et la mortalité par cardiopathie ischémique (418 cas de décès par cardiopathie ischémique) de 1953 à 2000 dans l'étude de cohorte européenne multicentrique. L'exposition au B[a]P a été évaluée sur la base d'informations fournies par les représentants de l'entreprise (matrice emploi-exposition ROCEM). Le risque de mortalité par cardiopathie ischémique était significativement augmenté avec l'exposition au B[a]P (indice d'exposition cumulée ou concentrations atmosphériques estimées). Des résultats similaires ont été observés pour l'exposition au goudron de houille (résultats non présentés ici). Après prise en compte du tabagisme, il demeure environ 20 % à 40 % d'excès de risque de mortalité par cardiopathie ischémique pour les expositions les plus fortes (B[a]P en indice d'exposition cumulée ou en concentration atmosphérique moyenne). Les résultats sont présentés dans le Tableau 57.

Cette étude ne montre pas d'augmentation statistiquement significative du risque de mortalité par cardiopathies ischémiques ou de trouble cardiovasculaire associée à une exposition cumulée au B[a]P, mais une relation dose-réponse est suggérée. Lorsque le niveau d'exposition est exprimé en concentration moyenne de B[a]P, l'étude montre:

- une augmentation du risque de mortalité par troubles cardio-vasculaires en lien avec l'exposition au B[a]P dès le premier groupe d'exposition (68 ng.m^{-3}) et avec une relation dose-réponse hautement significative ;
- une augmentation du risque de cardiopathies ischémiques au dessus de 272 ng.m^{-3} de B[a]P avec une faible relation dose-réponse.

Tableau 57 : risque de mortalité par troubles cardiovasculaires (d'après Burstyn, Kromhout *et al.* (2005))

	Mesure	Groupe d'exposition	Troubles cardiovasculaires		Cardiopathies ischémiques	
			Risque relatif	Intervalle de confiance à 95 %	Risque relatif	Intervalle de confiance à 95 %
B[a]P	Exposition cumulée (ng.m ⁻³ .an)	0 - 189	1,00		1,00	
		189 - 501	1,08	0,85 – 1,38	0,99	0,72 – 1,36
		502 - 931	1,06	0,80 – 1,42	1,22	0,86 – 1,74
		932 - 2012	1,24	0,89 – 1,71	1,24	0,82 – 1,85
		> 2012	1,42	0,96 – 2,09	1,58	0,98 – 2,55
		<i>p</i>	0,09		0,06	
	Exposition moyenne (ng.m ⁻³)	>0 - < 68	1,00		1,00	
		68 - < 105	1,30	1,01 – 1,67	1,13	0,82 – 1,55
		106 - 146	1,55	1,18 – 2,05	1,33	0,94 – 1,90
		147 - 272	1,45	1,09 – 1,93	1,20	0,84 – 1,71
		> 272	1,58	1,16 – 2,15	1,64	1,13 – 2,38
		<i>p</i>	< 0,001		0,02	

Toren, Bergdahl *et al.* (2007) ont suivi une cohorte de 176 309 travailleurs suédois exposés aux particules dans le secteur de la construction et 71 778 travailleurs suédois de la construction non exposés aux particules. L'exposition aux poussières minérales (amiante, fibres minérales artificielles, poussière de ciment, de béton et de quartz), à la poussière de bois, aux fumées (fumées de métaux, émissions de bitume), aux gaz d'échappement de moteur diesel et aux gaz irritants (solvants organiques et chimiques réactifs) a été estimée à partir d'une matrice emploi-exposition (ROCEM). La cohorte a fait l'objet d'un suivi entre 1972 et 2002. Les auteurs se sont intéressés à la mortalité associée aux cardiopathies ischémiques et maladies cérébrovasculaires. Les données ne montrent pas d'excès de risque de cardiopathie ischémique (RR 1,15 IC 95 % : 0,96 - 1,30), ou d'augmentation des maladies cérébrovasculaires.

Tompa, Jakab *et al.* (2007) ont réalisé une étude avec 122 travailleurs hongrois dont 33 professionnels non exposés aux émissions de bitume (âge moyen 40 ans ; 45 % fumeurs), 23 professionnels pouvant être exposés occasionnellement (chefs de chantier) (âge moyen 46 ans ; durée moyenne d'emploi 6 ans; 39 % fumeurs), 23 travailleurs de petits travaux (hand pavers) (âge moyen 33 ans ; durée moyenne d'emploi 9 ans; 78 % fumeurs), 28 conducteurs de finisseurs (âge moyen 39 ans ; durée moyenne d'emploi 14 ans; 50 % fumeurs) et 15 travailleurs d'une centrale d'enrobés (âge moyen 39 ans ; durée moyenne d'emploi 12 ans; 87 % fumeurs). Le bitume est chauffé à 150 °C, les travailleurs de petits travaux portaient des protections individuelles (masques et gants), les conducteurs de finisseurs travaillaient en cabine sans extraction adéquate et les travailleurs de la centrale d'enrobés travaillaient en environnement clos. Un examen clinique a été réalisé dans le cadre du suivi médical des professionnels. Tous les groupes de professionnels exposés présentaient une augmentation de la prévalence de l'hypertension par rapport aux professionnels non-exposés. Au vu de l'ensemble des résultats de cette étude il semble que les troubles cardiovasculaires ne soient pas expliqués uniquement par l'exposition aux émissions de bitume dans la mesure où les professionnels du bitume présentaient plus de cholestérol, une glycémie plus élevée, une hypertension artérielle et plus de troubles de la fonction hépatique que la population de référence. Indépendamment de cette observation, les résultats de cette étude sont difficiles à interpréter dans la mesure où 1) les résultats des

mesures effectuées pour apprécier les différents effets ne sont pas rapportés et 2) les auteurs n'indiquent pas s'ils ont réalisé des tests statistiques pour comparer les prévalences.

8.2.4.2 Etudes chez l'animal

Aucune donnée chez l'animal n'a été recensée dans la littérature.

8.2.5 Effets sur le tractus gastrointestinal

Aucune donnée chez l'homme ou l'animal n'a été recensée dans la littérature.

8.2.6 Effets hématologiques

Aucune donnée chez l'homme n'a été retrouvée dans la littérature.

8.2.6.1 Etudes chez l'animal

L'étude de Parker, Schreiner *et al.* (2011) citée précédemment ne rapporte aucun effet significatif sur les paramètres hématologiques mesurés incluant le nombre d'érythrocytes, de leucocytes et de plaquettes, la formule leucocytaire, le taux hémoglobine, le volume globulaire moyen, l'hématocrite et le taux de prothrombine.

8.2.7 Effets hépatiques

8.2.7.1 Etudes chez l'homme

L'étude de Tompa, Jakab *et al.* (2007) citée précédemment rapporte une augmentation de la prévalence des valeurs anormales de marqueurs d'altération hépatique (dosage des aspartate et alanine aminotransférase (ASAT et ALAT), gamma glutamyl transférase (γ GT) chez les professionnels exposés par rapport aux témoins non exposés. L'étude ne présente pas les détails des concentrations d'enzymes hépatiques et ne prend pas en compte les facteurs confondants de l'altération de la fonction hépatique. Les limites de cette étude sont rapportées au chapitre 8.2.4.1. Il est à noter que la population contrôle était aussi celle qui avait la plus faible proportion de consommateurs « réguliers » d'alcool (60 % contre 68 à 82 % chez les professionnels exposés).

8.2.7.2 Etudes chez l'animal

L'étude de Parker, Schreiner *et al.* (2011) citée précédemment ne rapporte aucune modification de la variation relative du poids du foie ainsi que des différents paramètres hépatiques mesurés dans le sang (activités de l'aspartate et de l'alanine aminotransférase, de la gamma glutamyl transférase, de la phosphatase alcaline, taux de bilirubine) tant chez les mâles que chez les femelles.

8.2.8 Effets rénaux

8.2.8.1 Etudes chez l'homme

L'étude de Tompa, Jakab *et al.* (2007) citée précédemment rapporte une augmentation de la prévalence des valeurs anormales de marqueurs d'altération rénale (exemple : augmentation de la N-acétylglucosaminidase, marqueur précoce de tubulopathie) chez les professionnels exposés par rapport aux non exposés. Les limites de cette étude sont rapportées au chapitre 8.2.4.1.

8.2.8.2 Etudes chez l'animal

Aucune donnée chez l'animal n'a été recensée dans la littérature.

8.2.9 Effets endocriniens

Aucune donnée chez l'homme ou l'animal n'a été recensée dans la littérature.

8.2.10 Effets sur le système immunitaire

8.2.10.1 Etudes chez l'homme

Dans l'étude de Tompa, Jakab *et al.* (2007) citée précédemment, plusieurs dosages de marqueurs d'immunotoxicité ont été réalisés. L'étude a montré une diminution significative du nombre de lymphocytes NK (natural killer) T chez les conducteurs de finisseurs et les travailleurs de petits travaux du bitume par rapport aux témoins non professionnellement exposés. Il n'y a pas eu de différences significatives observées au niveau des autres groupes de professionnels exposés. L'activation lymphocytaire (augmentation du pourcentage de lymphocytes T CD25 helper) a été mise en évidence dans tous les groupes de professionnels exposés par rapport aux travailleurs non exposés. Cette augmentation n'est cependant significative que chez les travailleurs de petits travaux du bitume et les opérateurs de centrale d'enrobés. Selon les auteurs, les expositions professionnelles aux HAP pourraient être responsables d'une immunotoxicité mise en évidence par la suppression de la prolifération des LT et l'augmentation de l'activité des lymphocytes NK à de faibles expositions. Cette étude montre un effet immuno-modulateur de l'exposition aux HAP, avec une activation lymphocytaire mise en évidence par l'augmentation du pourcentage des LT CD25 helper et/ou des lymphocytes B CD71 dans les trois groupes de travailleurs exposés. Les limites de cette étude sont présentées au chapitre 8.2.4.1.

8.2.10.2 Etudes chez l'animal

L'étude d'Antonini, Roberts *et al.* (2003) citée précédemment rapporte la capacité de réponse immunitaire de rats exposés aux émissions de bitume après l'infection à *Listeria monocytogenes*. Trois jours après l'infection, les marqueurs d'inflammation (macrophages et polynucléaires) et de cytotoxicité bronchopulmonaire (albumine et activité LDH) étaient augmentés dans tous les groupes d'animaux par rapport aux mesures réalisées avant l'infection. Sept jours après l'infection, tous ces paramètres étaient revenus à des niveaux similaires à ceux mesurés avant l'infection. Les auteurs concluent qu'il n'y a pas d'altération délétère de la réponse immunitaire au niveau pulmonaire.

Anderson, Munson *et al.* (2008) ont étudié les effets immunotoxiques de l'exposition à des émissions de bitume chez la souris B6C3F1. Les souris (5 par groupe) ont été exposées soit

par inhalation à des émissions de bitume (variété de multigrade : PG 64-22) chauffées à 150 °C, soit par voie cutanée à des condensats de émissions du même bitume appliqués sur la peau (1 ; 50 ; 100 ; 250 et 500 mg.kg⁻¹). Dans l'expérimentation par inhalation, les souris ont été exposées 3,5 heures/j, 5 jours/semaine pendant 1 ou 2 semaines, soit aux fumées de bitume (35 mg.m⁻³) soit uniquement à la phase vapeur (11 mg.m⁻³) (10 souris par couple durée/concentration).

Tableau 58 : Protocole d'exposition utilisé par Anderson, Munson *et al.* (2008).

Administration	Modèle	Conditions d'exposition			
		Bitume à usage routier (PG 64-22)			
	Souris B6C3F1, femelles	Condensat de fumées de bitume (160°C)	Fumées de bitume (170°C)	Phase gazeuse issue de fumées de bitume (170°C)	Phase particulaire issues des fumées de bitume (170°C)
Voie systémique (injection intra-péritonéale)	n = 5	0 - 5 mg/kg 5 injections en 1 sem			0 - 40 mg/kg 5 injections en 1 sem
Voie intra-pharyngale	n = 5	0 - 5 mg/kg 4 injections en 3 sem			
Inhalation (corps entier)	n = 10		35 mg/m ³ 3,5h/j 5j/sem 1 ou 2 sem	11 mg/m ³ 3,5h/j 5j/sem 1 ou 2 sem	
Voie cutanée (application face dorsale des oreilles)	n = 5	1 - 500 mg/kg 4 applications en 4 j			

Les auteurs rapportent les concentrations moyennes de certains HAP :

- Naphtalène : 146,3 µg.m⁻³ (± 12,8)
- Fluorène : 8,7 µg.m⁻³ (± 4,4)
- Pyrène : 3,3 µg.m⁻³ (± 5,9)

Les auteurs ont étudié la réponse immunitaire spécifique via les immunoglobulines M (IgM) correspondant à la première réponse décelable.

L'exposition des souris par injection intrapéritonéale aux condensats de fumées de bitume et à la phase particulaire des fumées de bitume a provoqué une suppression dose-dépendante de la réponse spécifique des IgM. L'injection des doses les plus faibles de condensats de fumées (i.e. 0,0625 mg/kg) ou de la phase particulaire issue des fumées de bitume (i.e. 5 mg/kg) a respectivement réduit la réponse spécifique des IgM de 36% et 40%. Ces pourcentages étaient respectivement de 57 et 69% suite à l'injection des plus fortes doses (i.e. 5 mg/kg pour les condensats de fumées et 40 mg/kg pour la phase particulaire issue des fumées de bitume).

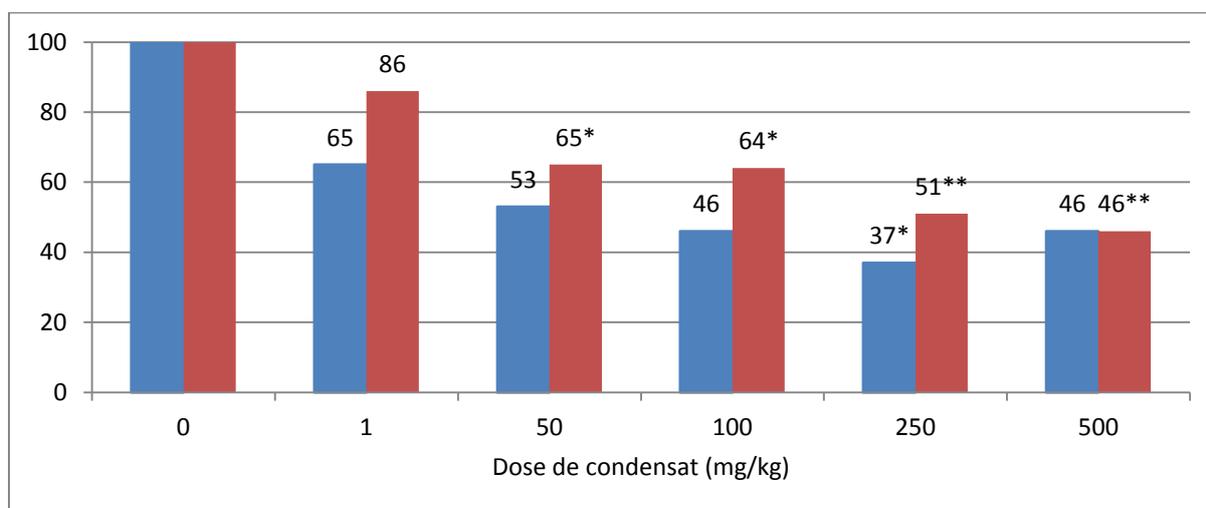
Des résultats similaires ont été rapportés par ces auteurs chez les souris exposées par injection intra-pharyngale aux condensats de fumées de bitumes, avec une réduction statistiquement significative de la réponse spécifique des IgM de 10% à 58% en réponse à des doses de 0,25 à 5 mg/kg de condensats de fumées de bitume.

De même, l'inhalation par les souris de condensats de fumées de bitume et de la phase gazeuse des fumées de bitume a provoqué une réduction statistiquement significative de la réponse spécifique des IgM. A noter que, du fait de la grande variabilité de réponse des

animaux contrôles, cet effet était plus marqué après 5 jours d'exposition (i.e. respectivement 53% et 30% pour les condensats de fumées et la phase gazeuse issue des fumées de bitume) qu'après 10 jours (i.e. respectivement 41% et 23% pour les condensats de fumées et la phase gazeuse issue des fumées de bitume).

L'application cutanée de condensats de fumées de bitume (i.e. de 1 à 500 mg/kg) sur ce modèle murin a engendré une réduction statistiquement significative non seulement de la réponse spécifique (i.e. de 35% à 54%) mais aussi de la réponse totale (i.e. de 14% à 54%) des IgM (Figure 39).

Quelle que soit la voie d'administration considérée, l'exposition au bitume a induit une altération significative de la réponse spécifique et/ou totale des IgM, et ce en dépit de l'observation de tout signe général de toxicité (évaluée par une éventuelle variation du poids corporel ou des organes).



En bleu la réponse correspond au % de PFC/10⁶ cellules, en rouge la réponse correspond au % de PFC*10³ cellules/rate. * p<0,05 ; ** p<0,01

Figure 39 : Relation dose-réponse entre l'activité IgM et les doses de condensat appliquées sur la peau (d'après Anderson, Munson *et al.* (2008)).

8.2.11 Effets neurologiques

8.2.11.1 Etudes chez l'homme

Aucune donnée chez l'homme n'a été recensée dans la littérature.

8.2.11.2 Etudes chez l'animal

L'étude de Parker, Schreiner *et al.* (2011) décrite précédemment ne montre pas de modification de l'activité locomotrice des animaux après 28 jours, ni de différence concernant les tests d'observations fonctionnelles (FOB test battery).

Dans l'étude de Sikora, Stone *et al.* (2003) citée précédemment des mesures immunohistochimiques ont été réalisées afin d'évaluer l'expression de la substance P et du peptide relié au gène de la calcitonine (PRGC) dans les neurones sensoriels du ganglion trigéminal qui innervent la muqueuse nasale. Les résultats ont montré une augmentation

significative du nombre de neurones sensoriels présentant un marquage positif pour la substance P et le PRGC chez les rates exposées par rapport aux animaux non-exposés. En parallèle, un accroissement significatif du nombre de polynucléaires neutrophiles et des macrophages a été observé dans le liquide de lavage de la cavité nasale. L'ensemble de ces résultats indique donc qu'une exposition aux fumées de bitumes induit une réaction inflammatoire au niveau de la cavité nasale concomitante avec l'induction de l'expression de neuropeptides dans les neurones sensoriels du ganglion trigéminal qui innervent l'épithélium olfactif.

8.2.12 Effets sur la reproduction

8.2.12.1 Etudes chez l'homme

Aucune donnée chez l'homme n'a été recensée dans la littérature.

8.2.12.2 Etudes chez l'animal

L'étude de Parker, Schreiner *et al.* (2011) précédemment décrite ne rapporte aucun effet indésirable sur le comportement sexuel et les performances de reproduction de ces mâles. De même, aucun effet délétère sur la spermatogenèse n'a été rapporté à l'exception d'une baisse non significative du nombre de spermatozoïdes avec l'accroissement du niveau d'exposition.

8.2.13 Effets sur le développement

8.2.13.1 Etudes chez l'homme

Aucune donnée chez l'homme n'a été recensée dans la littérature.

8.2.13.2 Etudes chez l'animal

Les résultats de l'étude de Parker, Schreiner *et al.* (2011) ont montré l'absence d'effets de l'exposition aux fumées de bitumes sur les performances de reproduction des femelles, la durée de la gestation, le nombre de jeunes à la naissance, le sex-ratio au sein des portées et le poids des jeunes à la naissance. De même, la croissance corporelle des jeunes mesurée entre la naissance et le 4^{ème} jour de vie postnatale n'a pas été différente suivant les groupes exposés. Il est à noter que le suivi des jeunes n'a pas été poursuivi au-delà du 4^{ème} jour de vie postnatale.

8.2.14 Autres effets

8.2.14.1 Etudes chez l'homme

Dans l'étude de Tompa, Jakab *et al.* (2007) citée précédemment, des prélèvements sanguins ont été réalisés pour mesurer des paramètres métaboliques (cholestérolémie et glycémie). Tous les groupes (professionnels exposés et professionnels non-exposés) présentent une augmentation de prévalence des hypercholestérolémies et des hyperglycémies par rapport à la population générale hongroise (les limites de cette étude sont citées précédemment).

8.2.14.2 Etudes chez l'animal

L'étude de Parker, Schreiner *et al.* (2011) montre une baisse du poids des animaux ainsi que de la quantité de nourriture consommée uniquement chez les mâles exposés à un niveau de 300 mg.m⁻³. Cette baisse est principalement liée à la première phase de l'exposition (les 14 premiers jours des 28 jours d'exposition).

8.3 Pathologies cancéreuses

8.3.1 Classement du CIRC

Le CIRC a évalué en octobre 2011 la cancérogénicité de l'exposition aux fumées de bitume (IARC 2013). Les résultats de la monographie sont présentés dans le Tableau 59 ci-dessous.

Tableau 59 : Niveaux de preuve de cancérogénicité selon la nature du produit et le type d'application et classement du CIRC du potentiel cancérogène (IARC 2013)

	Niveau de preuve			Classement
	Homme (H)	Animal	Mécanismes	
Roofing – oxidised bitumen	Limité	Suffisant	Faible	2A
Mastic asphalt workers – hard bitumen	Limité	Inadéquat	Faible	2B
Paving – straight run bitumen	Inadéquat	Inadéquat	Fort (génétoxicques)	2B

8.3.2 Revue des études épidémiologiques par le CIRC

8.3.2.1 Introduction

Au total, l'expertise menée par le groupe d'experts réunis au CIRC s'est appuyée sur 10 études de cohorte publiées entre 1975 et 2000, 9 études cas témoins, 2 méta-analyses et l'étude de cohorte multicentrique Européenne développée par le CIRC (Dr P. Boffetta). Le groupe d'experts réunis au CIRC a fondé ses conclusions principalement sur les résultats d'une méta-analyse (Partanen and Boffetta 1994), les études épidémiologiques publiées après cette méta-analyse et l'étude de cohorte multicentrique Européenne du CIRC. Ce groupe d'experts a évalué l'effet cancérogène de l'exposition aux fumées de bitume dans 3 groupes de professionnels : les professionnels des travaux routiers (road pavers) (i.e conducteurs de finisseurs, régleur, ratisseurs, conducteurs de compacteurs, décapeur...), les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité (roofers) et les travailleurs de l'asphaltage (mastic asphalt applications). D'autres secteurs d'activité (production, transport) ont également été analysés mais les experts ont estimé que les publications concernant ces professions n'apportaient pas d'information sur le potentiel cancérogène des produits bitumineux. Pour chacun de ces 3 groupes « d'exposition » les experts réunis au CIRC ont évalué le risque de cancer du poumon, de la vessie, des voies aéro-digestives supérieures (VADS) et autres cancers.

8.3.2.2 Travailleurs de la route (road pavers)

Cancer du poumon

La méta-analyse de 1994 n'avait pas montré d'excès de cancers du poumon dans ce groupe de travailleurs (OR = 0,87 ; 95 % CI : 0,76 - 1,08). Neuf études épidémiologiques avaient été publiées depuis cette date, 3 études cas témoins et 6 études de cohorte. Les résultats des études de cohorte avaient mis en évidence des associations non significatives avec des RR entre 0,9 et 1,6. Parmi les 3 études cas témoins, une seule avait mis en évidence une association significative (OR = 3,8 ; 95 % CI : 1,6 – 13,2) pour un groupe de travailleurs regroupant travaux routiers (road pavers), des travailleurs creusant la route (excavating workers) et des tuyauteurs. Le groupe d'experts réunis au CIRC a souligné la possibilité d'une exposition concomitante à l'amiante et à la silice, non prise en compte dans l'étude et susceptible d'expliquer une partie de l'augmentation de cancers du poumon.

L'étude de cohorte multicentrique européenne a mis en évidence une augmentation modérée significative de la mortalité par cancer du poumon chez les professionnels des travaux routiers par rapport à la mortalité par cancer du poumon de la population générale (SMR = 1,17 ; 95 % CI : 1,01- 1,35), qui devenait cependant non significative lorsque la mortalité du groupe exposé était comparée à celle des travailleurs du bâtiment (ground and building construction) (RR = 1,08 ; 95 % CI : 0,89 - 1,34). Le groupe d'experts réunis au CIRC a noté que cette diminution du risque pouvait en partie être liée à des expositions à d'autres cancérogènes (silice, amiante) chez les travailleurs du groupe de référence (bâtiment).

L'étude des relations dose-réponse au sein de la cohorte multicentrique européenne a montré une relation dose-réponse significative avec la mortalité par cancer du poumon en fonction du niveau moyen d'exposition sur toute la vie, mais pas de lien ni avec le niveau cumulé, ni avec la durée d'exposition. La prise en compte d'un temps de latence n'a pas modifié ces résultats. La relation dose effet avec l'exposition moyenne n'a pas été confirmée dans l'étude cas témoins nichée dans la cohorte.

Au total, les experts réunis au CIRC ont estimé que les données en faveur d'un excès de risque de cancer du poumon chez professionnels des travaux routiers sont incohérentes et les risques relatifs observés sont au mieux très modestement élevés.

Autres cancers

Le groupe d'experts réunis au CIRC a revu les résultats sur les cancers de la vessie, des voies aéro-digestives supérieures de l'estomac, du rein, de la peau et les leucémies.

Globalement le trop petit nombre d'études ayant publié des résultats sur ces cancers chez les travailleurs de la route a conduit les experts réunis au CIRC à ne pas conclure quand à un effet cancérogène sur ces organes.

8.3.2.3 Travailleurs de la pose de produits d'étanchéité (roofers)

Le groupe d'experts réunis au CIRC a noté en introduction 5 points méthodologiques relatifs à l'expertise des études épidémiologiques portant sur l'étude du risque de cancer des travailleurs de la pose de produits d'étanchéité (roofers).

1°) L'exposition aux fumées de bitume dans ce groupe est relativement hétérogène entre les études et les pays. En effet, certains pays couvrent majoritairement les toits avec du « shingle » (ou bardeau). Dans ce cas l'exposition aux fumées de bitume est beaucoup plus faible que des travailleurs faisant de l'étanchéité de terrasse avec de l'asphalte. Ce point pourrait expliquer dans une certaine mesure la divergence des résultats entre les études.

2°) Les études de cohorte réalisées en milieu industriel peuvent mieux contrôler les expositions d'intérêt dans ce groupe de travailleurs.

3°) Les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité sont sans doute plus exposés aux fumées de goudron que les travailleurs de la pose d'enrobés car ils sont amenés à enlever la couche d'étanchéité précédente avant d'en remettre une nouvelle, et les anciennes couches étaient réalisées avec du goudron. Cette exposition aux fumées de goudron pourrait expliquer des risques de cancer du poumon plus élevés.

4°) Les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité peuvent également être exposés à de l'amiante en raison d'utilisation d'amiante ciment dans des couches précédentes que les travailleurs doivent retirer avant d'en reposer une nouvelle.

5°) Le type de bitume utilisé et la température d'application des bitumes dans le cadre d'étanchéité rendent l'émission de fumées de bitume plus forte.

Cancers du poumon

La méta-analyse de 1994 notait une augmentation significative du risque de cancer du poumon dans ce groupe de travailleurs (OR = 1,78 ; 95 % IC : 1,5 - 2,1). En revanche aucun excès n'a été observé dans l'étude de cohorte multicentrique Européenne (RR = 1,3 ; 95 % IC : 0,7 - 2,2).

Les experts réunis au CIRC ont par ailleurs revu l'ensemble des études incluant des travailleurs de la pose de produits d'étanchéité exposés aux fumées de bitume ainsi qu'au goudron. Ils ont noté un excès significatif de cancer du poumon, très probablement non lié au tabac car les excès de cancers du poumon étaient identiques dans les études ayant ajusté sur le tabac et dans celles n'ayant pas pu le faire. Le groupe d'experts réunis au CIRC a conclu que même s'il est peu vraisemblable que l'excès de cancer du poumon observé soit entièrement lié à une exposition aux fumées de bitume, il n'est pas possible d'exclure totalement cette possibilité.

Cancers de la vessie

L'excès de cancers de la vessie chez les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité a été étudié dans plusieurs études, dont les résultats sont globalement divergents. Deux études de cohorte ont mis en évidence un excès significatif de cancers de la vessie, non observé dans une étude cas témoins issue de la cohorte multi-centrique européenne. Cette étude n'a pas non plus mis en évidence d'excès de cancers de la vessie chez les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité, bien qu'elle ait montré un excès global non significatif de cancer de la vessie pour l'ensemble des travailleurs exposés aux fumées de bitume. Enfin, la poursuite du suivi de la partie scandinave de l'étude de cohorte européenne n'a pas mis en évidence d'excès de mortalité par cancer de la vessie chez les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité. D'après le groupe d'experts réunis au CIRC, il n'est pas possible de conclure à un excès de risque de cancers de la vessie associés aux fumées de bitume au vu de l'ensemble des études.

Cancers des VADS

Quatre études de cohorte publiées entre 1997 et 2000 ont montré des risques élevés de cancers des VADS mais le groupe d'experts réunis au CIRC a conclu qu'il n'était pas possible d'exclure que ces excès soient liés à des consommations d'alcool ou de tabac ou à d'autres expositions professionnelles élevées.

Autres cancers

Des excès de cancers de l'estomac, du rein, de la peau ou de leucémies ont été mis en évidence dans certaines études mais le groupe d'experts a souligné l'incohérence des résultats.

8.3.2.4 Asphalteurs (mastic asphalt workers)

Les expositions les plus élevées aux fumées de bitume concernent les asphalteurs, en raison de la forte température nécessaire pour appliquer ce matériel.

Peu d'études ont publié des résultats spécifiques pour ce groupe de travailleurs. La cohorte danoise d'asphalteurs avait mis en évidence une augmentation significative de la mortalité par cancer, ainsi qu'un fort excès significatif mais assez imprécis de cancer du poumon (SIR = 8,6 ; 95 % IC : 1,8 - 25). La cohorte multicentrique Européenne a également mis en évidence un excès de mortalité par cancer du poumon par rapport à la mortalité de la population générale.

Le groupe d'experts réunis au CIRC a jugé que l'excès de cancer du poumon observé dans le groupe des asphalteurs était cohérent avec l'augmentation du risque de cancer du poumon observé chez les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité.

8.3.2.5 Conclusion

Le groupe d'experts réunis au CIRC a conclu à un niveau de preuve limité de la cancérogénicité chez l'Homme d'une exposition professionnelle au bitume et à ses fumées pour la pose de produits d'étanchéité (roofers) et durant les travaux d'asphaltage (mastic asphalt workers) et à un niveau de preuve inadéquat pour la pose d'enrobés (road pavers).

8.3.3 Revue des études de cancérogénicité chez l'animal par le CIRC

8.3.3.1 Exposition par inhalation

Trois études ont été réalisées chez l'animal pour des expositions aux fumées de bitume (Fuhst, Creutzenberg *et al.* 2007; Hueper and Payne 1960; Simmers 1964). Seule l'étude de Fuhst, Creutzenberg *et al.* (2007) a été jugée adéquate pour l'évaluation du potentiel cancérogène des fumées de bitume. Dans cette étude, 272 rats Wistar mâles et 272 femelles ont été exposés par inhalation (nose-only) aux fumées de bitumes comme décrit au paragraphe 8.2.3.2. Cette étude ne rapporte pas d'augmentation significative des tumeurs pour les différents organes considérés.

8.3.3.2 Exposition par voie cutanée

Les expositions par application cutanée ont été réalisées soit en diluant les bitumes avec un solvant (benzène, toluène ou acétone) et en appliquant le mélange sur la peau des animaux, soit, plus récemment, en appliquant des condensats de fumées générées en laboratoire.

La plupart des études menées avant 1990 sont généralement peu détaillées, les groupes contrôles sont mal constitués (absence de groupe, véhicule différent) ou les véhicules utilisés pour appliquer les bitumes sont eux-mêmes cancérogènes avérés.

Bitumes routiers

Les bitumes routiers (Bitumes straight) ont été étudiés en application pure ou diluée dans un solvant dans plusieurs études chez la souris et le lapin (Kireeva 1968; Simmers 1965a;

Simmers 1965b; Wallcave, Garcia *et al.* 1971). Ces études ont été considérées inadéquates par le groupe d'experts réunis au CIRC pour l'évaluation de la cancérogénicité.

Il n'a pas été observé de tumeurs cutanées dans une étude chez la souris, où les bitumes ont été appliqués dilués dans une huile minérale (Goyak, McKee *et al.* 2011).

Une étude de Clark, Burnett *et al.* (2011) ne rapporte aucune augmentation significative des tumeurs de la peau, par rapport au groupe contrôle, en exposant les souris uniquement par voie cutanée à des condensats de bitumes chauffés à 148 °C.

Bitumes oxydés

Les bitumes oxydés ont été étudiés en application pure dans 2 études chez la souris ou le lapin (Hueper and Payne 1960; Simmers 1965a). Ces études ont été considérées inadéquates pour l'évaluation de l'effet cancérogène des bitumes oxydés.

Une étude rapporte, chez la souris, une augmentation significative des tumeurs de la peau et un effet initiateur, par application de condensats purs générés à chaud (Freeman, Schreiner *et al.* 2011).

Les autres études ont été menées en diluant les bitumes ou les condensats dans des solvants (cyclohexane, acétone) ou des huiles minérales. Les études exposant les souris à des bitumes non chauffés ne rapportent pas d'augmentation significative de tumeurs de la peau (Emmett, Bingham *et al.* 1981; Sivak, Niemeier *et al.* 1997). En revanche lorsque les bitumes sont chauffés (199, 232 ou 316 °C), les études rapportent des augmentations significatives des tumeurs de la peau par rapport aux groupes contrôles (Clark, Burnett *et al.* 2011; Sivak, Niemeier *et al.* 1997). On notera les températures très élevées utilisées dans ces études, largement supérieures à celles rencontrées sur le terrain.

8.3.3.3 Conclusions

Le groupe d'experts réunis au CIRC a conclu, chez l'animal, à :

- un niveau de preuve inadéquat pour la cancérogénicité des bitumes routiers et des condensats de fumées générés à partir de bitumes routiers (« straight run bitumen »)
- un niveau de preuve limité de la cancérogénicité des bitumes oxydés (« oxidised bitumen »)
- un niveau de preuve suffisant de la cancérogénicité des condensats de fumées générés à partir de bitumes oxydés (« oxidised bitumen »)
- une absence de données pour les bitumes durs (« hard bitumen »).

8.3.4 Revue des données mécanistes par le CIRC

Les experts réunis au CIRC ont étudié la toxicité des bitumes et de leurs émissions en s'adossant principalement sur les mécanismes impliqués dans la toxicité des HAP. En effet, certains HAP ou autres dérivés aromatiques généralement présents dans leurs émissions sont génotoxiques et/ou cancérogènes dans des systèmes expérimentaux. (par exemple le benzo[a]anthracène, le benzo[b]fluoranthène, le chrysène, le dibenzo[a,h]anthracène, le dibenzo[a,i]pyrène, l'indeno[1,2,3-c,d]pyrène et le naphthalène). De plus, le B[a]P, retrouvé dans la plupart des échantillons à des niveaux de concentrations très variables, est génotoxique et cancérogène dans différents systèmes expérimentaux et cancérogène pour l'Homme (Groupe 1). Enfin, d'autres composés aromatiques non-substitués et des thioarène, contenant de 2 à 4 noyaux aromatiques ont été rapportés, notamment le benzo[b]thiophène, le dibenzothiophène, le benzo[b]naphto[2,1-d]thiophène, le

benzo[b]naphto[1,2-d]thiophène et le benzo[b]naphto[2,3-d], de même que des azaarènes, des quinolines, des oxyarènes, et des dibenzofuranes.

Les experts réunis au CIRC ont indiqué que les études mécanistes sur des systèmes expérimentaux (*in vitro* et *in vivo*) ont donné lieu à des résultats divergents sur le potentiel génotoxique (formation d'adduits à l'ADN, mutagenicité dans des systèmes bactériens, altérations chromosomiques et dommages à l'ADN) des fumées de bitume. Cela s'explique par les différences de composition chimique des bitumes utilisés, de températures d'application *in situ* des bitumes ou de génération en laboratoire des fumées de bitumes, de conditions d'expositions, de facteurs de coexposition.

La plupart des études *in vitro* utilisent des fumées et condensats de fumées de bitumes générés en laboratoire et rapportent un potentiel génotoxique, avec une mutagenicité sur souches bactériennes pour les condensats de bitumes et la formation de micronoyaux dans des cellules de mammifères pour l'asphalte et certaines de ses fractions.

Les tissus de rats exposés par inhalation à des fumées ou condensats de bitume suggèrent que deux voies peuvent être impliquées dans l'activation du B[a]P en molécule réactive avec l'ADN : métabolites réactifs du B[a]P via les CYP et espèces réactives avec l'oxygène via la NADPH quinone réductase. Un métabolite du B[a]P, l'*anti*-benzo[a]pyrène-7,8-dihydrodiol-9,10-époxyde (époxy-diol ou *anti*-B[a]PDE), est capable de réagir au niveau de sa fonction époxyde avec les atomes de certaines bases de l'ADN pour former des adduits (mis en évidence dans tous les systèmes expérimentaux et chez l'homme). Des adduits ont ainsi été mis en évidence au niveau de la guanosine, de l'adénosine et de la cytosine dans de nombreuses études expérimentales, y compris chez des animaux exposés par inhalation ou par voie cutanée à des fumées ou des condensats. Les erreurs de réparation de ces adduits de fort encombrement seraient responsables de lésions de l'ADN, de mutations dans les systèmes bactériens et les cellules de mammifères. Les études indiquent un potentiel cancérigène de ce métabolite en mettant en évidence des tumeurs liées à l'activation du B[a]P en *anti*-B[a]PDE dans les systèmes expérimentaux, suite à des mutations au niveau de proto-oncogène (*Ki-ras*) et de gènes suppresseurs de tumeurs (*TP53*).

Par ailleurs, chez des animaux exposés aux fumées de bitume, une augmentation de l'expression des gènes impliqués dans la réponse inflammatoire et l'induction ou la répression de gènes impliqués dans la réponse anti- ou pro-oxydante, respectivement, ont été observées.

S'il est admis que les travailleurs exposés aux fumées de bitumes sont exposés à des HAP cancérigènes, les experts réunis au CIRC indiquent la difficulté d'interprétation des résultats des études des mécanismes de génotoxicité. Ils soulignent notamment la difficulté de quantifier une relation entre l'exposition aux fumées de bitumes (émissions, biomarqueurs d'exposition et biomarqueurs d'effet) et leur potentiel cancérigène.

Les études de terrain mettent en évidence la présence de métabolites d'HAP cancérigènes dans les urines des travailleurs exposés aux fumées de bitume, d'adduits à l'ADN (B[a]PDE) et à l'albumine dans le sang, de bases oxydées dans le sang et les lymphocytes, de lésions de l'ADN (ruptures simples ou doubles-brins, micronoyaux, échanges de chromatides sœurs, aberrations chromosomiques). De plus, l'association entre le potentiel génotoxique des fumées de bitumes et l'inflammation au niveau du tractus respiratoire a été mise en évidence chez l'Homme.

Les conclusions des experts du groupe de travail réunis au CIRC sont donc les suivantes :

Application de bitumes routiers

Les tests de mutagenicité sur les urines de professionnels exposés montrent un important potentiel mutagène. Les tests de génotoxicité montrent également une augmentation des :

- cassures de l'ADN ;
- échanges de chromatides sœurs ;

- micronoyaux ;
- aberrations chromosomiques.

Plusieurs de ces lésions génotoxiques sont associées au développement de tumeurs chez l'Homme. De plus, les données expérimentales *in vivo* et *in vitro* concordent avec ces résultats.

Le groupe d'experts réunis au CIRC a conclu que les effets cancérigènes de l'exposition aux bitumes observés chez l'animal sont très probablement liés à un mécanisme génotoxique.

De plus, les experts réunis au CIRC suspectent un lien entre l'inflammation et la génotoxicité des bitumes et de leurs émissions.

Travailleurs de la pose de produits d'étanchéité et asphalteurs

Quelques études rapportent des cassures d'ADN liées aux expositions aux fumées de bitumes lors de l'application de bitumes sur les toitures ainsi qu'un mécanisme génotoxique. Les études rapportent des concentrations importantes de 8-oxo-dG dans les lymphocytes. Cependant le nombre d'études est limité.

Les données mécanistes obtenues chez les travailleurs avec des produits d'étanchéité et chez les asphalteurs sont peu nombreuses et les experts réunis au CIRC ont conclu qu'elles apportent un faible niveau de preuve d'un mécanisme génotoxique.

8.3.5 Autre revue récente des études de cancérogénicité

Une revue postérieure à l'expertise du CIRC, financée par l'« Asphalt Institute » (association professionnelle internationale des producteurs de bitume pétrolier), résume les études disponibles concernant le potentiel cancérogène des produits bitumineux et des fumées de bitume (Schreiner 2011).

8.3.5.1 Lésions de l'ADN, potentiel mutagène et cancérogénicité

Certains HAP, notamment les HAP de plus de 3 cycles, subissent une activation métabolique qui génère des métabolites électrophiles biologiquement très réactifs, capables de réagir avec les sites nucléophiles des macromolécules cellulaires en s'y fixant de manière covalente (e.g. adduits à l'ADN).

Les études chez l'homme ne mettent pas en évidence de relation de causalité entre les niveaux de HAP dans les fumées de bitumes et les niveaux d'adduits de HAP à l'ADN dans les lymphocytes des travailleurs exposés. Les niveaux d'adduits de HAP à l'ADN mesurés chez les travailleurs du bitume varient de 2,9 adduits / 10^9 nucléotides chez les travailleurs de la construction routière à 25 adduits / 10^9 nucléotides chez les travailleurs avec des produits d'étanchéité. Les adduits sont à considérer comme des marqueurs d'exposition aux HAP (biomarqueur de dose effective) et non pas comme marqueurs d'effets (génotoxicité) plutôt représentés par des tests de type micronoyaux et échange de chromatides sœurs. Certaines études montrent des augmentations significatives de niveaux de 8-oxo-dGuo (oxydation de base) sans retrouver de relation avec les niveaux d'exposition chez des professionnels de l'asphaltage. Il est cependant à noter que les niveaux d'exposition ne sont pas forcément bien évalués. Certains auteurs mettent également en évidence des augmentations significatives des lésions oxydatives de l'ADN en relation avec une

augmentation du niveau des cassures simple et doubles brins, chez des travailleurs exposés aux enrobés sans augmentation des niveaux d'échanges de chromatides sœurs.

D'après les auteurs, chez les professionnels exposés aux fumées de bitume, les résultats positifs (augmentation des niveaux de micronoyaux et d'échanges de chromatides sœurs) sont généralement remis en question par les possibles facteurs de confusion (tabagisme, exposition aux goudrons).

Des études chez l'animal ont montré une augmentation des niveaux d'adduits à l'ADN dans les cellules de la peau, des poumons et des leucocytes lors d'expositions cutanées et dans les poumons et au niveau des VAS lors d'expositions par inhalation. En revanche, elles ne montrent pas d'augmentation significative des micronoyaux ou d'échanges de chromatides sœurs (exposition par inhalation de fumées de bitume générées en laboratoire). Les études rapportant des données de génotoxicité chez l'animal ou chez des professionnels exposés aux fumées de bitume sont parfois contradictoires.

Les études d'exposition par inhalation ne montrent pas d'augmentation des tumeurs chez les animaux exposés. Elles mettent cependant en évidence des modifications physiopathologiques liées à une inflammation chronique au niveau pulmonaire (hyperplasies, infiltrations cellulaires, fibroses, etc.), voire des atrophies ou des nécroses tissulaires et des pneumonies, dépendantes des concentrations atmosphériques testées. Les études récentes d'exposition par voie cutanée montreraient un potentiel cancérigène des fumées émises à partir des bitumes utilisés pour le revêtement des toitures mais pas pour celles émises à partir de bitumes utilisés pour le revêtement des routes. Cette différence selon les auteurs pourrait s'expliquer par des compositions différentes des émissions dépendantes de la température d'application (110 à 160 °C vs 170 à 220 °C). Le type de bitume utilisé et la durée de l'exposition joueraient un rôle non négligeable dans le potentiel cancérigène des fumées de bitume. Ces études récentes se distinguent d'études plus anciennes dans la mesure où il ne s'agit plus d'application de produits bitumineux sur la peau des animaux mais d'application de condensats de fumées générés en laboratoire.

Les études de mutagénicité rapportent les mêmes résultats sur des lignées cellulaires (fibroblastes de poumons) et sur des souches bactériennes. Les fumées de bitume générées au dessus de 300 °C présentent clairement un potentiel mutagène alors que les fumées générées à des températures plus basses (150 à 160 °C) ne présentent pas ce potentiel. Certaines études montrent une relation entre le potentiel mutagène des fumées et les niveaux de HAP ou de composés aromatiques polycycliques soufrés à 3 cycles (eux-mêmes proportionnels aux températures de génération des fumées).

Les auteurs concluent que, de par la variabilité dans les caractéristiques physico-chimiques des bitumes utilisés, les modèles expérimentaux développés et les protocoles d'exposition appliqués, les études expérimentales *in vitro* et *in vivo*, de même que les études réalisées chez l'Homme, montrent des résultats controversés quant à la mutagénicité et/ou la génotoxicité de l'exposition aux fumées de bitumes. Plusieurs tableaux présentés dans la revue de la littérature de Schreiner (2011), illustrent l'hétérogénéité des principaux résultats *in vitro*, *in vivo* et chez l'Homme, ayant trait aux altérations cytogénétiques, à la formation d'adduits à l'ADN et au cassures de l'ADN en réponse à l'exposition aux fumées de bitumes.

8.3.5.2 Autres mécanismes

Chez l'animal des études rapportent que les expositions aux HAP peuvent entraîner une altération/suppression de la réponse immunitaire (cellulaire et humorale). Selon certains auteurs cette immunotoxicité pourrait contribuer au potentiel cancérigène de certains HAP. Il semblerait que les HAP suspectés dans l'altération de la réponse immunitaire soient

composés de 2 à 3 cycles et que ceux suspectés pour leur potentiel cancérigène soient composés 4 à 6 cycles.

Le rôle joué par la fraction particulaire dans le potentiel cancérigène reste à déterminer. D'après les scientifiques, elle serait potentiellement impliquée dans les mécanismes physiopathologiques sous-jacents (e.g. stress oxydant, inflammation, mutagénèse/génotoxicité) généralement à l'origine du développement de pathologies cancéreuses et/ou non cancéreuses.

8.3.6 Cancers cutanés liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux

Au cours des différentes réunions et des auditions, il est apparu que l'utilisation professionnelle de produits bitumeux et de produits dérivés de goudron de houille exposait les travailleurs à des conditions bien particulières. Les effets cutanés de ces expositions pouvaient être différents tant dans leurs mécanismes que dans leurs conséquences :

- La quantité de HAP est mille fois plus importante dans les goudrons (dérivés de la houille) que dans les produits bitumineux (dérivés du pétrole) ;
- La température des fumées auxquelles sont exposés les travailleurs conditionne la quantité et la qualité des produits chimiques ;
- Les conditions d'exposition au travail sur les routes et l'asphaltage des sols comparées à celles des couvreurs sont bien différentes. La nature du travail doit toujours être précisée ;
- La composition des fumées obtenues en laboratoire (données expérimentales) peut être très différente de celle recueillie en situation de travail.

De multiples facteurs peuvent être impliqués dans le déclenchement et l'évolution d'un cancer cutané. Certains agents cancérigènes ont pu être identifiés dans l'environnement des travailleurs du bitume. Ils peuvent être classés par ordre de fréquence décroissante : rayonnement ultraviolet (RUV), HAP, arsenic, radiations ionisantes et enfin, traumatismes répétés. En France, plus de 80 000 cas de cancers cutanés sont recensés annuellement (valeurs obtenues par extrapolation à partir de registres départementaux). Cliniquement, les cancers cutanés sont souvent précédés de modifications du tégument telles que kératoses actiniques, dyschromies cutanées, etc. Un tableau de synthèse disponible en Annexe 15 résume les agents identifiés comme initiateurs ou promoteurs de cancers cutanés chez l'animal.

Après des épisodes répétés d'exposition déclenchant un érythème diffus des zones exposées accompagné de sensation de brûlure, une poïkilodermie (épaississement cutané) s'installe (cou, joues). Des papillomes kératosiques apparaissent plus tardivement également au niveau des avant-bras et des mains. Il faut de un à vingt ans pour que s'installent des kératoses verruqueuses qui évoluent ensuite en carcinome spinocellulaire. Cette dernière évolution reste néanmoins très rare. Peuvent apparaître également des épithéliomas basocellulaires et des kérato-acanthomes. Les cancers cutanés ainsi que leur description histologique sont résumés dans le Tableau 60 suivant :

Tableau 60 : caractérisation histologique et évolution des différents cancers cutanés

Epithélioma basocellulaire (BCC)	Ce type de cancer ne métastase qu'exceptionnellement. Il reproduit histologiquement tous les aspects de différenciation de cellules souches épithéliales du tégument.
Epithélioma spinocellulaire (SCC)	Ce type de cancer survient sur des lésions précancéreuses (kératoses actiniques). Il métastase rarement mais néanmoins, sa survenue sur des muqueuses est liée à un risque métastatique élevé. Il reproduit les aspects de différenciation des cellules de la couche basale.
Maladie de Bowen (BD)	SCC intra-épidermique
Mélanome	Multiplication anarchique des mélanocytes intraépidermiques survenant soit de novo soit sur un naevus bénin (accumulation de naevocytes peu différenciés avec mutations du gène BRAF). Le risque métastatique est très élevé (>50%) quand l'épaisseur de la tumeur est > à 1,5 mm.
Lymphome cutané à cellules T (CTCL)	Leucémie à lymphocytes T à tropisme essentiellement cutané traitée par moutarde azotée par voie systémique ou par PUVAthérapie

Une description plus détaillée des différents cancers cutanés est disponible en Annexe 14.

Les photodermatologistes ont une longue expérience de l'association des rayonnements UV et du goudron de houille car cette combinaison est utilisée depuis 1925 pour traiter le psoriasis chez l'homme. Ce traitement constitue donc un véritable modèle expérimental humain. Il a été cliniquement établi que les sujets exposés qui présentaient un érythème et des œdèmes lors des expositions, ressentaient au préalable des sensations de brûlure (« tar smarts »). Le psoriasis étant une pathologie non guérissable, un suivi particulier a été assuré et par conséquent le risque cancer a été pris en compte très rapidement. On a pu constater l'apparition de cancers cutanés chez un nombre non négligeable de patients. Il est à noter que les expositions solaires constituent indépendamment un facteur de risque supplémentaire (voir Annexe 16).

Concernant le risque de développement du cancer cutané en lien avec une exposition simultanée de la peau humaine aux émissions du bitume et aux rayonnements UV, aucune donnée n'a été recensée dans la littérature. Les premiers résultats originaux au niveau international de travaux de recherche initiés avec l'IST de Lausanne, n'ont pas permis de conclure à l'heure actuelle.

Aucune étude spécifique sur les cancers cutanés chez les travailleurs exposés aux liants bitumineux n'a été recensée dans la littérature.

La revue de la littérature concernant les travailleurs exposés aux bitumes menée par le groupe d'experts réunis au CIRC en 2011 a permis d'identifier plusieurs études épidémiologiques présentant des données pour les cancers de la peau. Il s'agit de 8 études de cohortes, conduites entre 1976 et 2003, principalement aux Etats-Unis (5 études) ; 1 étude menée au Danemark, 1 en Suède, et la dernière étude est issue de la cohorte multicentrique européenne (Bender, Parker *et al.* 1989; Boffetta, Burstyn *et al.* 2001; Boffetta, Burstyn *et al.* 2003a; Boffetta, Burstyn *et al.* 2003b; Engholm and Englund 1995; Hammond, Selikoff *et al.* 1976; Hansen 1989; Maizlish, Beaumont *et al.* 1988; Milham 1997; Stern, Ruder *et al.* 2000). Toutes sont des études de mortalité, excepté Hansen (1989) et

l'étude européenne de Boffetta *et al.*, (2001, 2003a, 2003b). Elles concernent majoritairement des travailleurs exposés aux bitumes routiers, 3 études présentent des données pour les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité et une seule étude mentionne les travailleurs de l'asphaltage (Hansen 1989). Ces études sont résumées dans le Tableau 61 ci-dessous.

D'après l'analyse de ces données, il ressort que la mortalité observée chez les travailleurs exposés est principalement en lien avec des cancers du poumon. Concernant les cancers cutanés, aucune association statistiquement significative entre l'apparition de cancers cutanés chez les travailleurs et l'exposition aux émissions de bitumes n'a été mise en évidence. Seuls les mélanomes de la peau ont été rapportés et sont en nombre très réduit. Les autres types de cancers de la peau n'ont pas été étudiés.

Tableau 61 : Synthèse des études de cohorte recensant des cancers cutanés chez des travailleurs exposés aux bitumes (IARC 2013)

Référence et lieu de l'étude ; Période de suivi	Nombre total de sujets inclus dans l'étude	Type de cancer	Catégories de population exposées	Nombre de cas/décès	Risque relatif (IC 95%)	Covariables Commentaires				
Hammond <i>et al.</i> (1976) Etats-Unis 1960–71	5939 hommes; Membres d'un groupement professionnel américain spécifique des travailleurs de la pose de produits d'étanchéité (<i>United Slate, Tile and Composition Roofers, Damp and Waterproof Workers Association</i>), exceptés les travailleurs circonscrits aux travaux impliquant l'utilisation d'ardoise et de tuiles. Durée minimale d'adhésion, 9 ans (avant 1960)	Tous les cancers	Membres d'un groupement professionnel américain spécifique des travailleurs de la pose de produits d'étanchéité (<i>United Slate, Tile and Composition Roofers, Damp and Waterproof Workers Association</i>) Durée d'adhésion : 9–19 ans	86	1.07 [0.87–1.32]	Age, période du décès Comparaison du taux de mortalité des sujets exposés à celui de la population générale américaine. Suivi des taux de mortalité et des causes de décès des sujets exposés via les certificats de décès fournis par l'assurance vie syndicale. Taux de mortalité attendus calculés suivant les causes spécifiques par catégories d'âge et en fonction de la durée d'adhésion. IC et <i>P</i> values, NR.				
							Peau, hormis le mélanome	2	4.65 [0.56–16.80]	
							≥ 20 ans	Tous les cancers	315	1.45 [1.30–1.62]
								Poumon	99	1.59 [1.29–1.94]
								Peau, hormis le mélanome	3	4.00 [0.82–11.69]
Maizlish <i>et al.</i> (1988) Californie, Etats-Unis 1970–83	27 162. Analyse de la mortalité proportionnelle de 327 travailleurs de l'entretien des routes employés par le Ministère des Transports de la Californie comparativement à 1570 personnes décédées (de sexe masculin, 88%; blanc, 90%)	Tous les cancers Peau, hormis le mélanome	Travailleurs de l'entretien des routes	81	1.17 (0.93–1.46) 1.22 (0.12–4.39)	Age au moment du décès, sexe, ethnie, année du décès Calcul du taux de mortalité proportionnelle comparativement au taux de mortalité dans la population américaine jusqu'en 1980. Seulement chez les hommes blancs.				

Bender <i>et al.</i> (1989) Minnesota, Etats-Unis 1945–84	4849 travailleurs de l'entretien des routes employés par le Ministère des Transports du Minnesota depuis au minimum 1 an	Travailleurs de l'entretien des routes		SMR	Age au moment du décès, sexe, année du décès Les hommes blancs seulement; cause de la mort des certificats de décès. Les taux de mortalité attendus dans la population masculine (blanche) du Minnesota sont différenciés suivant leur lieu de résidence (urbaine / rurale) Cette stratification suivant le lieu de résidence (urbain / rural) peut être considérée comme un ajustement approximatif du facteur de confusion lié à une exposition à la fumée de tabac
	Melanome		0	0 (2.9 expected)	
Hansen (1989) Danemark 1959–84	679 hommes, d'après les registres des employés de plusieurs usines d'asphaltage (n = 400), les dossiers syndicaux des asphalteurs (n = 186), les dossiers des employés fournis par une usine d'asphaltage (n = 93).	Asphalteurs <i>Age 40–89 ans</i>		SIR	Age, période d'apparition du cancer Constatation de nouveaux cas de cancer par le biais du registre danois des cancers. L'incidence du cancer prévue est calculée spécifiquement suivant l'âge, le site et de la période, chez les hommes danois, 1958-1982. Probablement exposés au goudron de houille Possiblement exposés au goudron de houille Probablement <u>non</u> exposés au goudron de houille
	Poumon		27	3.44 (2.27-5.01)	
	Peau, hormis le mélanome		3	0.67 (0.14–1.96)	
	Poumon	<i>Sous-cohorte I</i>	18	3.02 (1.79–4.77)	
	Poumon	<i>Sous-cohorte II</i>	6	3.92 (1.44–8.54)	
	Poumon	<i>Sous-cohorte III</i>	3	8.57 (1.77–25.05)	
Engholm & Englund (1995) Suède 1971–88	226 000 employés de la construction routière; 2572 travailleurs de la pose d'enrobés/asphalteurs; 704 travailleurs de la pose de produits d'étanchéité Tous les travailleurs enregistrés auprès de « Bygghälsan », ayant subi au moins un check-up médical entre 1971 et 1979.	Travailleurs de la construction routière		SMR	Age, période du décès On peut supposer que ce sont des hommes, ce d'après les registres suédois (a) de toute la population vivante; (b) des décès; (c) des migrants; (d) le registre national du cancer. Les taux d'incidence sont calculés à partir de la période du décès suivant l'année, l'âge et la région. Les taux de mortalité sont calculés à partir de la période du décès suivant l'année, l'âge, et la cause. Aucune information sur d'autres expositions professionnelles potentiellement confondantes (goudron de houille). CI et P value NR
	Tous les cancers		42	0.88 (0.63–1.18)	
	Poumon		8	0.79 (0.34–1.55)	
	Mélanome malin		3	2.08 (0.43–6.09)	

Milham (1997) Etats-Unis 1950–89 (hommes); 1974–89 (femmes)	588 090 hommes; 88 071 femmes			<i>PMR</i>	Age, période du décès	
	Respectivement 219 et 68 catégories professionnelles chez les hommes et les femmes.				Étude du taux de mortalité proportionnelle de 161 causes de décès de travailleurs comparativement au taux de mortalité des résidents de l'État de Washington à partir de l'âge de 20 ans.	
	Déclarations d'occupation extraites des actes de décès et codées manuellement jusqu'en 1986, un ordinateur codé depuis 1987				Chez les femmes, le taux de mortalité proportionnelle est calculé sans tenir compte de la catégorie femmes au foyer (134 569 décès)	
		Travailleurs de la construction routière			Nombre total de décès chez les hommes blancs, 7266	
		Tous les cancers	1581	1.02		
		Poumon	558	1.20 ($P < 0.01$)		
		Peau, hormis le mélanome	7	0.99		
		Travailleurs de la pose de produits d'étanchéité			Nombre total de décès chez les hommes blancs, 1057	
		Tous les cancers	207	0.99		
		Poumon	86	1.44 ($P < 0.01$)		
	Peau, hormis le mélanome	1	1.00			
Stern <i>et al.</i> (2000) Etats-Unis	Analyse de la mortalité proportionnelle à partir de 11 370 décès d'hommes parmi les travailleurs de la pose de produits d'étanchéité syndiqués	Poumon	Cohorte entière (travailleurs de la pose de produits d'étanchéité)	1071	1.39 (1.31–1.48)	<i>PMR</i> Ethnie, âge au moment du décès, année du décès
		Toutes les tumeurs malignes		2691	1.14 (1.10–1.19)	
		Mélanome malin		33	0.69 (0.48–0.97)	

				<i>RR</i>		
Boffetta <i>et al.</i> , Cohorte multicentrique (2001, 2003a, 2003b)	européenne du CIRC : 29 820 travailleurs employés depuis au moins une saison dans l'industrie du bitume	Tous les cancers	Travailleurs du bitume	3987	0.96 (0.93-0.99)	Aucune donnée sur le statut tabagique. Aucune tendance sur la durée, l'exposition cumulative ou l'exposition moyenne au bitume n'était rapportée.
Danemark, Finlande, France, Allemagne, Israël, Pays-Bas		Mélanome		15	0.74 (0.41-1.21)	Dans un sous-groupe de travailleurs de la pose d'enrobés, le risque de cancer du poumon augmente avec le niveau moyen d'exposition.

« Bygghälsan », Organisation suédoise du Bâtiment spécialisée dans l'Environnement de Travail, la Sécurité et la Santé; IC, intervalle de confiance; NR, non renseigné; PMR, ratio de mortalité proportionnelle; RR, risque relatif; SIR, taux d'incidence standardisé; SMR; ratio standardisé de mortalité.

8.4 Limites d'interprétation des études

De nombreuses limites méthodologiques, essentiellement liées à la représentativité des émissions, rendent difficile l'interprétation des résultats des études chez l'Homme et l'animal.

8.4.1 Limites des études épidémiologiques

Les résultats des études chez l'Homme ont été d'autant plus difficilement interprétables que de nombreux biais ou facteurs de confusion ont été identifiés :

- Une possible co-exposition aux produits dérivés de la houille, avec une évolution au cours de l'historique professionnel ;
- L'évolution et la variabilité éventuelle de la composition des produits bitumineux au cours de ces dernières décennies avec notamment l'introduction des additifs dans les mélanges ;
- L'évolution des pratiques d'utilisation des produits bitumineux ;
- Une possible co-exposition à d'autres polluants tels l'amiante ou les gaz d'échappement de moteur diesel.

Pour l'analyse des études épidémiologiques, le GT s'est attaché à décrire avec le plus de précisions possibles ces biais, ainsi qu'à relever, le cas échéant, les facteurs de confusion non signalés dans les études traitées.

8.4.2 Limites des études toxicologiques

Les études expérimentales sont peu nombreuses (8 études recensées) et sont centrées sur les effets respiratoires, avec un apport très parcellaire quant aux données concernant les autres types d'effets potentiels.

La représentativité des expositions testées en laboratoire est notamment discutée par le GT. Si les industriels considèrent qu'une substance est représentative du terrain lorsqu'elle est fréquemment utilisée, les toxicologues s'intéressent plutôt à la similarité de composition et de profil toxicologique pour juger de la représentativité d'une substance testée. Le manque d'informations concernant les caractéristiques des produits bitumineux fournis par la profession pour réaliser les essais en laboratoire n'a pas permis de définir la ou les substances types qu'il faudrait employer pour les études toxicologiques rendant difficile l'interprétation des différentes études et leurs comparaisons. Les principales lacunes relevées par le GT sont les suivantes :

- En premier lieu, les liants bitumineux et leurs émissions testés dans ces études ne rendent pas compte de la diversité des produits mis en œuvre sur le terrain et donc de leur toxicité potentielle. Les produits sont testés purs, sans aucun ajout d'additifs ni de produits de recyclage. Or, les résultats publiés à ce jour, bien que parcellaires, suggèrent un rôle très important des additifs et/ou des produits de recyclage dans la toxicité d'une exposition aux émissions de bitumes (Heikkilä et al., 2003 ; Lindberg et al., 2008). Ces résultats laissent également à penser que la toxicité de l'exposition à de tels produits est probablement sous-estimée du fait de ce biais.
- Par ailleurs, les méthodes de génération d'émissions ne sont pas représentatives de la réalité. La littérature rapporte des compositions systématiquement discordantes entre les fumées prélevées directement sur le terrain et celles obtenues indirectement par génération en laboratoire (Reinke et al., 2000 ; Heikkilä et al. 2003; Lindberg et al., 2008).
- Un autre point limitant la comparaison des résultats entre les différentes études est la grande variabilité inter-études quant aux protocoles d'essais mis en œuvre, qu'il

s'agisse des doses testées, des conditions d'exposition et des méthodes de caractérisation des bitumes.

Pour toutes ces raisons, les résultats des études expérimentales ont été interprétés par le GT en considérant que ces études ne peuvent refléter qu'une situation d'exposition donnée sans se prévaloir de représenter l'ensemble des situations d'exposition professionnelle et leur dangerosité potentielle.

8.5 Conclusions générales sur les effets sanitaires

Seuls ont été considérés pour l'expertise, les effets sanitaires rapportés par la littérature scientifique, pour des expositions par inhalation des fumées de bitume ou par dépôt des condensats sur la peau. Concernant l'étude des effets cancérigènes, le GT a rapporté les principales conclusions de l'expertise menée par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC). Une recherche complémentaire a également été menée concernant les cancers cutanés.

8.5.1 Effets aigus

Des effets d'irritation oculaire et respiratoire (irritations laryngées, pharyngées et toux) chez des travailleurs exposés aux émissions de bitume ont été rapportés dans plusieurs études chez l'Homme. Selon les études, ces effets aigus pourraient apparaître pour des concentrations en particules totales dans les émissions de bitume inférieures à $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$, voire dès $0,1 \text{ mg.m}^{-3}$.

8.5.2 Effets chroniques non cancérigènes

Au vu des résultats décrits dans plusieurs études épidémiologiques chez les travailleurs de la construction routière, les experts du GT estiment que l'exposition chronique aux émissions de produits bitumineux est à même d'induire des atteintes respiratoires pouvant notamment se traduire par un accroissement du risque de développer un asthme ou une BPCO.

L'étude de cohorte multicentrique européenne ne rapporte pas d'association significative entre l'exposition aux émissions de bitume et la mortalité par troubles pulmonaires ou pathologies respiratoires non malignes. En revanche, elle met en évidence une association significative entre l'exposition au B[a]P (estimée en concentration atmosphérique cumulée sur un an) et une mortalité par pathologies respiratoires, avec un risque accru dès le groupe présentant le niveau d'exposition le plus faible (entre 233 et $624 \text{ ng.m}^{-3}.\text{an}$).

Les études expérimentales des effets sur la fonction pulmonaire et l'inflammation liés à une exposition aux émissions de bitume (5 études chez le rat), bien que manquant d'homogénéité entre elles quant aux conditions expérimentales mises en œuvre (substances bitumineuses testées, doses usitées, protocoles d'exposition...) ou aux paramètres physiologiques étudiés, permettent néanmoins de confirmer un effet délétère lié à l'exposition aux émissions de bitumes.

Par ailleurs, 3 études épidémiologiques ont analysé la relation potentielle entre la survenue de troubles cardiovasculaires et l'exposition aux émissions de bitumes. Les résultats d'une de ces études suggèrent l'existence d'un lien significatif entre une augmentation de la mortalité par troubles cardio-vasculaires et l'exposition moyenne au B[a]P atmosphérique. Pour autant, d'autres facteurs ne peuvent être exclus en raison de la complexité des expositions et de l'évolution de celles-ci au cours du temps. Ce seul résultat se doit donc d'être confirmé par d'autres études pour pouvoir être pris en compte dans l'évaluation des risques.

D'autres effets sur la fonction rénale ou la fonction hépatique ainsi qu'une immunotoxicité ont été rapportés chez l'homme mais les résultats ne sont pas exploitables.

Certains auteurs ont commencé à étudier l'immunotoxicité des émissions de bitume chez l'animal (études chez le rat) mais les résultats sont pour l'instant difficilement interprétables car contradictoires selon les niveaux et les durées d'exposition.

Enfin, une étude réalisée chez le rat en 2011 recense systématiquement une absence d'effets jusqu'à 300 mg.m⁻³ (HCT-Hydrocarbures totaux) sur la fonction hépatique, la fonction de reproduction et le développement.

La revue des effets cutanés non-cancérogènes soulève un manque de données concernant ce type d'effet. Des dermatites de contact ou allergiques dans le secteur de la construction routière sont effectivement rapportées sans que les agents causals n'aient été clairement identifiés. Ils pourraient être liés aux savons ou détergents utilisés par les ouvriers lors du lavage des mains. Les experts du GT attirent l'attention sur le fait que l'impact des tensio-actifs employés dans diverses formulations de liants bitumineux n'a jamais été évalué dans ce cadre.

8.5.3 Effets cancérogènes

Le groupe d'experts du CIRC a classé l'exposition aux bitumes oxydés et à leurs émissions lors des travaux d'étanchéité comme cancérogène probable pour l'Homme (catégorie 2A) sur la base d'études de cancérogenèse animale et d'études épidémiologiques.

Par ailleurs, le même groupe d'experts du CIRC a classé l'exposition aux émissions de bitumes utilisés lors de la pose d'enrobés et/ou lors de travaux d'asphaltage comme cancérogène possible (catégorie 2B), les résultats des études expérimentales réalisées ayant été jugés non suffisamment concluants, autant *in vivo* qu'*in vitro*.

Aucune étude épidémiologique n'a mis en évidence l'apparition de cancers cutanés chez les travailleurs exposés aux émissions de bitumes. En effet, il s'agit principalement d'études de mortalité inappropriées pour évaluer le taux d'incidence de la majorité des cancers cutanés. En effet, les carcinomes cutanés sont, dans la plupart des cas, sans pronostic létal et curables avec un traitement adapté.

De plus, l'incidence des cancers cutanés n'a pas fait l'objet d'études spécifiques en lien avec une exposition aux produits bitumineux, à l'exception des mélanomes (dans un rapport du NIOSH) dont l'incidence relevée s'avère inférieure au taux d'incidence des cancers cutanés dans la population générale américaine, limitant le niveau de confiance pouvant être attribué aux résultats de cette étude.

Enfin, alors que des effets liés à une exposition aux produits bitumineux et leurs émissions ont été identifiés, aucune donnée toxicologique ne permet à l'heure actuelle d'estimer une relation dose-réponse entre les niveaux d'exposition et les effets sanitaires reportés dans ce rapport.

9 Evaluation qualitative des risques sanitaires

En l'état actuel des connaissances, la démarche d'évaluation quantitative des risques sanitaires n'est pas applicable. Le manque de données et de conclusions sur la caractérisation des dangers est en effet un frein à cette démarche. Par ailleurs, les connaissances quantitatives disponibles liées à l'exposition ont été centrées principalement sur un indicateur relevant de la famille des HAP dont la pertinence a été discutée au cours de cette expertise.

Le Health Council of the Netherlands a notamment essayé de calculer un excès de risque de cancer du poumon lié à des expositions professionnelles au B[a]P à partir d'études menées spécifiquement chez les travailleurs du bitume (Health Council of the Netherlands 2007), mais compte tenu du manque d'information et des facteurs confondants, cette quantification n'a pu aboutir.

Ainsi, par ce chapitre, le GT s'est attaché à mettre en perspective les données sanitaires dans une démarche qualitative d'évaluation des risques sanitaires, avec un recensement et une analyse des données d'exposition en considérant les postes de travail.

Complexité de composition des liants bitumineux et de leurs émissions

La composition des liants bitumineux et de leurs émissions est *de facto* très complexe. L'identification et la quantification des composés présents dans les bitumes sont techniquement très difficiles et ne sauraient être exhaustives.

Dans le domaine de la construction, de l'entretien des routes et du secteur de l'étanchéité des toitures/terrasses, les bitumes sont classiquement mis en œuvre suivant différentes techniques. Ces utilisations impliquent une exposition des salariés aux produits mais surtout à leurs émissions lorsqu'ils sont chauffés pour leur manipulation. Les conditions d'exposition aux produits bitumineux sont très différentes et varient suivant le procédé de mise en œuvre, la nature des produits utilisés ainsi que le type de travail effectué.

Les émissions des liants bitumineux sont composées de :

- Particules en suspension dans l'air contenant les molécules organiques les moins volatiles ;
- Vapeurs contenant les molécules organiques les plus volatiles ;
- Gaz tels que le H₂S.

De par leur nature, de nombreux composés aromatiques polycycliques (CAP) sont présents dans les liants bitumineux. Parmi ces CAP, une attention particulière a été portée par la communauté scientifique sur les 16 HAP prioritaires de l'US EPA dont le B[a]P, classé par le CIRC en catégorie 1 (cancérogène certain pour l'Homme), et considérés jusqu'à présent comme représentatifs du danger cancérogène des liants et de leurs émissions.

D'autres CAP identifiés dans ces produits et leurs émissions commencent à être étudiés tels que les HAP soufrés et méthylés. Parmi ces composés, plusieurs ont été récemment reclassés par le CIRC notamment la dibenz[a,j]acridine classée cancérogène probable (2A) ou le 5-méthyl-chrysène et le carbazole classés cancérogènes possibles (2B).

D'autres composés organiques volatils (COV) ou semi-volatils (COSV) reconnus pour leurs effets sanitaires ont également été identifiés dans les bitumes et leurs émissions, comme le benzène, le toluène, les phénols, *etc.* Par ailleurs, les hydrocarbures aliphatiques et le naphthalène présents en quantités non négligeables dans les liants bitumineux et leurs émissions pourraient être associés à l'apparition d'effets irritatifs respiratoires et cutanés.

Compte tenu du nombre important de composés présents dans les bitumes et leurs émissions, lesquels n'ayant pour la plupart pas été identifiés, il n'est pas possible d'établir un profil type de composition. Ainsi, il n'est pas pertinent, en l'état actuel des connaissances, de caractériser les effets sanitaires d'une exposition à un tel mélange *via* une approche

substance par substance. En conséquence, les experts ont réalisé l'évaluation des dangers et des risques sanitaires liés à la manipulation des produits bitumineux *via* une analyse des données disponibles dans la littérature considérant la substance « bitume » dans sa globalité.

Effets sanitaires liés à une exposition aux produits bitumineux et leurs émissions

Des effets aigus d'irritation oculaire et respiratoire liés à une exposition aux fumées de bitume ont été décrits dans plusieurs études chez l'Homme.

Les études épidémiologiques chez les travailleurs de la construction routière ont également rapporté des effets respiratoires liés à une exposition chronique : augmentation significative des risques d'asthme et de BPCO, augmentation des marqueurs inflammatoires au niveau pulmonaire. Une association significative entre l'exposition au B[a]P (évaluée en concentration atmosphérique cumulée sur un an) et une mortalité par pathologie respiratoire a été mise en évidence par l'étude de cohorte multicentrique européenne. Les études expérimentales confirment en partie les résultats décrits dans les études chez l'Homme. D'autres effets chroniques cardiovasculaires et immunotoxiques sont par ailleurs suspectés mais nécessitent d'être confirmés par d'autres études.

Le CIRC a récemment actualisé sa monographie concernant la cancérogénicité de l'exposition des travailleurs de différents groupes professionnels aux fumées de bitume. L'exposition des travailleurs aux bitumes oxydés et leurs émissions lors de la pose de produits d'étanchéité a ainsi été classée par le CIRC en catégorie 2A, cancérogène probable. Il est à noter que d'après les auditions menées dans le cadre de l'instruction de la saisine, actuellement, en France, les travailleurs n'utilisent plus *a priori* ce type de produits. L'exposition des professionnels aux produits bitumineux et leurs émissions lors de la pose d'enrobés (conducteurs de finisseurs, régleurs, ratisseurs, conducteurs de compacteurs, décapeur...) à base de bitumes routiers ou lors de l'asphaltage à base de bitumes durs a été classée par le CIRC en catégorie 2B, cancérogène possible. Une association positive a été observée entre les expositions professionnelles aux liants bitumineux et leurs émissions et l'apparition de cancers du poumon et des voies aérodigestives supérieures (cavité buccale, pharynx, œsophage et larynx) chez les travailleurs lors de la pose de produits d'étanchéité ou lors de l'asphaltage.

Il n'est pas possible en l'état actuel des connaissances de se prononcer définitivement sur l'ensemble des dangers liés à une exposition à ces produits et toute conclusion définitive sur l'absence d'effets (cancérogènes ou non) associés à une exposition aux émissions de bitumes n'est pas justifiée.

Concernant les effets cutanés, il existe peu de données pour les effets non-cancérogènes et aucune étude spécifique sur les cancers cutanés en lien avec des expositions aux liants bitumineux n'a été recensée. Si plusieurs études épidémiologiques présentent des données relatives aux cancers cutanés, aucune n'a mis en évidence d'association statistiquement significative entre l'apparition de cancers chez les travailleurs et l'exposition aux émissions de bitume. En effet, il s'agit principalement d'études de mortalité, inadaptées pour évaluer le taux d'incidence de ce type de cancers souvent curables avec un traitement adapté et sans pronostic létal.

Les résultats intermédiaires des travaux initiés avec l'Institut universitaire romand de Santé au Travail (IST) afin d'étudier l'interaction des HAP du bitume et des ultra-violets (UV) sur la peau humaine et le risque de cancer de la peau ne permettent pas de conclure quant à l'existence de cette interaction. Il n'est pas possible, à l'heure actuelle, d'évaluer les effets conjugués liés à une co-exposition aux émissions de bitumes et aux rayonnements UV compte tenu de l'absence de données.

Finalement, aucune donnée toxicologique ne permet à l'heure actuelle d'estimer une relation dose-réponse entre les niveaux d'exposition aux produits bitumineux et leurs émissions, et les effets sanitaires décrits.

Evaluation des expositions - Effectifs concernés

Aucune donnée consolidée n'a pu être recensée afin d'évaluer précisément le nombre de travailleurs exposés ou susceptibles de l'être aux produits bitumineux et leurs émissions en France. Les chiffres varient entre 5000 (d'après l'USIRF) et 85000 (d'après la FNSC-CGT) pour le secteur de l'industrie de la construction et de l'entretien des routes. D'après la CSFE, 7000 à 8000 personnes actives du secteur de l'étanchéité des toitures/terrasses seraient concernées par une exposition aux produits d'étanchéité à base de bitume (sans forcément les manipuler) avec une exposition potentielle à leurs fumées pendant le temps de soudage (au maximum 30 % du temps de travail).

L'analyse des données extraites de l'enquête SUMER 2010 n'a pas permis de donner une estimation des effectifs de travailleurs concernés par une exposition aux fumées de bitumes en raison de limites inhérentes notamment à la construction du questionnaire qui ne permet pas de faire la distinction entre les expositions aux produits houillers et aux produits bitumineux .

Evaluation des expositions - Limites de la métrologie

L'exposition des travailleurs aux produits bitumineux et leurs émissions implique les voies :

- Respiratoire, par inhalation des émissions ;
- Cutanée, par contact direct avec les produits, par dépôt des fumées sur la peau ou par contact éventuel avec les vêtements souillés ;
- Orale, via l'ingestion de produits ou de leurs émissions (contact main-bouche, notamment).

Le GT a identifié de nombreuses limites à l'évaluation des expositions des travailleurs liées notamment à la métrologie atmosphérique ainsi qu'à la métrologie cutanée.

Deux stratégies d'analyse ont été développées par les hygiénistes pour évaluer l'exposition des salariés aux émissions de bitume : l'une non-spécifique (concernant des fumées totales) et l'autre spécifique (concernant des composés individualisés). Ces deux stratégies apportent des informations incomplètes mais complémentaires pour l'évaluation de l'exposition totale aux émissions de bitumes. En effet, les méthodes non-spécifiques, *a priori* plus simples à mettre en œuvre, déterminent une quantité globale de matière dont la comparaison aux limites d'exposition existantes est souvent impossible. Cependant, la quantité globale de matière dosée permet de donner un indice utile pour apprécier les niveaux d'exposition relatifs et orienter la mise en œuvre d'actions de prévention. Par la suite, des méthodes spécifiques peuvent être mises en œuvre pour évaluer l'exposition des salariés à des molécules dont les limites d'exposition existent. Néanmoins, les méthodes disponibles sont multiples et ne font l'objet d'aucun consensus au niveau international.

Il existe des outils et des méthodes permettant d'appréhender la part de l'absorption par contact cutané s'appuyant aussi bien sur des modèles *in vitro* de peau humaine que des études menées chez les travailleurs exposés dans des conditions contrôlées. Toutefois, ces protocoles restent lourds et contraignants à mettre en œuvre et ne produisent à l'heure actuelle que peu de résultats exploitables. Il est cependant certain que le contact des émissions de produits bitumineux avec la peau des salariés entraîne une absorption cutanée parfois non négligeable par rapport à l'inhalation, absorption favorisée par un contact prolongé et/ou fréquent avec des vêtements ou outils souillés. Se pose également la question de l'absorption liée à l'exposition par voie cutanée lors de l'utilisation de produits appliqués tièdes ou à froid, notamment les émulsions (40-60°C), car ils sont constitués de tensioactifs potentiellement susceptibles d'augmenter la perméation cutanée.

Afin d'appréhender l'exposition des travailleurs aux émissions de bitumes en intégrant toutes les sources ainsi que toutes les voies d'exposition dans l'organisme (en particulier les

absorptions cutanée et orale), la surveillance biologique constitue une approche intéressante. La plupart des études sur le sujet sont centrées sur le dosage des métabolites des HAP, et peu d'entre elles ont mesuré à la fois ces métabolites et des marqueurs de toxicité. Ainsi aucune relation dose effet n'a pu être mise en évidence pour les métabolites investigués.

Evaluation des expositions – Exploitation des données métrologiques

D'une manière générale, les données d'exposition atmosphérique relevées dans la littérature sont parcellaires et la plupart du temps non représentatives des postes de travail. Les données de suivi des expositions des travailleurs aux produits bitumineux et à leurs émissions recensées à travers ces travaux d'expertise sont centrées sur les HAP. Compte tenu de la complexité des émissions, de l'évolution de leurs caractéristiques physiques et chimiques entre la source et les personnes exposées, et du nombre important de méthodes de prélèvement et d'analyse différentes, la caractérisation des émissions et *in fine* l'évaluation de l'exposition de la population professionnelle est très difficile à effectuer. Pas ou peu de données sont par ailleurs disponibles sur les autres composés identifiés dans le produit ou ses émissions.

Des résultats de campagnes de mesures des 16 HAP classés polluants prioritaires par l'US-EPA ont été recensés dans la littérature. Cependant, ces mesures sont difficilement comparables entre elles, car les bitumes, les conditions climatiques (vitesse du vent, humidité...), la localisation des chantiers, les moyens de prélèvement ainsi que les techniques analytiques divergent. Une constante est néanmoins identifiable : il ressort de toutes ces études que parmi ces 16 HAP, les composés à 2 ou 3 cycles (en particulier le naphthalène) sont majoritairement présents par rapport aux composés à 5 ou 6 cycles. En effet, ces derniers, dont le B[a]P et le DB[a,h]A présentent des niveaux moyens de concentration de l'ordre de quelques ng.m^{-3} alors que ceux de composés plus légers comme le naphthalène ou le fluorène dépassent régulièrement l'ordre du $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Ont été interrogées et analysées les bases de données COLCHIC (INRS) et CIMAROUT (USIRF), qui regroupent les résultats d'études d'exposition des travailleurs pour différents paramètres mesurés dans le cadre de suivis professionnels. Il s'agit entre autres des concentrations atmosphériques de HAP (B[a]P, pyrène, ...), des concentrations urinaires des métabolites de HAP (1-OHP, 3-OHB[a]P, ...), des poussières totales, des poussières inhalables, des poussières alvéolaires, de la fraction soluble dans le dichlorométhane...

Le nombre de prélèvements est insuffisant pour permettre une analyse quantitative et représentative de l'exposition que ce soit par secteurs d'activité, par familles de tâches, par poste ou encore par type de liant. L'exploitation des données extraites de ces bases a donc été strictement qualitative. Les valeurs de B[a]P relevées sont largement inférieures (en moyenne 5 ng.m^{-3}) à la valeur recommandée par la CNAMTS (150 ng.m^{-3}) pour les deux périodes étudiées (1986-2000 et 2000-2011), avec des maxima beaucoup plus faibles pour la période de 2001 à 2011 par rapport à la période 1986 à 2000.

En revanche, malgré l'identification dans les émissions de bitumes de nombreux autres composés tels les HAP soufrés ou azotés, les COV et COSV, les hydrocarbures aliphatiques, ainsi que les additifs, les expositions des salariés à ces émissions restent à ce jour peu documentées.

Identification de situations d'exposition

Afin de réaliser une comparaison de l'exposition des salariés aux différents postes de travail identifiés suivant les procédés de mise en œuvre des produits bitumineux, le GT s'est attaché à recenser les paramètres qui semblent, d'après les résultats de l'expertise, être les plus influents. Parmi les paramètres identifiés, seuls 4 paramètres pour lesquels il est possible de se positionner ont été retenus par le GT comme voie d'entrée de la « matrice » : la distance du travailleur par rapport à la source des émissions, la température d'application des produits, le débit ventilatoire de travail et la durée-fréquence d'exposition des travailleurs. Pour chaque couple procédé/poste de travail, des notes ont été attribuées à chacun de ces 4 paramètres suivant un jugement d'experts basé sur les informations disponibles (cf paragraphe 7.6). Cette matrice, dont la valeur est indicative, présente l'avantage de permettre une comparaison entre eux des différents postes au sein d'un même procédé de mise en œuvre. D'autres paramètres influant sur les expositions ont été identifiés (substances, technologies, conditions météorologiques, etc) mais n'ont pas pu être pris en compte étant donné l'importance de leur variabilité et la difficulté de préjuger de leur valeur.

Cette analyse comparative des différents postes de travail a donc permis de faire ressortir, par grands types de procédés, certains postes dont les potentiels d'exposition semblent *a priori* être les plus importants :

- Chez les travailleurs de la pose d'enrobés, la manipulation d'enrobés à chaud dans les postes de conducteur de finisseur, de tireur au râteau et de régleur apparaissent comme étant les activités les plus exposantes. Certains équipements des machines tels les cabines ventilées d'isolation du conducteur ou encore la mise en place de systèmes de captage des fumées permettent de diminuer les expositions au poste de conducteur de finisseur.
- Chez les travailleurs de l'application des enduits superficiels d'usure (ESU), les postes de gravillonneur, qui a pour mission de régler l'inclinaison de la benne verseuse de granulats, et d'opérateur lance, chargé d'appliquer l'enduit à l'aide d'une lance manuelle aux endroits difficilement accessibles pour la répandeuse et qui intervient également lors d'opérations de Point à Temps, seraient les postes les plus exposés, notamment dans le cas de l'utilisation de liants anhydres dont les températures de mise en œuvre sont supérieures à celles des émulsions.
- Chez les applicateurs de l'asphalte coulé, les postes d'aide asphalteur, d'asphalteur et de régleur finisseur seraient les plus exposés, quelle que soit la nature du liant mis en œuvre, du fait des températures élevées d'application qui génèrent une production importante de fumées, associé à la proximité de ces postes avec la source des émissions.
- Chez les travailleurs de l'étanchéité, les postes d'étancheur et d'aide étancheur utilisant la méthode de collage au bitume oxydé fondu représenteraient les postes les plus exposés.
- Chez les travailleurs affiliés aux travaux de petit entretien ou de réfection, le brouetteur et le râteau d'enrobés à chaud ainsi que le préparateur de fissure sembleraient être les activités les plus exposantes.

Caractérisation des risques

De nombreux composés classés par le CIRC comme cancérogènes et/ou classés par l'Union Européenne comme substances cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques (CMR) et/ou dangereuses ont donc été identifiés dans les bitumes et leurs émissions.

De manière historique avec l'utilisation passée des goudrons et en raison du caractère cancérogène de ces composés, le suivi des expositions des travailleurs aux produits bitumineux et à leurs émissions est lié à la métrologie des HAP et notamment du B[a]P. En raison de la différence de composition des bitumes par rapport aux goudrons, de la

diminution significative des températures d'application et de l'évolution de certains postes de travail, une diminution conséquente des niveaux d'exposition des travailleurs aux HAP a été observée depuis les années 80, notamment lors de la pose d'enduits superficiels anhydres (diminution d'un facteur supérieur à 100 par rapport aux bitumes-goudrons). Les niveaux d'exposition mesurés actuellement sont à peine supérieurs aux normes environnementales (objectif de qualité de l'air ambiant : 0,7 ng.m⁻³ de B[a]P (CSHP 1997)) avec une part minoritaire attribuable aux HAP particulaires comparativement aux HAP gazeux.

Certaines situations peuvent néanmoins excéder ce niveau moyen d'exposition aux HAP : la mise en œuvre de travaux en milieux confinés mal ventilés (tunnels...), l'utilisation possible de fluxants non recommandés (houillers ou pétrochimiques) ou les procédés de réfection/recyclage d'anciennes chaussées incluant des goudrons de houille.

Par ailleurs, les travailleurs sont également exposés aux autres composés émis lors de la mise en œuvre des produits bitumineux tels les dérivés méthylés de HAP, les HAP hétérocycliques soufrés (S-HAP), les dérivés azotés de HAP (N-HAP) ainsi que les COV, les COSV et les composés organiques non volatils (CONV) dont les niveaux d'exposition sont à ce jour peu documentés.

Au-delà du potentiel cancérigène des produits bitumineux et leurs émissions, les études épidémiologiques ont mis en évidence l'existence d'effets respiratoires liés à une exposition des travailleurs. D'autres effets sanitaires sont par ailleurs suspectés (cardiovasculaires, immunotoxiques...).

L'analyse comparative des différents postes de travail, via l'exploitation des résultats de la matrice, a par ailleurs permis de faire ressortir, par grands types de procédés, certains postes dont les potentiels d'exposition semblent *a priori* être les plus importants.

Il est également à noter que la température a un impact fort dans l'analyse effectuée. La tendance générale actuelle dans l'évolution des pratiques professionnelles est à la diminution des températures d'application des produits bitumineux notamment dans un souci de réaliser des économies d'énergie tout en réduisant les impacts environnementaux. Ces pratiques émergentes permettent également de réduire l'exposition des salariés lors de l'application de ces produits en limitant la génération d'émissions.

Néanmoins, ces diminutions d'exposition ne peuvent être corrélées directement avec une réduction du risque encouru par les salariés. En effet, pour compenser une partie des effets de cette baisse de température sur la maniabilité, plusieurs procédés de fabrication innovants ont été développés par les industriels : l'incorporation d'agents plastifiants (additifs organiques fluidifiants), le moussage. Or, les impacts potentiels de ces procédés sur la composition des émissions générées et sur l'intensité du transfert percutané en cas de contact, donc sur la santé des travailleurs, ne sont pas connus.

En conclusion, les données recensées ont permis d'identifier des situations d'exposition dont les impacts sanitaires pour les travailleurs concernés doivent être pris en compte. **Ainsi, au regard de l'ensemble de ces données, les experts ont finalement conclu à l'existence d'un risque sanitaire associé à une exposition aux liants bitumineux et à leurs émissions. Il n'est en revanche pas possible, en l'état actuel des connaissances, de quantifier ce risque.**

10 Conclusions du groupe de travail

L'Anses a été saisie par la fédération nationale des salariés de la construction – confédération générale du travail afin d'évaluer les risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs.

Le bitume est une substance complexe incluant de nombreux composés dans des proportions variables ; la démarche classique quantitative ne s'avère donc pas appropriée pour l'évaluation des risques liés à ses utilisations professionnelles. En outre, l'importante variabilité dans la composition, la formulation, ainsi que dans les techniques de mise en œuvre des bitumes évalués ne permet pas de procéder à une approche par familles de composés et/ou d'usages. Le GT s'est donc attaché à mettre en perspective les données sanitaires relatives à l'entité « bitumes » dans une démarche qualitative globale d'évaluation des risques sanitaires, avec un recensement et une analyse des données d'exposition en considérant les postes de travail.

Le CIRC a récemment classé l'exposition aux bitumes oxydés et à leurs émissions lors des travaux d'étanchéité comme cancérigène probable pour l'Homme (catégorie 2A) et l'exposition aux émissions de bitumes lors de la pose d'enrobés et/ou lors de travaux d'asphaltage comme cancérigène possible (catégorie 2B).

Au vu des résultats décrits dans plusieurs études épidémiologiques et appuyés par plusieurs études animales, les experts du GT estiment que l'exposition chronique des travailleurs aux émissions de produits bitumineux est à même d'induire des atteintes respiratoires. D'autres effets sanitaires sont par ailleurs suspectés (cardiovasculaires, immunotoxiques...).

Cependant, d'un point de vue réglementaire, il n'existe pas de classification harmonisée au niveau européen pour les substances bitumineuses et dans chacun des dossiers d'enregistrement REACH disponibles en ligne sur le site de l'ECHA, aucun produit bitumineux enregistré n'a été classé dangereux par le déclarant sur la base des critères tels que décrits par le règlement CLP.

Parmi les composés identifiés dans les bitumes et leurs émissions, certains sont classés cancérigènes par le CIRC et/ou classés comme substances cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques (CMR) et/ou dangereuses par l'Union Européenne. Les données disponibles liées à l'exposition ont été principalement centrées sur les HAP dont certains sont reconnus pour leur caractère cancérigène. Les niveaux d'expositions des travailleurs aux HAP ont diminué ces dernières années notamment en lien avec la disparition de l'utilisation du goudron au profit du bitume ainsi qu'avec l'évolution des techniques. Si les niveaux actuellement mesurés atteignent quasiment le bruit de fond environnemental, certaines situations peuvent encore générer des émissions conséquentes de HAP (tunnel, rabotage, recyclage, utilisation de fluxants houillers ou pétrochimiques non recommandés). De plus, les travailleurs sont exposés à d'autres composés émis, mais peu ou pas mesurés (dérivés méthylés de HAP, S-HAP, N-HAP, COV, COSV et CONV...).

Les informations recensées au travers de cette expertise ont donc permis d'identifier des situations d'exposition et notamment certains postes qui ressortent comme *a priori* les plus exposants et dont les impacts sanitaires pour les travailleurs concernés ne peuvent être négligés. **Les experts du GT ont finalement conclu à l'existence d'un risque sanitaire associé à une exposition aux produits bitumineux et leurs émissions.**

Les experts du GT souhaitent également attirer l'attention sur l'évolution actuelle des pratiques professionnelles qui tend à diminuer la température d'application des produits bitumineux. Ces pratiques émergentes permettraient de réduire l'exposition des salariés lors de l'application de ces produits en limitant la génération d'émissions. Néanmoins, ces diminutions d'expositions ne peuvent être corrélées directement avec une réduction du risque encouru par les salariés puisque pour compenser une partie des effets de cette baisse de température sur la maniabilité, plusieurs procédés de fabrication innovants ont été développés par les industriels, notamment l'incorporation d'agents plastifiants (additifs

organiques fluidifiants) ou le moussage. Or, les impacts potentiels sur la composition des émissions générées et sur l'intensité de transfert percutané en cas de contact, donc sur la santé des travailleurs ne sont pas connus.

Il est également important de garder à l'esprit que les travailleurs sont exposés à d'autres facteurs de risque potentiellement responsables d'effets sanitaires, parmi lesquels :

- Les rayonnements UV;
- La co-exposition avec des particules émises par les moteurs diesel notamment ;
- Le contact avec des matériaux ou pièces chaudes pouvant occasionner des brûlures ;
- La manutention de charges, la répétitivité des gestes, les postures pénibles ainsi que l'exposition aux vibrations ;
- Le lavage des mains avec des solvants dangereux (diesel ou autres).

Le GT souligne que si l'exposition des travailleurs par voie cutanée est encore peu considérée dans les études comparativement à la voie respiratoire, le contact des émissions avec la peau des salariés et l'absorption cutanée qui en résulte constituent une voie d'exposition non négligeable par rapport à l'inhalation. Se pose donc la question du danger lié à l'exposition par voie cutanée notamment pour des produits appliqués tièdes ou à froid, et en particulier les émulsions (40-60°C), constituées de tensioactifs potentiellement susceptibles d'augmenter la perméation cutanée.

Les méthodes permettant l'évaluation de l'exposition des salariés aux émissions de bitumes impliquent le prélèvement systématique des deux fractions inhalables, particules et vapeurs. Deux stratégies d'analyse, l'une dite globale (concernant la quantité de fumées totales) et l'autre dite spécifique (concernant des composés individualisés), apportent des informations incomplètes, mais complémentaires pour l'évaluation de l'exposition totale aux émissions de bitumes. En effet, l'approche globale non « qualitative » est pertinente puisqu'elle s'inscrit dans une démarche préventive de réduction des expositions alors que l'approche spécifique demeure indispensable dans une démarche d'investigation toxicologique. Le GT souligne la difficulté d'interprétation liée à l'utilisation de chaque méthode isolément, et donc encourage la mise en œuvre de ces 2 approches en parallèle dans la caractérisation de l'exposition des travailleurs aux émissions de bitumes.

Le B[a]P historiquement mesuré ne semble plus être aujourd'hui le seul traceur pertinent du risque cancérigène. Pour les experts du GT, il est sans doute nécessaire de maintenir le suivi de ce traceur, pour des questions de comparaison internationale, de référentiel historique et de niveaux encore élevés mesurés sur certains chantiers (en milieu confiné ou lors de réfections/recyclages d'anciennes chaussées). Néanmoins, il paraît indispensable d'élargir les recherches et le suivi à d'autres traceurs notamment pour prendre aussi en compte les effets non cancérigènes et ainsi mieux appréhender le risque sanitaire.

Le GT attire également l'attention sur les activités de rabotage et de recyclage. Lors de ces opérations effectuées sur d'anciens revêtements routiers, il existe différentes sources d'émission de substances reconnues pour leur dangerosité et présentes dans les matériaux en place, notamment l'amiante susceptible de libérer des fibres, la silice, mais aussi les goudrons et ses dérivés, les matériaux secondaires, les fluxants, les polymères, les additifs, les anciens bitumes soufrés susceptibles d'émettre des CAP ou des COV. Ces deux activités sont donc susceptibles d'exposer les travailleurs à des émissions potentiellement dangereuses et doivent faire l'objet d'une surveillance particulière et renforcée.

11 Recommandations

Les experts, au regard de l'ensemble des éléments portés à leur connaissance au cours de la réalisation de cette expertise collective, établissent les recommandations suivantes :

➤ Mise en œuvre d'une stratégie préventive

Les expositions professionnelles aux liants bitumineux et leurs émissions nécessitent l'organisation par l'employeur des moyens adéquats de prévention collective et individuelle.

En termes de prévention en santé au travail, il est d'ores et déjà nécessaire au vu des conclusions de l'expertise de réduire les expositions aux émissions de liants bitumineux et d'assurer un suivi médical approprié des travailleurs.

En termes de prévention collective

- Encourager la mise en place sur le chantier de systèmes d'aspiration des fumées et/ou de systèmes de ventilation adéquats lors de travaux en espace confiné (tunnels, sous-sols) et préconiser l'utilisation d'engins de chantier avec systèmes intégrés de captage de fumées.
- Sélectionner les produits (bitumes, additifs, etc.) et procédés d'application les moins exposants (au regard des connaissances disponibles) :
 - Respecter les consignes de température propres à l'utilisation de chaque produit bitumineux ;
 - Privilégier les émulsions de bitume permettant la réduction des fumées émises en travaillant « à froid » en dessous de 60°C. Privilégier les températures d'application d'asphalte les plus faibles (inférieures à 200°C) ;
 - Substituer les produits de nettoyage des outils et/ou des mains dangereux (par exemple les solvants de type gasoil) ;
 - Eviter de mettre en œuvre le procédé de collage au bitume oxydé fondu dans le cadre des travaux d'étanchéité et privilégier l'utilisation des membranes collées à froid (auto-adhésives).
- Adapter l'organisation du travail :
 - Décaler les horaires plus tôt l'été de manière à réduire l'impact de la chaleur et minimiser la co-exposition entre le rayonnement solaire et les produits bitumineux ;
 - Evaluer la faisabilité et la pertinence d'un système de rotation des postes de travail permettant aux travailleurs d'alterner différentes tâches.

En termes de prévention individuelle

- Préconiser, afin d'éviter la contamination cutanée, un renouvellement des vêtements de travail et la prise de douche sur le lieu du chantier.
- Adapter le port des équipements de protection individuelle à la protection de la peau et de l'appareil respiratoire :

- Vêtements de travail propres avec manches et jambes longues, port de visière ou lunettes, chapeau ou casque, *etc.* ;
- Port de protection respiratoire en cas d'exposition potentiellement importante comme en milieu confiné ou lors des opérations de rabotage.

Concernant le suivi des travailleurs

- Lors de la surveillance médicale régulière des travailleurs exposés aux liants bitumineux, inclure la réalisation d'explorations fonctionnelles respiratoires et une surveillance dermatologique. Ceci implique une communication ciblée auprès des médecins du travail concernant ces éléments de surveillance complémentaires.
- Poursuivre et développer le suivi des expositions par métrologie et biométrologie afin d'assurer une traçabilité de l'exposition des travailleurs.
- Encourager une veille active sur les effets sanitaires respiratoires mais également cardiovasculaires, immunotoxiques, neurotoxiques, *etc.*, en lien avec une exposition des travailleurs aux liants bitumineux.

En termes de prévention au titre du risque chimique

→ *Pour les fabricants de produits bitumineux*

- Encourager la réflexion sur les effets respiratoires et une éventuelle classification de la substance « bitume » avec l'objectif de parvenir *in fine* à une harmonisation de sa classification par les acteurs concernés.
- Encourager la mise à disposition de fiches de données de sécurité (FDS) actualisées.

→ *Pour les utilisateurs de produits bitumineux*

- Informer les travailleurs du risque chimique lié à la manipulation des produits bitumineux et/ou de leurs additifs (dont certains sont des produits chimiques dangereux).
- Actualiser le document unique d'évaluation des risques au vu des données sanitaires récentes et encourager la mise à disposition par les industriels de fiches de données de sécurité (FDS) actualisées.
- Dans le cadre de l'élaboration du document unique d'évaluation des risques, l'employeur doit caractériser l'exposition des travailleurs aux émissions de liants bitumineux par la mise en œuvre en parallèle de deux approches :
 - Une approche globale d'une part, quantifiant les grandes classes de polluants présents dans les émissions (COV, poussières, *etc.*), pertinente dans le cadre d'une démarche comparative de prévention des risques. La méthode en cours de développement par l'INRS pourra s'avérer un outil utile dans cette optique ;
 - Une approche spécifique d'autre part, ciblée sur certains polluants bien identifiés (B[a]P, HAP, *etc.*), et utile dans une démarche de caractérisation des profils toxicologiques des liants bitumineux et de leurs émissions. Dans l'attente de nouveaux traceurs complémentaires, la mesure des HAP reste la référence actuelle. Néanmoins, il est d'ores et déjà possible d'avoir une approche multi-résidus.

→ *Pour les pouvoirs publics*

- Réfléchir à une éventuelle classification de la substance « bitume » au vu des données sanitaires récentes.

Concernant le rabotage et le recyclage

- Renforcer la réglementation sur les activités de rabotage et de recyclage des anciens revêtements routiers en préconisant :
 - La recherche obligatoire et systématique de certains composants du matériau en place (amiante¹⁷ et goudrons principalement) avant toute opération de rabotage ou de recyclage ;
 - Une surveillance accrue des possibles émissions générées lors de ces opérations.

➤ **Mise en œuvre d'actions de recherche et développement**

En termes de développement d'outils métrologiques de suivi des expositions

- Mettre en place une harmonisation des méthodes globales de mesure des expositions (travaux INRS en cours ainsi qu'au niveau international).
- Développer, en parallèle du suivi des HAP de référence, un ou d'autre(s) traceur(s) spécifique(s) des émissions de liants bitumineux afin d'apprécier les risques cancérigènes. Les experts proposent en premier lieu l'exploration des composés suivants :
 - Hétérocycles soufrés (benzo[b]naphto[2,1,d]thiophène, etc.) ;
 - Hétérocycles azotés (carbazole, etc.) ;
 - Naphtalène (en tenant compte de la spécificité liée à la mesure de ce HAP par rapport aux autres) ;
 - HAP méthylés (5-méthylchrysène, etc.).
- Développer la recherche de traceurs pour l'évaluation des effets non-cancérigènes.

En termes de mise en œuvre d'études

- Mettre en place des études épidémiologiques concernant les cancers cutanés en lien avec une exposition aux émissions de liants bitumineux ou à défaut proposer au CIRC une évaluation spécifique de ce cancer à partir de l'étude de cohorte multi centrique européenne.

¹⁷Cf Circulaire du 15 mai 2013 portant instruction sur la gestion des risques sanitaires liés à l'amiante dans le cas de travaux sur les enrobés amiantés du réseau routier national non concédé - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ; Ministère de l'égalité des territoires et du logement - NOR : TRAT1311107C, texte paru au Bulletin Officiel le 25 juin 2013.

- Poursuivre les recherches concernant l'exposition conjointe aux émissions de bitumes et aux rayonnements UV de la peau humaine et le risque de cancer.
- Mettre en place des actions de recherche sur la composition et la toxicité des liants bitumineux mis en œuvre, avec le maximum de transparence de la part des professionnels afin de pouvoir évaluer l'impact sanitaire de certaines formulations (bitumes polymères, enrobés tièdes, émulsions, etc.) et des différents grades de bitumes utilisés.
- Mettre en place des études en populations professionnelles exposées aux liants bitumineux, couplant des aspects de biosurveillance (évaluation de la dose interne d'exposition par l'analyse de matrices biologiques) à des biomarqueurs d'effets sur les mêmes individus.

12 Bibliographie

ACGIH (2011) 'Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices.' (American Conference of Industrial Hygienists: Cincinnati, us) 229 p.

AFNOR (1993) NF EN 481 - Atmosphères des lieux de travail - Définition des fractions de taille pour le mesurage des particules en suspension dans l'air. In. ' (Association française de normalisation: Paris, fr)

AFNOR (2002a) NF EN 12597 - Bitume et liants bitumineux - terminologie. In. ' pp. 12. (Association Française de Normalisation: Paris, fr)

AFNOR (2002b) NF EN 13205 - Atmosphères des lieux de travail - Évaluation des performances des instruments de mesurage des concentrations d'aérosols. In. ' (Association française de normalisation: Paris, fr)

AFNOR (2006) NF EN 482 - Exposition sur les lieux de travail - Exigences générales concernant les performances des procédures de mesure des agents chimiques. In. ' (Association française de normalisation: Paris, fr)

AFNOR (2007) NF EN 15529 - Dérivés de la pyrolyse du charbon : terminologie. In. ' (Association Française de Normalisation: Paris, fr)

AFNOR (2010) NF EN 1076 - Exposition sur les lieux de travail - Procédures pour le mesurage des gaz et vapeurs à l'aide de dispositifs de prélèvement par pompage - Exigences et méthodes d'essai. In. ' (Association française de normalisation: Paris, fr)

Anderson SE, Munson AE, Tomblyn S, Meade BJ, Diotte NM (2008) The humoral immune response of mice exposed to simulated road paving-like asphalt fumes. *Journal of Immunotoxicology* **5**(3), 307-313.

Antonini JM, Roberts JR, *et al.* (2003) Effect of asphalt fume inhalation exposure at simulated road paving conditions prior to bacterial infection on lung defense responses in rats. *Inhalation Toxicology* **15**(13), 1347-1368.

Armstrong B, Hutchinson E, Unwin J, Fletcher T (2004) Lung cancer risk after exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review and meta-analysis. *Environmental Health Perspectives* **112**(9), 970-978.

Arslan D, Gürü M, Kürşat Çubuk M, Çubuk M (2011) Improvement of bitumen and bituminous mixtures performances by triethylene glycol based synthetic polyboron. *Construction and Building Materials* **25**(10), 3863-3868.

ASCO-TP (27/07/2012) Planète TP : tout sur les travaux publics. In. Vol. <http://www.planete-tp.com/>.)

Asphalt Institute (2007) 'The Asphalt Handbook.' 7th edn. 788 p.

ASTM (2011) Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions. ASTM D4124-09. In 'Annual Book of ASTM Standards. '

Barbeau D, Maitre A, Marques M (2011) Highly sensitive routine method for urinary 3-hydroxybenzo[a]pyrene quantitation using liquid chromatography-fluorescence detection and automated off-line solid phase extraction. *The Analyst* **136**(6), 1183-91.

Beck J (1950) Le goudron de houille. In 'Que sais je ? Vol. 402'. pp. 25. (Presses Universitaires de France: Paris, fr)

Beghin A (2003) Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux. Université Pierre et Marie Curie, Paris, fr

Bender AP, Parker DL, Johnson RA, Scharber WK, Williams AN, Marbury MC, Mandel JS (1989) Minnesota highway maintenance worker study: Cancer mortality. *American Journal of Industrial Medicine* **15**(5), 545-556.

Bergdahl IA, Toren K, Eriksson K, Hedlund U, Nilsson T, Flodin R, Jarvholm B (2004) Increased mortality in COPD among construction workers exposed to inorganic dust. *The European Respiratory Journal* **23**(3), 402-6.

Binet S, Bonnet P, *et al.* (2002) Development and Validation of a New Bitumen Fume Generation System which Generates Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations Proportional to Fume Concentrations. *Annals of Occupational Hygiene* **46**, 617-628.

Boeniger M, Neumeister C, Booth-Jones A (2008) Sampling and analytical method development and hand wipe measurements of dermal exposures to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **5**(7), 417-425.

Boffetta P, Burstyn I, *et al.* (2001) IARC epidemiological study of cancer mortality among European asphalt workers. International Agency for Research on Cancer, Lyon, France.

Boffetta P, Burstyn I, *et al.* (2003a) Cancer mortality among European asphalt workers: An international epidemiological study. I. Results of the analysis based on job titles. *American Journal of Industrial Medicine* **43**(1), 18-27.

Boffetta P, Burstyn I, *et al.* (2003b) Cancer mortality among European asphalt workers: An international epidemiological study. II. Exposure to bitumen fume and other agents. *American Journal of Industrial Medicine* **43**(1), 28-39.

Bonnet P, Binet S, *et al.* (2000) Inhalation study on exposure to bitumen fumes. Part 1: Development and validation of the equipment. *Annals of Occupational Hygiene* **44**(1), 15-29.

BP Bitumes France (28/07/2012) BP Bitumes France - Bitumes Spéciaux. In. Vol. <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=3050445&contentId=3050863>.)

Brandt HCA, de Groot P (1999) A laboratory rig for studying aspects of worker exposure to bitumen fumes. *American Industrial Hygiene Association Journal* **60**, 182-190.

Brandt HCA, de Groot P, Molyneux MKB, Tindlet PE (1985) Sampling and analysis of bitumen fumes. *Annals of Occupational Hygiene* **29**(1), 27-80.

Brazillet C, Domas D, Pépin G (2001) Caractérisation des déchets, le goudron dans les déchets du réseau routier : étude bibliographique, méthodes de caractérisation rapides. INERIS, Verneuil en Halate, fr.

Breuer D, Engel C (2011) Bitumen (vapor and aerosol) - Air monitoring. In 'The MAK Collection for Occupational Health and Safety. ' pp. 38-47)

Breuer D, Hahn JU, *et al.* (2011) Air sampling and determination of vapours and aerosols of bitumen and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Human Bitumen Study. *Archives of Toxicology* **85** (Suppl 1), S11-20.

Brossard R, Certin JF, Gendre JC, Calvez MJ, Koutchevsky MA, L'Hour P, Tregat C, Verhelst C (2003) Exposure to asphalt fumes during road paving. *Archives des Maladies Professionnelles et de Médecine du Travail* **64**(3), 157-164.

Buratti M, Campo L, Fustinoni S, Cirila PE, Martinotti I, Cavallo D, Foa V (2007) Urinary hydroxylated metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons as biomarkers of exposure in asphalt workers. *Biomarkers* **12**(3), 221-239.

Burgaz S, Borm PJ, Jongeneelen FJ (1992a) Biological monitoring of exposure to bitumen fumes during road paving operations. *Archive of Toxicology Supplement* **15**, 278-81.

Burgaz S, Borm PJ, Jongeneelen FJ (1992b) Evaluation of urinary excretion of 1-hydroxypyrene and thioethers in workers exposed to bitumen fumes. *International Archive of Occupational and Environmental Health* **63**(6), 397-401.

Burgaz S, Erdem O, Karahalil B, Karakaya AE (1998) Cytogenetic biomonitoring of workers exposed to bitumen fumes. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* **419**(1-3), 123-130.

Burstyn I, Boffetta P, *et al.* (2003a) Mortality from obstructive lung diseases and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons among asphalt workers. *American Journal of Epidemiology* **158**(5), 468-478.

Burstyn I, Boffetta P, *et al.* (2003b) Estimating exposures in the asphalt industry for an international epidemiological cohort study of cancer risk. *American Journal of Industrial Medicine* **43**(1), 3-17.

Burstyn I, Ferrari P, Wegh H, Heederik D, Kromhout H (2002) Characterizing worker exposure to bitumen during hot mix paving and asphalt mixing operations. *American Industrial Hygiene Association Journal* **63**(3), 293-299.

Burstyn I, Kromhout H, Boffetta P (2000) Literature Review of Levels and Determinants of Exposure to Potential Carcinogens and Other Agents in the Road Construction Industry. *AIHAJ - American Industrial Hygiene Association* **61**(5), 715 - 726.

Burstyn I, Kromhout H, *et al.* (2005) Polycyclic aromatic hydrocarbons and fatal ischemic heart disease. *Epidemiology* **16**(6), 744-750.

Burstyn I, Randem B, Lien JE, Langård S, Kromhout H (2002) Bitumen, polycyclic aromatic hydrocarbons and vehicle exhaust: Exposure levels and controls among Norwegian asphalt workers. *Annals of Occupational Hygiene* **46**(1), 79-87.

Campo L, Addario L, *et al.* (2006) Biological monitoring of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons by determination of unmetabolized compounds in urine. *Toxicology Letters* **162**(2-3 Spec. Iss.), 132-138.

Campo L, Buratti M, Fustinoni S, Cirila PE, Martinotti I, Longhi O, Cavallo D, Foà V (2006) Evaluation of exposure to PAHs in asphalt workers by environmental and biological monitoring. *Annals of the New York Academy of Sciences* **1076**, 405-420.

Campo L, Fustinoni S, Buratti M, Cirila PE, Martinotti I, Foà V (2007) Unmetabolized polycyclic aromatic hydrocarbons in urine as biomarkers of low exposure in asphalt workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S100-110.

Cavallari JM, Zwack LM, Lange CR, Herrick RF, McClean MD (2012) Temperature-dependent emission concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in paving and built-up roofing asphalts. *Annals of Occupational Hygiene* **56**(2), 148-160.

Cavallo D, Ursini CL, *et al.* (2006) Sister chromatid exchange and oxidative DNA damage in paving workers exposed to PAHs. *Annals of Occupational Hygiene* **50**(3), 211-218.

Champmartin C, Simon P, Delsaut P, Dorotte M, Bianchi B (2007) Routine determination of benzo[a]pyrene at part-per-billion in complex industrial matrices by multidimensional liquid chromatography. *Journal of Chromatography. A* **1142**(2), 164-71.

Cirila PE, Martinotti I, *et al.* (2007) Assessment of exposure to Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH) in Italian asphalt workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S87-99.

CISME (2012) Fiches métiers : agent Centrale d'enrobés. In 'Fiches Médico-Professionnelles. ' pp. 37. (Centre Interservices de Santé et de Médecine du Travail en Entreprise)

Clark CR, Burnett DM, *et al.* (2011) Asphalt fume dermal carcinogenicity potential: I. dermal carcinogenicity evaluation of asphalt (bitumen) fume condensates. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **61**(1), 9-16.

CNAMTS-DPR (2011) "Industries du bâtiment et des travaux publics" : sinistralité des accidents du travail, des accidents de trajet et des maladies professionnelles entre 2006 et 2010 - Branche AT-MP du régime général de la sécurité sociale Caisse nationale d'assurance maladie des travailleurs salariés - Direction des risques professionnels - Mission statistique.

Committee for the adaptation to scientific and technical progress of EC-legislation on waste (2002) Criteria and procedures for the acceptance of waste at landfills - Working document of the commission services - Council directive 1999/31/EC on the landfill of waste.

CONCAWE (1992) Bitumen and bitumen derivatives. Report No.92/104. CONCAWE, Brussels, Be.

Doornaert B, Pichard A (2003) Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs). Evaluation de la relation dose-réponse pour les effets cancérigènes : approche substance par substance (facteurs d'équivalence toxique - FET) et approche par mélange. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil en Halate, fr.

EAPA (2005) Industry statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavements.

EAPA (2008) Arguments to stimulate the government to promote asphalt reuse and recycling.

Edwards Y, Tasdermir Y, Isacson U (2006) Rheological effects of commercial waxes and polyphosphoric acid in bitumen 160/220—low temperature performance. *Fuel* **85**, 989-997.

Ellingsen S, Fery-Forgues G (1998) Application de la spectroscopie de fluorescence à l'étude du pétrole : le défi de la complexité. *Oil and Gas Science and Technology* **53**(2), 201-216.

Emmett EA, Bingham EM, Barkley W (1981) A carcinogenic bioassay of certain roofing materials. *American Journal of Industrial Medicine* **2**(1), 59-64.

Engholm G, Englund A (1995) Mortality and cancer incidence in various groups of construction workers. *Occupational medicine (Philadelphia, Pa.)* **10**(2), 453-481.

Eurobitumes, Asphalt Institute (2011) The bitumen industry, a global perspective. In. ' pp. 42. (Asphalt Institute Inc. and European Bitumen Association - Eurobitume: us)

Eurogip. (2010) Cancers d'origine professionnelle : quelle reconnaissance en Europe ? - Rapport d'enquête.

Ferlay J, Shin H-R, Bray F, Forman D, Mathers C, Parkin DM (2010) Estimates of worldwide burden of cancer in 2008: GLOBOCAN 2008. *International Journal of Cancer* **127**(12), 2893-2917.

Fitzpatrick TB, Eisen AZ, Wolff K, Freeburgl M, Frank Austen K (1993) 'Dermatology in general medicine.' 4th edn. (McGraw-Hill, Health Professions Division: New-York, us)

Freeman JJ, Schreiner CA, *et al.* (2011) Asphalt fume dermal carcinogenicity potential: II. Initiation-promotion assay of Type III built-up roofing asphalt. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **61**(1), 17-22.

Fuhst R, Creutzenberg O, Ernst H, Hansen T, Pohlmann G, Preiss A, Rittinghausen S (2007) 24 Months inhalation carcinogenicity study of bitumen fumes in Wistar (WU) rats. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S20-43.

Fustinoni S, Campo L, Cirila PE, Martinotti I, Buratti M, Longhi O, Foà V, Bertazzi P (2010) Dermal exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in asphalt workers. *Occupational and Environmental Medicine* **67**(7), 456-463.

Gamble JF, Nicolich MJ, Barone NJ, Vincent WJ (1999) Exposure-response of asphalt fumes with changes in pulmonary function and symptoms. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* **25**(3), 186-206.

Gasthauer E, Maze M, Marchand J, Amouroux J (2008) Characterization of asphalt fume composition by GC/MS and effect of temperature. *Fuel* **87**, 1428-1434.

Gaufrey V, Viranaiken V, Paranhos R, Jullien A, De la Roche C (2010) Laboratory assessment of fumes generated by bituminous mixtures and bitumen. *Road Materials and Pavement Design* **11**(1), 83-100.

González V, Martínez-Boza FJ, Navarro FJ, Gallegos C, Pérez-Lepe A, Páez A (2010) Thermomechanical properties of bitumen modified with crumb tire rubber and polymeric additives. *Fuel Processing Technology* **91**(9), 1033-1039.

Gorbatovskii AA, Rozental DA, Dronov SV (2007) Structure and composition of polymer-bitumen composites. *Russian Journal of Applied Chemistry* **80**(5), 838-841.

Goursaud F, Berchel M, Guilbot J, Legros N, Lemiegre L, Marcilloux J, Plusquellec D, Benvegna T (2008) Glycine betaine as a renewable raw material to "greener" new cationic surfactants. *Green Chemistry* **10**(3), 310-320.

Goyak KO, McKee RH, Minsavage GD, McGowan C, Daughtrey WC, Freeman JJ (2011) Paving asphalt products exhibit a lack of carcinogenic and mutagenic activity. *International Journal of Toxicology* **30**(5), 492-497.

GPB (2005) Les produits bitumineux et leur application. In 'Bitume Info. Vol. Numero special 1'. pp. 35. (Groupement Professionnel des Bitumes)

GPB (2006) Viaduc de la Sioule: un uni parfait et une prouesse technique. In 'Bitume Info. Vol. 13'. pp. 19. (Groupement Professionnel des Bitumes)

GPB (2009) Bitume et développement durable. In 'Bitume Info. Vol. Numero special 2'. pp. 47. (Groupement Professionnel des Bitumes)

Hammond EC, Selikoff IJ, Lawther PL, Seidman H (1976) Inhalation of benzpyrene and cancer in man. *Ann N Y Acad Sci* **271**, 116-124.

Hansen ES (1989) Cancer incidence in an occupational cohort exposed to bitumen fumes. *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health* **15**(2), 101-105.

Hansen ES (1991) Mortality of mastic asphalt workers. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* **17**(1), 20-24.

Health Council of the Netherlands (2007) Bitumen (vapour and aerosol); Health-based recommended occupational exposure limit. Health Council of the Netherlands, The Hague, nl.

Heikkila P, Riala R, Hameila M, Nykyri E, Pfaffli P (2002) Occupational exposure to bitumen during road paving. *American Industrial Hygiene Association Journal* **63**(2), 156-65.

Herrick RF, McClean MD, Meeker JD, Zwack L, Hanley K (2007) Physical and chemical characterization of asphalt (bitumen) paving exposures. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4** (Suppl 1), S209-216.

Hicks J (1995) Asphalt industry cross-sectional exposure assessment study. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* **10**(10), 840-848.

Hueper WC, Payne WW (1960) Carcinogenic studies on petroleum asphalt, cooling oil, and coal tar. *Archives of Pathology* **70**, 372-384.

Hugener M, Deschwanden H, Bühler H (1999) Le recyclage conforme aux exigences de l'environnement des revêtements routiers contenant du goudron, EMPE, IMP, ERTEC S.A.

Hugener M, Emmenegger L, Mattrel P (2007) Emissions of tar-containing binders : a laboratory study. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, **42**, 241-247.

Hugener M, Emmenegger L, Mattrel P (2009) Emissions of tar-containing binders : field studies. *Journal of Environmental Science and Health Part A*, **44**, 29-37.

Hugener M, Emmenegger L, Mattrel P (2010) Hot-recycling of tar-containing asphalt pavements. *Asphalt Pavements and Environment*, 29-46.

Huynh CK, Vu Duc T (1999) Automatic sample clean-up procedure for PAH analysis using a new robotic unit. *HPLC99, Granada*.

Huynh CK, Vu Duc T, Deygout F, Le Coutaller P, Surmont F (2007) Identification and quantification of PAH in Bitumen by GC - Ion-Trap MS and HPLC-fluorescent detectors. *Polycyclic Aromatic compounds* **27**(2), 107-121.

IARC (1985) Polynuclear aromatic compounds, part 4: bitumens, coal-tars and derived products, shale-oils and soots. In 'IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans. Vol. 35'. pp. 271. (International Agency for Research on Cancer: Lyon, fr)

IARC (1987) Overall evaluations of carcinogenicity: an updating of IARC monographs volumes 1 to 42. In 'IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. Suppl 7'. pp. 440. (International Agency for Research on Cancer: Lyon, fr)

IARC (2010) Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. In 'IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 92'. pp. 772-773. (International Agency for Research on Cancer: Lyon, fr)

IARC (2013) Bitumens and bitumen emissions, and some heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons. In 'IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 103'. pp. 360. (International Agency for Research on Cancer: Lyon, fr)

INERIS (2001) Caractérisation des déchets : le goudron dans les déchets du réseau routier. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil en Halatte, Fr.

INRS (2007) Hydrocarbures aromatiques polycycliques: fiche 11. In 'Base Metropol. ' (Institut National de Recherche et de Sécurité: Paris, fr)

Islas-Flores C, Buenrostro-Gonzalez E, Lira-Galeana C (2006) Fractionation of petroleum resins by normal and reverse phase liquid chromatography. *Fuel* **85**, 1842-1850.

ISTED (1989) Le savoir-faire français en matière d'émulsions de bitume. Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et l'Environnement pour le Développement, Paris, Fr.

Jongeneelen FJ (2001) Benchmark guideline for urinary 1-hydroxypyrene as biomarker of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Annals of Occupational Hygiene* **45**(1), 3-13.

Karakaya A, Yucesoy B, Turhan A, Erdem O, Burgaz S, Karakaya AE (1999) Investigation of some immunological functions in a group of asphalt workers exposed to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Toxicology* **135**(1), 43-7.

Kireeva IS (1968) [On the carcinogenic properties of coal pitch and petroleum bitumen used as bonding agents in coal briquettes]. *Gigiiena i sanitariia* **33**(5), 35-41. [In rus]

Kowalewski I, Schaeffer P, Adam P, Dessort D, Fafet A, Carpentier B (2010) Formation of H₂S and sulfur-rich bitumen from a reservoir heavy oil in the presence of elemental sulfur. *Organic Geochemistry* **41**(9), 951-958.

Kriech AJ, Osborn LV, Prowell BD, Redman AP, West RC (2011) Comparison of worker breathing zone exposures between hot mix asphalt and warm mix asphalt applications. 18.

Lafontaine M, Champmartin C, Simon P, Delsaut P, Funck-Brentano C (2006) 3-Hydroxybenzo[a]pyrene in the urine of smokers and non-smokers. *Toxicology Letters* **162**(2-3), 181-185.

Lafontaine M, Gendre C, Delsaut P, Simon P (2004) Urinary 3-hydroxybenzo[a]pyrene as a biomarker of exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: an approach for determining a biological limit value. *Polycyclic Aromatic compounds* **24**(4-5), 441-450.

Lauby-Secretan B, Baan R, *et al.* (2011) Bitumens and bitumen emissions, and some heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons. *Lancet Oncology* **12**, 1190-1191.

Law BF, Stone S, Frazer D, Siegel PD (2006) Characterization of laboratory simulated road paving-like asphalt by high-performance liquid chromatography and gas chromatography-mass spectrometry. *J Occup Environ Hyg* **3**(7), 343-350.

LCPC (1975) Les enduits superficiels. In 'Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées.' (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées: France)

LCPC (1999) Emplois des bitumes spéciaux, des liants bitumineux modifiés et avec additifs en techniques routières. 201.

Legret M, Odie L, Demare D, Jullien A (2005) Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. *Water Research* **39**(15), 3675-85.

Loeber L (1998) Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach. *Fuel* **77**, 1443-1450.

Lombardi B (2007a) Liants hydrocarbonés. *Techniques de l'ingénieur - Les routes, les ponts et les parcs de stationnement base documentaire : TIB235DUO*(ref. article : c904).

Lombardi B (2007b) PAS BON. In 'Les techniques de l'ingénieur. '

Ma JY, Rengasamy A, Frazer D, Barger MW, Hubbs AF, Battelli L, Tomblyn S, Stone S, Castranova V (2003) Inhalation exposure of rats to asphalt fumes generated at paving temperatures alters pulmonary xenobiotic metabolism pathways without lung injury. *Environmental Health Perspectives* **111**(9), 1215-1221.

Maître A (2013) Cartographie d'Exposition Professionnelle aux Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dans le secteur des bitumes. Centre Hospitalo-Universitaire de Grenoble et Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail.

Maizlish N, Beaumont J, Singleton J (1988) Mortality among California highway workers. *American Journal of Industrial Medicine* **13**(3), 363-379.

Marczynski B, Raulf-Heimsoth M, *et al.* (2006) Assessment of DNA damage in WBCs of workers occupationally exposed to fumes and aerosols of bitumen. *Cancer Epidemiology Biomarkers and Prevention* **15**(4), 645-651.

Mastrangelo G, Fadda E, Marzia V (1996) Polycyclic aromatic hydrocarbons and cancer in man. *Environmental Health Perspectives* **104**(11), 1166-70.

McClellan MD, Osborn LV, *et al.* (2012) Using urinary biomarkers of polycyclic aromatic compound exposure to guide exposure-reduction strategies among asphalt paving workers. *Annals of Occupational Hygiene* **56**(9), 1013-1024.

McClellan MD, Rinehart RD, Ngo L, Eisen EA, Kelsey KT, Herrick RF (2004a) Inhalation and dermal exposure among asphalt paving workers. *Annals of Occupational Hygiene* **48**(8), 663-671.

McClellan MD, Rinehart RD, Ngo L, Eisen EA, Kelsey KT, Wiencke JK, Herrick RF (2004b) Urinary 1-hydroxypyrene and polycyclic aromatic hydrocarbon exposure among asphalt paving workers. *Annals of Occupational Hygiene* **48**(6), 565-578.

McClellan MD, Rinehart RD, Sapkota A, Cavallari JM, Herrick RF (2007) Dermal exposure and urinary 1-hydroxypyrene among asphalt roofing workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S118-126.

Menichini E (1992) 'Opinion adopted by the Italian National Advisory Toxicological Committee on polycyclic aromatic hydrocarbons.' (Istituto Superiore di Sanità: Roma) 69 p

Milham S (1997) Occupational Mortality in Washington State 1950–1989. National Institute for Occupational Safety and Health - Division of Surveillance, Hazard Evaluations and Field Studies, Cincinnati, Ohio.

Mundt DJ, Marano KM, Nunes AP, Adams RC (2009) A review of changes in composition of hot mix asphalt in the United States. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **6**(11), 714-725. [In eng]

National Center for Environmental Health (2009) 'Fourth national report on human exposure to environmental chemicals.' (National Center for Environmental Health, DHHS: Atlanta, us) 529 p.

Niemeier R, Thayer P, Menzies K, Von Thuna P, Moss C, Burg J A comparison of the skin carcinogenicity of condensed roofing asphalt and coal tar pitch fumes. In 'Polynuclear Aromatic Hydrocarbons: A decade of progress. 10th International Symposium on Polynuclear Aromatic Hydrocarbons', 1988, Columbus, us, pp. 609-647

NIOSH (1994a) Polynuclear aromatic hydrocarbons by GC: Method 5515. In 'NIOSH Manual of Analytical Methods.' 4th edn. (Eds PM Eller and ME Cassinelli). (National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH): Cincinnati, us)

NIOSH (1994b) Polynuclear aromatic hydrocarbons by HPLC: Method 5506. In 'NIOSH Manual of Analytical Methods.' 4th edn. (Eds PM Eller and ME Cassinelli). (National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH): Cincinnati, us)

NIOSH (1998a) Benzene-soluble fraction and total particulate (asphalte fume): method 5042. In 'NIOSH Manual of Analytical Methods'. 4th edn. (Eds PM Eller and ME Cassinelli). (National Institute of Occupational Health and Safety, DHHS (NIOSH): Cincinnati, us)

NIOSH (1998b) Polycyclic aromatic compounds, total: Method 5800. In 'NIOSH Manual of Analytical Methods.' 4th edn. (Eds PM Eller and ME Cassinelli). (National Institute for Occupational Safety and Health DHHS (NIOSH): Cincinnati, us)

NIOSH (2000) 'Health effects of occupational exposure to asphalt.' (National Institute for occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH): Cincinnati, us) 150 p.

NIOSH (2003) Aromatic hydrocarbons by GC-FID: Method 1501. In 'NIOSH Manual of Analytical Methods.' 3th edn. (Eds PM Eller and ME Cassinelli). (National Institute for Occupational Safety and Health DHHS (NIOSH): Cincinnati, US)

Norseth T, Waage J, Dale I (1991) Acute effects and exposure to organic compounds in road maintenance workers exposed to asphalt. *American Journal of Industrial Medicine* **20**(6), 737-744.

Observatoire des Techniques de Chaussées (1997) Les enrobés coulés à froid: fiche 102. In 'Note d'information.' pp. 8. (Service d'Etudes technique des routes et autoroutes: Bagneux, fr)

OFEV (2006) Directive pour la valorisation des déchets de chantiers minéraux - Matériaux bitumineux et non-bitumineux de démolition des routes, béton de démolition et matériaux non triés.

Olsson A, Kromhout H, *et al.* (2010) A case-control study of lung cancer nested in a cohort of European asphalt workers. *Environmental Health Perspectives* **118**(10), 1418-1424.

Parker CM, Schreiner CA, *et al.* (2011) Evaluation of reproductive/developmental and repeated dose (subchronic) toxicity and cytogenetic effects in rats of a roofing asphalt fume condensate by nose-only inhalation. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **59**(3), 445-453.

Partanen T, Boffetta P (1994) Cancer risk in asphalt workers and roofers: review and meta-analysis of epidemiologic studies. *American Journal of Industrial Medicine* **26**(6), 721-740.

Perrault G, Dion C (2005) Revue de littérature sur l'utilisation de fibres d'amiante dans les enrobés bitumineux. IRSST.

Petry T, Schmid P, Schlatter C (1996) The use of toxic equivalency factors in assessing occupational and environmental health risk associated with exposure to airborne mixtures of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Chemosphere* **32**(4), 639-48.

Pinzi S, Gandia LM, Arzamendi G, Ruiz JJ, Dorado MP (2011) Influence of vegetable oils fatty acid composition on reaction temperature and glycerides conversion to biodiesel during transesterification. *Bioresource technology* **102**(2), 1044-50. [In eng]

Pohlmann G, Preiss A, Koch W, Kock H, Elend M, Raabe M (2006a) Collection, validation and generation of bitumen fumes for inhalation studies in rats part 3: Regeneration of bitumen fumes, inhalation setup, validation. *Annals of Occupational Hygiene* **50**(8), 813-819.

Pohlmann G, Preiss A, Levsen K, Raabe M, Koch W (2006b) Collection, validation and generation of bitumen fumes for inhalation studies in rats part 2: Collection of bitumen fumes from storage tanks. *Annals of Occupational Hygiene* **50**(8), 805-812.

Preiss A, Koch W, Kock H, Elend M, Raabe M, Pohlmann G (2006) Collection, validation and generation of bitumen fumes for inhalation studies in rats part 1: Workplace samples and validation criteria. *Annals of Occupational Hygiene* **50**(8), 789-804.

Randem BG, Langard S, Kongerud J, Dale I, Burstyn I, Martinsen JI, Andersen A (2003) Mortality from non-malignant diseases among male Norwegian asphalt workers. *American Journal of Industrial Medicine* **43**(1), 96-103.

Randem BG, Ulvestad B, Burstyn I, Kongerud J (2004) Respiratory symptoms and airflow limitation in asphalt workers. *Occupational and Environmental Medicine* **61**(4), 367-369.

Raulf-Heimsoth M, Angerer J, *et al.* (2008) Biological monitoring as a useful tool for the detection of a coal-tar contamination in bitumen-exposed workers. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part A: Current Issues* **71**(11-12), 746-750.

Raulf-Heimsoth M, Pesch B, *et al.* (2007) Assessment of irritative effects of fumes of bitumen on the airways by using non-invasive methods - Results of a cross-shift study in mastic asphalt workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S223-227.

République française (2009) Décret n° 2009-56 du 15 janvier 2009 révisant et complétant les tableaux de maladies professionnelles annexés au livre IV du code de la sécurité sociale. In 'Journal officiel du 16 janvier 2009.' pp. 81-83)

Rodríguez-Valverde MA, Ramón-Torregrosa P, Páez-Dueñas A, Cabrerizo-Vílchez MA, Hidalgo-Álvarez R (2008) Imaging techniques applied to characterize bitumen and bituminous emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science* **136**(1–2), 93-108.

Roy T, Kriech A, Mackerer C (2007) Percutaneous absorption of polycyclic aromatic compounds from bitumen fume condensate. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S137-143.

SAMARIS management group (2004) Litterature review of recycling of by-products in road construction in Europe. Competitive and sustainable growth programme.

SAMARIS management group (2006) Procedures for identifying hazardous components in materials for asphalt. Competitive and sustainable growth programme.

Sauvain JJ, Vu Duc T, Huynh CK (2001) Development of an analytical method for the simultaneous determination of 15 carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons and polycyclic aromatic nitrogen heterocyclic compounds. application to diesel particulates. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* **371**(7), 966-974.

Schreiner CA (2011) Review of mechanistic studies relevant to the potential carcinogenicity of asphalts. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* **59**(2), 270-284.

Schubert P, Schantz MM, Sander LC, Wise SA (2003) Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons with molecular weight 300 and 302 in environmental-matrix standard reference materials by gas chromatography/mass spectrometry. *Analytical Chemistry* **75**(2), 234-246.

Sebben Paranhos R (2007) Approche multi-échelle des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud. Université de Rouen, Rouen, fr

Sétra (2004) Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées. Service d'études techniques des routes et autoroutes, Bagneux, fr.

Sétra (2005) Enduits superficiels d'usure (Esu), Enrobés coulés à froid (ECF), Actualisation des connaissances sur les revêtements superficiels. Service d'Etudes techniques des routes et autoroutes, Bagneux, fr.

Sétra (2006a) Continuous hot mix production - The French expertise. In 'Technical guides.' pp. 27. (Service d'Etudes techniques des routes et autoroutes: Bagneux, fr)

Sétra (2006b) Impacts sanitaires des fluxants, fluidifiants et produits anti-kérosène. Service d'études techniques des routes et autoroutes, Bagneux, fr.

Sétra, LCPC (1995) Enduits superficiels d'usure (D9517). In 'Guides techniques.' pp. 122. (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées: France)

Sikora ER, Stone S, Tomblyn S, Frazer DG, Castranova V, Dey RD (2003) Asphalt exposure enhances neuropeptide levels in sensory neurons projecting to the rat nasal epithelium. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A* **66**(11), 1015-1027.

Simmers MH (1964) Petroleum asphalt inhalation by mice effects of aerosols and smoke on the tracheobronchial tree and lungs. *Archives of Environmental Health* **9**, 728-734.

Simmers MH (1965a) Cancers from air-refined and steam-refined asphalt. *Industrial Medicine and Surgery* **34**, 255-261.

Simmers MH (1965b) Cancers in mice from asphalt fractions. *Industrial Medicine and Surgery* **34**, 573-577.

Simon P, Lafontaine M, Delsaut P, Morele Y, Nicot T (2000) Trace determination of urinary 3-hydroxybenzo[a]pyrene by automated column-switching high-performance liquid chromatography. *Journal of chromatography. B, Biomedical sciences and applications* **748**(2), 337-48.

Singh SP, Singh D (2010) Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **14**, 200-216.

Sivak A, Niemeier R, *et al.* (1997) Skin carcinogenicity of condensed asphalt roofing fumes and their fractions following dermal application to mice. *Cancer Letters* **117**(1), 113-123.

Sobus JR, McClean MD, Herrick RF, Waidyanatha S, Nylander-French LA, Kupper LL, Rappaport SM (2009) Comparing urinary biomarkers of airborne and dermal exposure to polycyclic aromatic compounds in asphalt-exposed workers. *Annals of Occupational Hygiene* **53**(6), 561-571.

Speight JG (1992) Asphalt. In 'Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology.'. 4th edn. pp. Vol. 3 : p689-724. (JohnWiley&Sons, Inc.: New York, us)

Spickenheuer A, Ruhl R, *et al.* (2011) Levels and determinants of exposure to vapours and aerosols of bitumen. *Archives of Toxicology* **85**(Suppl 1), S21-28.

Stern FB, Ruder AM, Chen G (2000) Proportionate mortality among unionized roofers and waterproofers. *American Journal of Industrial Medicine* **37**(5), 478-492.

Swedish Road Administration (2004) Hantering av tjärhaltiga beläggningar. (Publ no 2004:90 (In Swedish)).

Szaniszló J, Ungváry G (2001) Polycyclic aromatic hydrocarbon exposure and burden of outdoor workers in Budapest. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A* **62**(5), 297-306.

Tepper AL, Burr GA, Feng HA, Singal M, Miller AK, Hanley KW, Olsen LD (2006) Acute symptoms associated with asphalt fume exposure among road pavers. *American Journal of Industrial Medicine* **49**(9), 728-739.

Tompa A, Jakab M, Biró A, Magyar B, Major J (2007) Health, Genotoxicology, and Immune Status of Road Pavers in Hungary. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S154-162.

Toren K, Bergdahl IA, Nilsson T, Jarvholm B (2007) Occupational exposure to particulate air pollution and mortality due to ischaemic heart disease and cerebrovascular disease. *Occupational and Environmental Medicine* **64**(8), 515-519.

TRB (2006) Circular Number E-C102, Asphalt Emulsion Technology - Transportation Research Board - Characteristics of Bituminous Materials Committee. 58.

Ulvestad B, Randem BG, Hetland S, Sigurdardottir G, Johannessen E, Lyberg T (2007) Exposure, lung function decline and systemic inflammatory response in asphalt workers. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* **33**(2), 114-121.

Unwin J, Cocker J, Scobbie E, Chambers H (2006) An assessment of occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in the UK. *Annals of Occupational Hygiene* **50**(4), 395-403.

USIRF (2001) 'Les enrobés bitumineux - Tome 1.' (Revue générale des routes et aérodromes: Paris, fr) 229 p.

USIRF (2003) 'Les enrobés bitumineux - Tome 2.' (Revue générale des routes et des aérodromes: Paris, fr)

USIRF (2012) Connexions. In 'L'Etat de la route '. pp. 32. (Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française: Paris, fr)

Väänänen V, Elovaara E, Nykyri E, Santonen T, Heikkilä P (2006) Road pavers' occupational exposure to asphalt containing waste plastic and tall oil pitch. *Journal of Environmental Monitoring* **8**(1), 89-99.

Väänänen V, Hämeilä M, Kontsas H, Peltonen K, Heikkilä P (2003) Air concentrations and urinary metabolites of polycyclic aromatic hydrocarbons among paving and remixing workers. *Journal of Environmental Monitoring* **5**(5), 739-746.

van Rooij J, Jongeneelen F (2007) Review of skin permeation hazard of bitumen fume. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S237-244.

Vaniscote M (1993) Enduits superficiels. Généralités. . In. ' (Ecole nationale des Ponts et Chaussées)

Vu-Duc T, Huynh CK, Binet S (2007) Laboratory generated bitumen fumes under standardized conditions. Clean-up scheme and ion trap GC-MS analysis of VOC, semi-volatile and particulate PAH and PASH. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* **4**(Suppl 1), S245-248.

Vu-Duc T, Huynh CK, Boiteux P (1995) Performance of a chromatographic procedure used in the certification of reference material for polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge. *Microchimica Acta* **120**(1), 271-280.

Wallcave L, Garcia H, Feldman R, Lijinsky W, Shubik P (1971) Skin tumorigenesis in mice by petroleum asphalts and coal-tar pitches of known polynuclear aromatic hydrocarbon content. *Toxicology and Applied Pharmacology* **18**(1), 41-52.

Watts RR, Wallingford KM, Williams RW, House DE, Lewtas J (1998) Airborne exposures to PAH and PM2.5 particles for road paving workers applying conventional asphalt and crumb rubber modified asphalt. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* **8**(2), 213-229.

WHO (2004) Asphalt (Bitumen). In 'Concise International Chemical Assessment Document 59.' pp. 38)

Wise SA, Sander LC, May WE (1993) Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons by liquid chromatography. *Journal of Chromatography A* **642**(1-2), 329-349.

World Health Organization (2005) Asphalt (Bitumen). No. Concise international chemical assessment 59,, Geneva.

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine



Montreuil, le 17 novembre 2008

AFSSET
Monsieur Henri Poinsignon
Directeur
253 avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex

COURRIER REÇU LE

19 NOV. 2008

4078

CTS

copie 3 tutelles.

CB/SJ

Monsieur,

Dans le cadre du développement du secteur santé au travail de la Fédération Nationale des Salariés de la construction de la Cgt, nous souhaitons contribuer largement au développement de la sécurité et de la santé des travailleurs du secteur routier.

A cette fin, nous souhaitons voir saisir votre agence afin de synthétiser les enquêtes menées sur les produits utilisés pour la réalisation des routes, de compléter et pondérer ces résultats, d'identifier et évaluer les risques et leurs effets sur l'homme et de proposer les mesures de prévention adéquates.

Si l'entrée en vigueur de REACH donne désormais l'obligation aux entreprises produisant ou important des substances chimiques d'apporter la preuve de leur innocuité pour la santé, ou de documenter la maîtrise des risques existants, nous estimons que votre expertise permettra d'accroître la compréhension du risque pour les salariés et les préventeurs.

Pour appuyer notre demande, vous trouverez en pièces jointes une étude de Prévention BTP et différents documents de l'INRS.

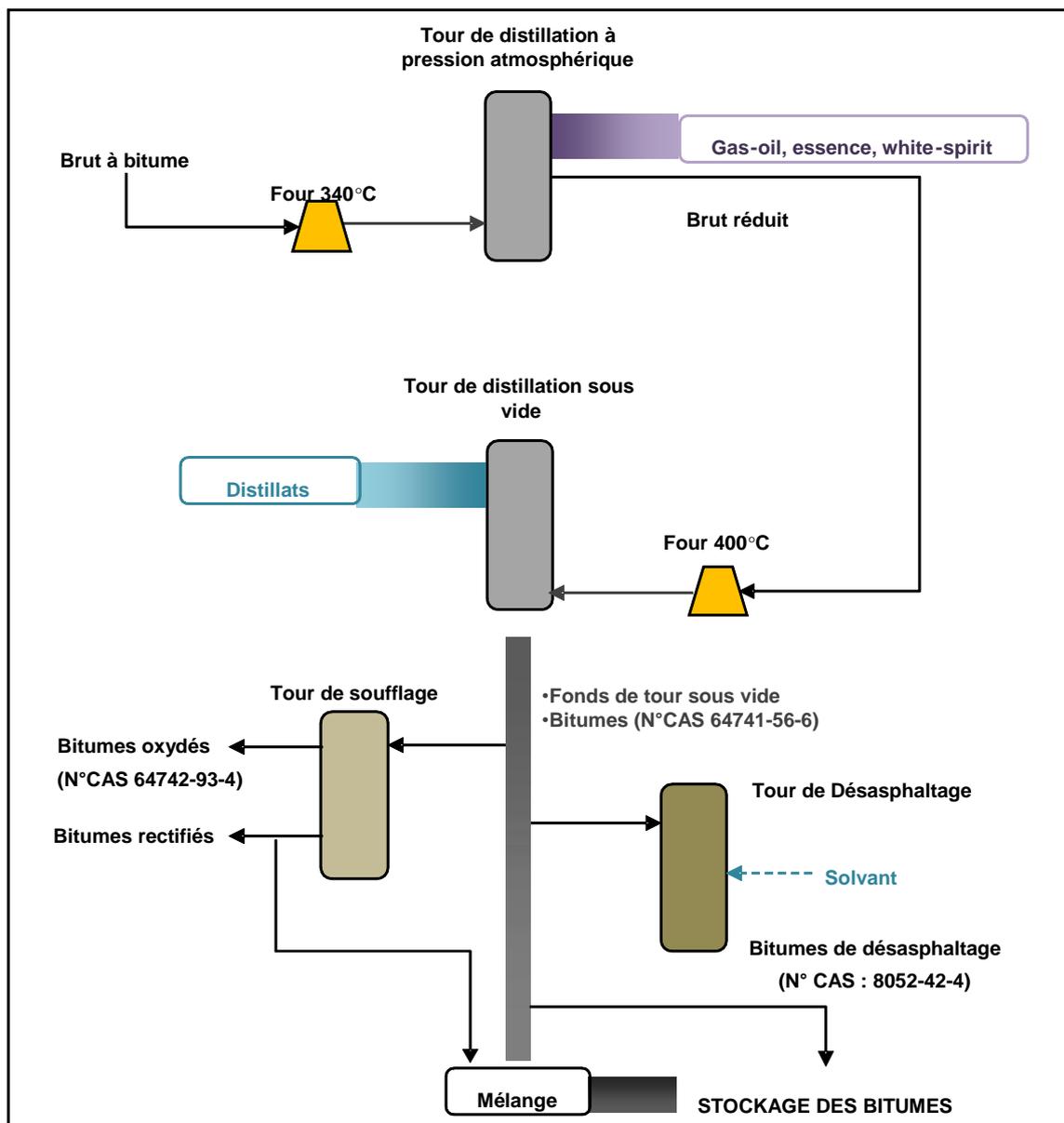
D'autre part, la CRAM de Bretagne a fait une étude sur ce sujet, un PowerPoint est disponible sur www.hst.fr et personnellement j'ai connu un cas de cancer du nez concernant Monsieur [REDACTED]

Vous remerciant par avance des suites que vous porterez à notre saisine, nous vous prions d'agrée, Monsieur le directeur, nos respectueuses salutations.

Pour la FNCS-CGT

Christian Blicq
Animateur du secteur Santé/travail

Annexe 2 : Fabrication des bitumes



Après plusieurs évolutions historiques, la fabrication du bitume se fait actuellement par distillation directe. Le bitume est obtenu dans une unité particulière de raffinerie par fractionnement du pétrole par 2 étapes de distillation : 1) la distillation atmosphérique, puis 2) la distillation sous vide.

1) Distillation atmosphérique

Ce mode de raffinage consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340°C, est envoyé dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour est le brut réduit.

Cette étape permet de concentrer les molécules de haut poids moléculaires, les molécules plus légères étant concertées dans les fractions pétrolières de type essence, gazole, kérosène, etc.

2) Distillation sous-vide

Le pétrole réduit récupéré en fond de tour ou « brut réduit », provenant de la distillation atmosphérique est, après réchauffage aux alentours de 400°C, envoyé dans une colonne où règne une pression réduite (quelques dizaines d'hectopascals). Il est possible dans ce type d'unité, de fabriquer directement toutes les classes de bitume du 20/30 au 160/220.

Cette seconde étape permet de poursuivre la concentration des molécules de haut poids moléculaires, la majeure partie des molécules légères étant alors éliminées des bitumes.

Selon la façon dont est conduite la fabrication, on obtient des bitumes de pénétrabilité plus ou moins élevée.

Les deux étapes de distillation peuvent être complétées par d'autres procédés afin de conférer au bitume produit les propriétés attendues.

Dans certains cas par exemple, en complément de la première étape de raffinage, une étape de désasphaltage au solvant est réalisée sur le fond de distillation sous vide, afin d'extraire les fractions lubrifiantes et donner un bitume dur à usage routier.

Enfin, dans le cas où une fraction de brut réduit est trop molle pour en faire un bitume routier, le raffineur procédera à un soufflage à l'air pour rectifier le bitume avant de le réinjecter dans le mélange, ou obtenir un bitume oxydé.

Annexe 3 : Tests et définitions

Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille (définie dans la norme EN 1426)

Le test de pénétrabilité à l'aiguille permet de déterminer la dureté d'un bitume, et par conséquent, la classe à laquelle il appartient. Ce test concerne tous les types de bitume. Son principe repose sur la mesure en 1/10 de millimètre de l'enfoncement d'une aiguille, soumise pendant 5 secondes à une charge de 100g, sur un échantillon de bitume maintenu à 25 °C.

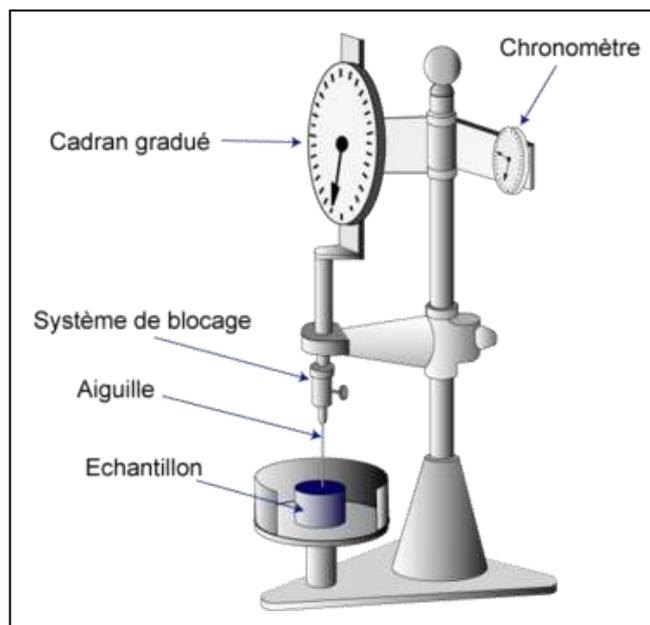


Figure 1 : Montage pour test de pénétrabilité à l'aiguille en laboratoire

Chaque classe de bitume est alors définie par un intervalle de pénétrabilité. Par exemple, un bitume de classe 20/30 est caractérisé par un enfoncement de l'aiguille entre 20 et 30 dixièmes de millimètre. Par conséquent, plus la valeur absolue de pénétrabilité est élevée, plus le bitume est mou.

Indice de pénétrabilité

A noter que l'indice de pénétrabilité d'un bitume (IP), grandeur calculée à distinguer du test de pénétrabilité, permet de décrire la façon dont la consistance dudit bitume évolue avec la température. Il permet de classer les bitumes selon leur susceptibilité à la température. Un indice négatif sera caractéristique d'un bitume à forte susceptibilité (c'est-à-dire pour lequel une faible augmentation de température conduit à une forte augmentation de la pénétrabilité), les bitumes de distillation directe ont un IP voisin de 0 (entre -1 et +1 en général), et les bitumes oxydés ont un IP positif, et seront d'autant moins susceptibles que leur IP est élevé.

Détermination du point de ramollissement - Méthode bille et anneau (définie dans la norme EN 1427)

Les bitumes n'étant pas des corps purs et leur composition élémentaire étant variable, ils n'ont pas de point de fusion défini. Leur consistance évoluant avec la température, on fixe ainsi un repère de changement de consistance dans des conditions normalisées.

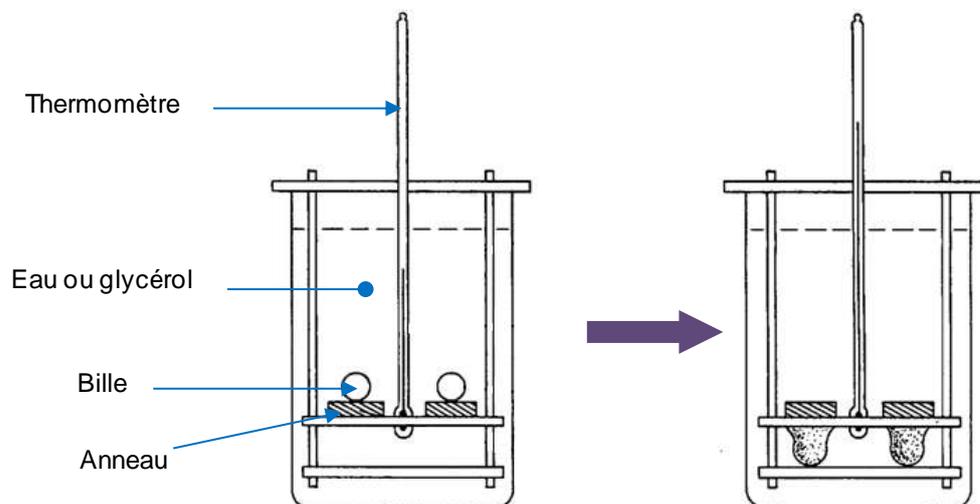


Figure 2 : Montage pour test de température bille et anneau (source Eurobitume)

Une petite bille en acier de 3,5 g et de 9,5 mm de diamètre est posée sur un disque de bitume préalablement coulé dans un anneau de 19,8 mm de diamètre intérieur, lui-même placé sur un support normalisé. Le tout est installé dans un bain d'eau dont la température initiale et stabilisée est de 5 °C (Figure).

La face inférieure de l'anneau de bitume se trouve à 25,0 +/- 0,4 mm de la surface supérieure de la plaque du dessous du support, ce qui correspond à la distance de chute de la bille au cours de l'essai.

Le bain est chauffé à une vitesse constante de 5 °C/min, sous agitation, et le point de ramollissement bille et anneau (souvent noté TBA) est la température à laquelle la poche de bitume, formée pendant la chute de la bille, touche la plaque de référence placée sous l'anneau de bitume.

Annexe 4 : Fluxants dont l'utilisation a été revue par le Sétra

Recommandation d'utilisation	Fluxant commercial) (nom	Origine	Producteur
Utilisation possible	BITUFLUX 80	Pétrochimique	EXXONMOBIL
	CAROMAX 26 LN	Pétrochimique	PETROCHEM
	GREEN OIL	Pétrochimique	GREENWORLD
	GREENFLUX 2000	Pétrolier	TOTAL
	GREENFLUX SD	Pétrolier	TOTAL
	MECAFLUX	Pétrochimique	GREENWORLD
	NYFLUX 504*	Pétrolier	NYNAS
	PETROFLUX	Pétrochimique	VFT FRANCE
	ADHEFLUX	Pétrochimique	VFT FRANCE
	SIVIAFLUX 2006 C	Pétrochimique	SIVIA
	SIVIAFLUX 2006 NC	Pétrochimique	SIVIA
	SIVIAFLUX	Pétrochimique	SIVIA
Arrêt de l'utilisation recommandé (produits classés comme cancérogènes, mutagènes et/ou reprotoxiques)	GEDEFLUX 200-3	Carbochimique	VFT FRANCE
	GEDEFLUX P	Carbochimique	VFT FRANCE
	PETROMIX	mixte (carbochimique + pétrochimique)	VFT FRANCE
	PETROFLUX «ancienne formule»	Pétrochimique	VFT FRANCE

Annexe 5 : Méthodes d'analyse et de caractérisation de la composition des bitumes

De nombreuses méthodes d'analyse peuvent être employées pour caractériser la composition des bitumes ainsi que des liants bitumineux. Les principales sont brièvement décrites ci-dessous, en insistant sur leur emploi particulier dans le cadre de la problématique de l'expertise :

Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

Cette technique est utilisée pour détecter et analyser les espèces oxygénées contenues dans les bitumes. Avec les bitumes modifiés polymères, elle est utilisée pour identifier et quantifier les polymères ajoutés. L'analyse quantitative n'est possible que pour les polymères dont les bandes d'absorption n'interfèrent pas avec celles du bitume. La microscopie FTIR permet une détermination locale de la structure de la matière. Cette technique, appliquée à des bitumes modifiés par polymères, permet de déterminer la distribution du polymère dans le bitume et de montrer les variations de la teneur en polymère avec la nature chimique (aromatiques, aliphatiques...) des fractions de bitume qui contribuent au gonflement du polymère.

La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)

Cette technique est utilisée avec des bitumes pour fournir des informations sur la structure, en particulier l'aromaticité, à partir de spectres de ^{13}C et ^1H . L'ajout de polymère modifie généralement le spectre ^1H permettant ainsi de détecter le polymère et dans une certaine mesure, de déterminer son contenu après étalonnage. Avec certains polymères comme le caoutchouc à base d'éthylène et propylène (Ethylene - Propylene - Rubber ou EPR), l'information ne peut être obtenue à partir du spectre ^{13}C . L'identification du polymère et de sa composition est rendue plus facile lorsque l'analyse est effectuée sur la fraction insoluble dans le pentane afin d'augmenter la concentration de la phase polymère.

La distillation simulée

C'est un type de chromatographie en phase gazeuse dans lequel les résultats sont exprimés comme le point d'ébullition des produits. Il peut être utilisé pour détecter la présence de composés volatils entre 100 et 300 °C, provenant de l'ajout de stabilisants ou de plastifiants du pétrole (ou la présence de fluxants). Compte tenu de la faible quantité de ces huiles qui sont ajoutées, l'analyse n'est que qualitative et non quantitative. Toutefois, lorsque les liants de polymère modifiés sont utilisés dans les enduits superficiels, cette technique est capable à la fois d'identifier et de quantifier les fluxants et les fluidifiants. Elle est également utile comme moyen de surveiller l'évolution des produits volatils dans la chaussée ou d'étude de stabilité en laboratoire.

La chromatographie de perméation sur gel (Gel Permeation Chromatography ou GPC)

La GPC est une technique d'analyse utile pour la séparation de composés très différents en tailles moléculaires, tels les bitumes et les polymères. Si aucune réaction chimique n'a eu lieu entre le bitume et le polymère, cette technique peut être utilisée pour séparer la fraction de polymère, qui peut alors être précisément identifiée par spectroscopie infrarouge.

La séparation par classe de composés par la chromatographie d'adsorption

La technique de séparation en fractions par chromatographie sur colonne d'alumine ou de gel de silice, qui est largement utilisée pour l'analyse des bitumes classiques, est moins appropriée aux bitumes modifiés polymères. Néanmoins, le test peut être effectué afin de déterminer les fractions avec lesquelles le polymère réagit. Il faut noter qu'en général, le

polymère précipite complètement avec les asphaltènes dans le n-heptane. La caractérisation chimique des bitumes est basée sur leur séparation en quatre grandes classes de composés - asphaltènes, résines, cycliques et saturés - à l'aide de solvants de précipitation et par chromatographie d'adsorption (IARC 1985).

Annexe 6 : Informations présentes dans les enregistrements des substances bitumineuses dans le règlement REACH

CAS N°	EINECS N°	# REACH Registrations	Name; European English		Manufacturing route	Paving		Roofing **		Mastic	
						Application	Use conditions	Application	Use conditions	Application	Use conditions
8052-42-4	232-490-9	72	Straight run Bitumen		Vacuum distillation, Propane Precipitated Asphalt.	Hot mix asphalt Warm mix asphalt Half-warm mix asphalt Emulsions	140 – 180 °C 100 – 140 °C 60 – 100 °C Ambient	Saturated felt manufacture Felt application Torch/hotair applied Peel & Stick Mechanically fixed membranes Membrane saturant and coating -- EU only	160 - 230°C Ambient > Soft Pt. Ambient 160 - 200°C	Roofing, flooring and paving mastic	up to 2008: < 280 °C since 2008: 160 °C - 230 °C
64741-56-6	265-057-8	59			Vacuum distillation						
92062-05-0	295-518-9	19	Vacuum flashed visbroken residue		Thermal cracking + vacuum distillation			Saturated felt manufacture Felt application Type 1 BURA Appl.	160 - 230°C Ambient 160 - 230°C		
64742-93-4	265-196-4	60	Air rectified Bitumen	PI ≤ +2.0	Mild oxidation of bitumen to manufacture grades meeting straight run bitumen properties.						
			Oxidised Bitumen	PI > +2.0	Intense oxidation of a soft bitumen	Not used		°Membrane manufacture °Shingles manufacturing °Type II BURA Appl. °Type III&IV BURA Appl. Torch/hotair applied Mod Bit 'Peel & Stick' Shingle installation Mechanically fixed membranes	up to 200°C 170 - 230°C 175 - 250°C 210 - 270°C > Soft. Pt. Ambient Ambient Ambient	Not used	
100684-39-7	309-712-9	1	Other Manufacturing routes					Non-specific uses			
100684-40-0	309-713-4	1									

Notes:

* The table above represents a summary of the most common bitumen production routes and uses based on CASRN classification. This table aims to facilitate understanding and discussions on the subject. For detailed information please see the respective Global Perspective documents published by the refining, paving, roofing and mastic sectors.

Annexe 7 : Liste des classes de danger du règlement CLP

Classes de danger physique

- explosibles
- aérosols inflammables
- gaz comburants
- gaz sous pression
- liquides inflammables
- matières solides inflammables
- substances et mélanges autoréactifs
- liquides pyrophoriques
- matières solides pyrophoriques
- substances et mélanges auto-échauffants
- substances et mélanges qui, au contact de l'eau, dégagent des gaz inflammables
- liquides comburants
- matières solides comburantes
- peroxydes organiques
- substances ou mélanges corrosifs pour les métaux
- gaz inflammables

Classes de danger pour la santé

- toxicité aigüe
- lésions oculaires graves/irritation oculaire
- sensibilisation respiratoire ou cutanée
- mutagénicité sur les cellules germinales
- cancérogénicité
- toxicité pour la reproduction
- toxicité spécifique pour certains organes cibles-exposition unique
- toxicité spécifique pour certains organes cibles-exposition répétée
- danger par aspiration

Classes de danger pour l'environnement

- dangereux pour le milieu aquatique
- dangereux pour la couche d'ozone
- corrosion cutanée/irritation cutanée

Annexe 8 : Le vannier

Préambule.

Même s'il n'existe plus, le poste de vannier (ou homme-vanne, homme de rampe, rampiste), mérite d'être particulièrement évoqué ; c'était en effet l'un des plus difficiles à maîtriser et l'un des plus exposés aux émissions de liants routiers au cours des années 70-80, alors que la pratique des enduits superficiels était à son apogée et que les liants contenant des dérivés du goudron de houille étaient encore largement utilisés.

"Nous ne voulons pas clore cette rapide présentation..... sans souligner la nécessité d'avoir sur une épandeuse un homme-vanne qualifié, connaissant parfaitement les réglages de sa machine,... qui travaille dans des conditions très pénibles et pour lequel un effort de sécurité et de protection reste à faire... un travail aussi rigoureux au milieu d'un nuage de vapeur près d'appareils à température élevée mériterait un peu plus d'attention de notre part" (LCPC 1975).

La machine, le poste de travail.

La répandeuse (ou bouille) est un camion équipé d'une citerne calorifugée, avec un système de chauffage maintenant le liant à la température optimale de répandage. Ce dernier est assuré à partir d'une rampe alimentée par une pompe doseuse asservie à la vitesse d'avancement (2-3 km/h). En général, la répandeuse est équipée d'une deuxième rampe, dotée d'un compresseur auxiliaire, alimentant des diffuseurs à dope.

Quelle que soit la géométrie de la route (profil (bombé), largeur, embranchements, etc.) le vannier, placé sur la plate-forme arrière de la répandeuse, devait s'assurer de la répartition régulière du liant, un excès pouvant provoquer un ressuage ultérieur, un manque étant responsable d'un rejet de granulats (plumage).

Il disposait pour cela de la rampe dont il pouvait régler la hauteur ainsi que la largeur par l'intermédiaire d'allonges suivant le mieux possible le tracé des rives. La rampe, munie de vanes lui permettait de gérer l'orientation et le débit des jets de liant qui devaient être parfaitement recoups.

Une attention particulière devait être portée aux raccords (joints) transversaux et longitudinaux, responsables de désordres importants si mal exécutés.

Travaux, produits.

Le vannier et sa répandeuse étaient concernés par plusieurs types de travaux dont notamment :

- la pose de couches d'accrochage (pellicules de liant permettant le collage de couches d'enrobés entre elles), de couches de cure (couche protectrice étanche) ; l'émulsion cationique de bitume (65% à 69% d'eau dans le liant) était le produit le plus approprié pour ces travaux.
- la pose d'enduits superficiels (enduits de scellement, gravillonnage) ; le liant était alors sous forme anhydre ou d'émulsion cationique (répartition 50-50 en % tonnage, dans les années 80).

Suivant les exigences, le bitume était utilisé pur, fluxé, composé (bitume goudron) ou modifié (bitume polymère).

Conditions de travail, exposition, métrologie HAP.

Compte tenu de sa position, à la verticale de la rampe, et du manque d'aménagement particulier du poste, l'exposition du vannier était importante, dépendant essentiellement des

conditions climatiques (forte température ambiante, vent nul ou défavorable) ainsi que du type de liant utilisé et des températures de pose.

Des prélèvements atmosphériques, axés sur les HAP considérés alors comme les polluants à risque majeur ont été effectués au cours des années 80, lors de la pose d'enduits superficiels. Tous les postes ont été évalués : vannier, gravillonneur, conducteur compacteur, etc.

Bien que déjà très utilisées à l'époque, les émulsions n'ont pas été prises en compte car considérées comme peu polluantes a priori : elles étaient en effet généralement formulées à partir de bitume pur ou modifié (absence de dérivés houillers) et répandues à faibles températures (souvent de 50 à 75°C). Les produits concernés étaient donc des liants anhydres : des bitumes-goudrons (60-40) et des bitumes fluxés par 10% d'huiles de houille ou de pétrole, et un bitume fluidifié ; les températures de pose variaient de 130 à 160° C.

Environ 80 prélèvements individuels ont été effectués, tous postes et produits confondus. Le poste de loin le plus exposé était celui de vannier lors du répandage de bitume-goudron : 9 valeurs allant de 240 à 4900 ng.m⁻³ de B[a]P avec une moyenne de 1500 ng.m⁻³ (pour une concentration des liants de l'ordre de 3 g/kg en B[a]P). Ces valeurs dépassent largement la recommandation française de la CNAMTS de 150 ng.m⁻³ de B[a]P (voir tableau 1 ci-après).

Tableau 1 : Concentrations de B[a]P atmosphérique mesurées lors de la pose d'enduits superficiels dans les années 1980 (d'après données INRS).

Date	Nature du liant	Concentration B[a]P (ng.m ⁻³)					
		Vannier	Gravillonneur	Chauffeur répandeuse	Retoucheur - homme lance	Compacteur	Chef d'équipe
03/07/1980	bitume goudron 60-40	840-2900	63-34	43-11	8-9		
04/07/1980	bitume goudron 60-40	4910	74	86	15		
24/07/1980	bitume goudron 60-40	1180	225			38-42	
25/07/1980	bitume goudron 60-40	910-1260	198-270				180
06/08/1980	bitume fluxé HIH 90-10	45	15-15				
06/08/1980	bitume fluxé HIH 90-10	60	30-22				
19/08/1980	bitume fluxé HP 90-10	< 3	<3				
20/08/1980	bitume fluxé HP 90-10	< 5 - <4	<5 - <4				
25/08/1980	bitume fluxé HLH 90-10	94	15				
26/08/1980	bitume fluxé HLH 90-10	52-30	6				
03/09/1980	bitume goudron pétr 50-50	297-135	7-15				
04/09/1980	bitume goudron pétr 50-50	300-680	30-75				
25/09/1980	bitume fluxé HLH 90-10	91-15					
26/09/1980	bitume fluxé HLH 90-10	57					
03/07/1981	bitume goudron 60-40	240				120	
03/07/1981	bitume goudron 60-40	400	250				
25/05/1985	bitume fluxé HLH 90-10	20	15		20		
10/09/1986	bitume fluxé HLH 90-10	100	14	45			
10/09/1986	bitume fluxé HLH 90-10	11	15				
14/10/1986	bitume fluxé HLH 90-10	10	4	7			

Note : La recommandation avait été établie pour une exposition continue de 8 h durant une vie professionnelle. Pour une interprétation objective de l'exposition, il faut tenir compte du caractère saisonnier de cette activité et de l'utilisation moins fréquente du bitume-goudron par rapport aux autres liants utilisés à cette époque (environ 10 % de la totalité des enduits superficiels).

Prévention.

Quelques essais d'aménagement du poste ont été effectués. Par ex. création d'un flux d'air horizontal qui renvoyait les fumées devant le vannier, d'où réduction de l'exposition et meilleure vision du répandage : il n'y a pas eu de réelle concrétisation à cause des difficultés de mise en œuvre.

Quant au port d'EPI, il était rarement observé...

Deux mesures de prévention ont définitivement réglé le problème :

- disparition de l'utilisation des bitumes-goudrons à partir des années 80.
- dans la même période, transfert des commandes des vannes au poste de conduite de la répandeuse et donc disparition du poste traditionnel de vannier...

Réparation.

Bien que particulièrement exposé aux HAP, un sous groupe de type "vannier/bitume-goudron" spécifiquement français voire régional (grand Nord-est de la France) correspondant à des tonnages de produits et un nombre d'opérateurs relativement réduits, n'est pas pris en compte dans les enquêtes épidémiologiques internationales, notamment dans l'étude européenne la plus récente.

Or, le manque ou la non consistance de données épidémiologiques ainsi qu'un faible effectif concerné sont généralement des éléments rédhibitoires pour une éventuelle inscription dans la liste limitative d'un tableau de maladie professionnelle.

C'est pourquoi, lors de la récente révision du TMP 16 bis, le cas des revêtements routiers à base de dérivés houillers et le poste de vannier ont fait l'objet de longs débats. Au final, ils ont été retenus pour les tumeurs primitives de l'épithélium urinaire, mais non pour le cancer broncho-pulmonaire. Cependant, la porte pour la reconnaissance de ce dernier reste entrouverte sous la forme d'une annexe adressée aux Comités Régionaux de Reconnaissance des Maladies Professionnelles (CRRMP), et qui cite la pose de bitumes-goudrons et d'anti-kérosènes comme étant à prendre particulièrement en considération.

Annexe 9 : Les HAP

Le goudron de houille et ses dérivés (brai et huiles) dont la cancérogénicité est reconnue depuis plusieurs décennies (voir Tableau des Maladies Professionnelles 16 bis (République française 2009) et classements CIRC (IARC 1985)) ont été très utilisés comme liants hydrocarbonés au cours des années 50, avec des tonnages proches de ceux des bitumes routiers : application sous forme d'enrobés ou d'enduits superficiels, purs ou modifiés polymères, anhydres ou en émulsion.

On assista ensuite à la diminution progressive de l'utilisation des liants les plus chargés en HAP cancérogènes avec la fin des "tout goudron" (zéro bitume) début des années 70, des bitumes- goudrons début des années 90, des anti-kérosènes au milieu des années 2000, sans qu'il y ait disparition totale car toujours présents comme huiles de fluxage du bitume à la fin des années 2000.

Parmi ces dernières, les huiles légères contiennent environ 10 fois plus de HAP cancérogènes que le bitume ; cependant, du fait de leur faible proportion dans le liant (10%), le produit prêt à l'emploi est à peine plus chargé que le bitume lui-même (quelques mg/kg de B[a]P) avec pour conséquence des concentrations atmosphériques en B[a]P en deçà de la recommandation (150 ng.m^{-3}) adoptée en France pour les expositions professionnelles.

Compte tenu des faibles niveaux de HAP observés lors du répandage de ce type de produits et à fortiori de bitumes exempts de dérivés houillers, l'intérêt de continuer à pratiquer leur métrologie a été contesté par certains hygiénistes proposant alors de se reporter sur d'autres molécules présentes dans les liants et suspectées cancérogènes (naphtalène, HAP alkylés, hétérocycles soufrés ou azotés, etc.) voire de privilégier des méthodes plus globales.

Si effectivement il peut paraître réducteur d'attribuer aux seuls HAP un éventuel potentiel cancérogène des fumées de bitume, leur évaluation reste cependant incontournable car quelques situations peuvent être encore génératrices d'émissions non négligeables de HAP, notamment lors de l'utilisation encore possible de certains fluxants non recommandés, de travaux en milieux confinés mal ventilés (Breuer, Hahn *et al.* 2011) et surtout au cours de réfections ou de recyclage d'anciennes chaussées (Hugener, Emmenegger *et al.* 2010).

Cette pratique, qui consiste à réutiliser les anciens matériaux est en plein essor : de 25% en 2010, la quantité de produits recyclés devrait passer à 60% en 2012. La présence plus que probable de dérivés houillers, dont les plus chargés en HAP, dans ces matériaux justifie pleinement le maintien d'une "métrologie HAP", qu'elle soit effectuée dans le produit massif avant fraisage ou par prélèvements atmosphériques et urinaires lors de la réutilisation à chaud comme à froid, en centrale ou *in situ*.

Cancérogénicité des HAP et traceurs de risque (voir tableau 1 ci-dessous).

Le pouvoir cancérogène des HAP est essentiellement attribué aux 4-6 cycles. Parmi ceux-ci, après réévaluation récente, le CIRC en classe une quinzaine (IARC 2010) : seul le B[a]P est considéré comme cancérogène avéré pour l'Homme (classe 1) ; trois, dont le DB[ah]A, sont classés cancérogènes probables (2A), 11 autres (dont un méthylé) comme possibles (2B). Huit d'entre eux, B[a]P et DB[ah]A compris, sont en catégorie 2 de la classification européenne (substances devant être considérées comme cancérogènes pour l'Homme).

Tableau 1 : cancérogénicité, traceurs, TEF.

HAP	CIRC indice K	UE indice K	EPA revu 1993	CE 2005/107 environnement	INRS metropol professionnel	TEF INERIS
acénaphène						0,001
acénaphylène			D			0,001
anthanthrène	3					
anthracène	3		D			0,01
benzo[a]anthracène	2 B	2	B 2	oui	oui	0,1
benzo[a]pyrène	1	2	B 2	1 ng/m3	150 ng/m3	1
benzo[b]fluoranthène	2 B	2	B 2	oui	oui	0,1
benzo[c]phénanthrène	2 B					
benzo[e]pyrène	3					
benzo[ghi]pérylène	3		D		oui	0,01
benzo[j]fluoranthène	2 B	2		oui		
benzo[j]acéanthrylène	2 B					
benzo[k]fluoranthène	2 B	2	B 2	oui	oui	0,1
chrysène	2 B	2	B 2			0,01
coronène	3					
cyclopenta[cd]pyrène	2 A					0,1
dibenzo[ac]anthracène	3					0,1
dibenzo[ah]anthracène	2 A	2	B 2		oui	1
dibenzo[ah]pyrène	2 B					
dibenzo[ai]pyrène	2 B					
dibenzo[al]pyrène	2 A					
fluoranthène	3		D			0,001
fluorène	3		D			0,001
indéno[1,2,3,cd]pyrène	2 B		B 2	oui	oui	0,1
5-méthyl chrysène	2 B					
naphtalène	2 B	3	C			0,001
pérylène	3					
phénanthrène	3		D			0,001
pyrène	3		D			0,001
triphénylène	3					

col 1 CIRC : 1 cancérogène pour l'homme, 2A probable, 2B possible

col 2 UE : 2 assimilé à une substance cancérogène pour l'homme

col 3 US EPA : B2 probablement cancérogène pour l'homme, D "not classifiable"

Le potentiel cancérigène d'un échantillon massif ou atmosphérique peut être estimé à partir du B[a]P seul, ou d'un choix pertinent de HAP en utilisant par exemple la notion de "TEF values" (facteurs équivalents toxiques) exprimées pour chaque HAP actif par rapport au B[a]P (Doornaert and Pichard 2003) (Cette approche considère l'effet additif de chacun sans tenir compte d'effets synergiques ou contraires possibles).

Au plan atmosphérique, la directive européenne 2005/107/CE définit une liste de 7 HAP à surveiller dont le B[a]P pour lequel elle fixe la valeur cible environnementale de 1 ng.m^{-3} (En France, le CSHPF recommande $0,7 \text{ ng.m}^{-3}$, avec un objectif de qualité à $0,1 \text{ ng.m}^{-3}$).

Concernant plus précisément les atmosphères de travail, le choix et les valeurs limites d'un ou plusieurs traceurs des HAP, il n'existe actuellement, au plan réglementaire, aucune harmonisation entre les diverses instances sanitaires internationales ni même nationales. Ainsi, si de nombreux pays ont adopté le B[a]P comme marqueur, certains dont les USA sont encore attachés aux méthodes globales comme la fraction soluble dans benzène : BSM à 0.2 mg.m^{-3} de l'OSHA (reprise de l'ancien CTPV "coal tar pitch volatiles").

Un autre choix pour l'hygiéniste du travail est d'adopter la liste des 16 HAP "prioritaires" de l'US EPA (Environmental Protection Agency) établie en 1976. Bien qu'incluant le B[a]P, le DB[ah]A et 5 autres HAP classés 2B par le CIRC, elle est difficile à exploiter sous forme globale car elle accorde alors un poids trop important aux 2-4 cycles dont la plupart sont inactifs (la Norvège l'aurait pourtant adoptée avec une limite à $40 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$).

Pourquoi le B[a]P.

C'est un des plus actifs donc des plus étudiés (isolé et synthétisé début des années 1930), un de ceux pour lequel on possède le maximum de données métrologiques, toxicologiques, mécanistes, etc.

Il est représentatif des HAP de 4-6 cycles présents dans les matrices d'origines diverses (échantillons massifs, filtres atmosphériques) : voir par ex. l'étude anglaise (Unwin, Cocker *et al.* 2006) qui à partir de 219 prélèvements effectués sur 25 sites industriels différents observe une très forte relation entre B[a]P et HAP de 4-6 cycles ($r^2 = 0,97$).

Il est représentatif du potentiel cancérigène d'échantillons atmosphériques. Ainsi, la part du B[a]P dans l'activité cancérigène totale (effectuée notamment à partir des contributions respectives des HAP de la liste européenne) a été estimée dans plusieurs secteurs urbains et industriels : les valeurs varient entre 27 et 75% (Menichini 1992; Petry, Schmid *et al.* 1996).

Il est admis comme traceur par la majorité des hygiénistes, industriels, syndicats, etc. Ainsi, on le retrouve dans la plupart des données métrologiques isolées ou incluses dans des enquêtes épidémiologiques (sous forme de matrice d'exposition comme dans la dernière étude européenne sur les fumées de bitume (Burstyn, Boffetta *et al.* 2003b).

Sa métabolisation et ses mécanismes d'action sont bien connus : formation de plusieurs dérivés hydroxylés dont le 3-OHB[a]P utilisé comme traceur urinaire et l'époxy-diol à l'origine de la formation d'adduits et de la cancérisation.

Il a fait l'objet de plusieurs études d'extrapolation dose-réponse linéaire sans seuil permettant d'établir la relation entre concentration atmosphérique et risque cancérigène : par exemple, l'adoption par l'OMS d'un ERU (excès de risque unitaire" vie entière") situé à $8,7.10^{-5}$ par ng.m^{-3} de B[a]P). Plus récemment : après méta-analyse d'une quarantaine d'études en milieu professionnel, Armstrong (Armstrong, Hutchinson *et al.* 2004) estime le risque relatif de contracter un cancer pulmonaire à 1,076 pour une exposition de $1 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$ de B[a]P pendant 40 ans d'activité.

C'est un des HAP les plus utilisés lors d'études in vivo et/ou in vitro, en tant que tel ou comme référentiel pour l'étude de l'activité d'autres molécules ou mélanges complexes (Cf. études INRS exposition de rongeurs aux émissions de bitume chaud).

Au plan métrologie atmosphérique, il est généralement facile à évaluer. Le piégeage s'effectue par filtre (il est sous forme essentiellement particulaire) suivi d'une cartouche spécifique des HAP plus légers. Dans la plupart des cas, le dosage ne pose pas de problèmes particuliers : il est en principe, bien séparé des autres HAP par les techniques analytiques utilisées (CLHP ou CPV). Par contre, l'analyse de fumées de bitume peut être plus délicate et nécessiter des démarches spécifiques.

Pourquoi 150 ng/m³.

Il existe une grande disparité entre les pays ou entités sanitaires ayant choisi le B[a]P comme traceur de l'exposition atmosphérique en milieu professionnel. Les valeurs moyennes d'exposition correspondantes sont généralement supérieures au $\mu\text{g.m}^{-3}$: $2 \mu\text{g.m}^{-3}$ en Suède, Pologne, Pays-Bas, Suisse, Allemagne (avec, pour cette dernière, une TRK spécifique cokeries de $5 \mu\text{g.m}^{-3}$), $5 \mu\text{g.m}^{-3}$ en Tchéquie, au Québec et $10 \mu\text{g.m}^{-3}$ en Finlande.

Certains hygiénistes (Mastrangelo, Fadda *et al.* 1996) considèrent ces chiffres comme bien trop élevés. Aux Pays Bas, le NHC propose en 1994 la valeur de 315 ng.m^{-3} de B[a]P (Jongeneelen 2001).

En France pas de valeur limite mais une recommandation CNAMTS-INRS de 150 ng.m^{-3} de B[a]P établie en 1974 (VLE soviétique tirée des travaux de LM Shabad). Cette valeur, jugée trop sévère et décriée à l'époque par les industriels, est d'autant mieux admise aujourd'hui que de nombreux secteurs tels que les fonderies, fabriques d'aluminium, travaux routiers, etc. respectent cette limite après les mesures de prévention appropriées : substitution des produits polluants, changement de technique, ou mise en place d'une ventilation adaptée.

Note.

Concernant les diverses normes HAP, la dysharmonie observée pour les valeurs atmosphériques existe aussi pour les échantillons massifs. C'est le cas en particulier des déchets routiers susceptibles d'être recyclés.

Annexe 10 : Tableaux de résultats des extractions COLCHIC

Liste des agents chimiques mesurés dans les grandes familles de tâches

Pour les deux grandes familles de tâches B34 et B32, les tableaux 1 et 2 recensent les agents chimiques qui ont fait l'objet d'une mesure de concentration lors des campagnes métrologiques, classés par familles selon la nomenclature COLCHIC.

Tableau 1 : Agents chimiques recherchés lors de la campagne de mesure effectuée pour la famille de tâche B34 (au total 54 polluants)

Composés organiques volatils		HAP	Métaux	Fibres	Divers
Ethanol Alcool isopropylique Acétaldéhyde Benzène Butanone Propylbenzène Heptane n-hexane o-xylène m-xylène Trichloréthylène Éthylbenzène Triméthylbenzène	Octane Toluène Formaldéhyde 4-éthyltoluène 2-éthyltoluène 1,2,3- triméthylbenzène 1,2,4- triméthylbenzène Mésitylène	Benzo[a]pyrène Naphtalène Anthracène Fluoranthène Pyrène Chrysène Benzo[a]anthracène Dibenzo[a,h]anthracène Benzo(e)acéphénanthrylène Benzo[k]fluoranthène Benzo[ghi]perylène Indeno[1,2,3-cd]pyrène	Plomb	Fibres (L>5µm , D<3µm) Fibres (L>5µm, D>3µm) Fibres d'amiante (L>5µm, D<3µm) Fibres minérales artificielles (L>5µm, D<3µm)	Quartz Cristobalite Ammoniac anhydre Fraction soluble CH ₂ Cl ₂ Fraction soluble C ₆ H ₆ Monoxyde de carbone Dioxyde de carbone Particules diesel - carbone organique - carbone élémentaire - carbone total Sulfates particuliers solubles
			Acide	Alcalins et alcalino-terreux	Poussières
			Acide formique	Calcium	Poussières inhalables Poussières alvéolaires Poussières totales

Tableau 2 : Agents chimiques recherchés lors de la campagne de mesure effectuée pour la famille de tâche B32 (au total 91 polluants)

Composés organiques volatils			HAP	Métaux	Fibres
Acétate de n-butyle Acétate d'éthyle Acétate de 2-éthoxyéthyle Acétone Ethanol Alcool benzylique Alcool isopropylique Dichlorométhane Cumène Acétate d'isobutyle Cyclohexanone 4-hydroxy-4-méthylpentan-2-one 2-méthylpropane-1-ol Alcool butylique 2-éthoxyéthanol 4-méthylpentane-2-one Méthacrylate de méthyle Phénol	1,1,1-trichloroéthane Trichloroéthylène 1,1,2-trichlorotrifluoroéthane Styrène Benzène Butanone Propylbenzène n-hexane xylène o-xylène m-xylène p-xylène Ethyltoluène White-spirit – aromatiques >5% White spirit 5-méthylhexane-2-one Hydrocarbures saturés Acrylamide 1-chloro-2,3-époxypropane 2-diméthylaminoéthanol	Acétate de 2-méthoxy-1-méthyléthyle Hydrocarbures C6 à C12 Éthylbenzène Triméthylbenzène Hydrocarbures aliphatiques et alicycliques Hydrocarbures benzéniques et aromatiques Toluène Formaldéhyde 4-éthyltoluène 1,2,3-triméthylbenzène 1,2,4-triméthylbenzène Mésitylène	Benzo[a]pyrène Pyrène Benzo[a]anthracène Dibenzo[a,h]anthracène Benzo(e)acéphénanthrylène Benzo[k]fluoranthène Benzo[ghi]perylène Indeno[1,2,3-cd]pyrène	Plomb Chrome Fer Manganèse Zinc Cuivre Cadmium Aluminium Cobalt Nickel Antimoine	Fibres (L>5µm , D<3µm) Fibres (L>5µm, D>3µm) Fibres d'amiante (L>5µm, D<3µm) Fibre de chrysolite (L>5µm, D<3µm) Fibre de gypse (L>5µm, D<3µm) Fibres minérales (L>5µm D<3µm) Fibres céramiques réfractaires (L>5µm D<3µm) Fibres céramiques réfractaires (L>5µm D>3µm) Fibres de roches (L>5µm, D<3µm) Fibres de verre (L>5µm, D<3µm)
			Acide	Isocyanates	Poussières
			Acide acétique Chlorure d'hydrogène	4,4'-diisocyanate de diphenylméthane Diisocyanate d'hexaméthylène	Poussières inhalables Poussières alvéolaires Poussières thoraciques Poussières totales Poussières de bois
			Alcalino-terreux	Divers	
			Hydroxyde de sodium	Cristobalite Tridymite Fraction soluble CH ₂ Cl ₂	

Résultats de mesures pour les agents chimiques ciblés

Les résultats présentés dans ce paragraphe concernent des mesures réalisées entre 61 et 480 minutes, pour des prélèvements individuels et ambiants. Les critères pris en compte sont :

- l'objectif du prélèvement (comparaison avec la VLEP-8h, point fixe sans comparaison, tâche comprise entre 15 min et 8 heures) ;
- l'unité dans laquelle est exprimé le résultat (mg/m^3 , ng/m^3).

Les méthodes de dosage des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent s'appliquer aux formes particulaires (réalisées sur cassette+filtre) ainsi qu'aux formes particulaires et volatiles ou gazeuses (réalisées sur un ensemble constitué successivement d'une cassette+filtre et principalement d'un tube rempli d'une résine).

Dans le cadre de cette extraction, l'utilisation de support permettant de réaliser des mesures en HAP gazeux est prépondérante à partir de 2001. Les résultats sont ainsi présentés sur deux périodes : entre 1986 et 2000 et de 2001 à 2011.

Pour les concentrations en benzo[a]pyrène et le pyrène, une distinction est réalisée sur les prélèvements réalisés :

- uniquement sur la cassette+filtre ;
- uniquement sur la résine ;
- sur l'ensemble en série (cassette+filtre et résine).

Les tableaux suivants recensent les résultats obtenus après traitements statistiques des données de la base. Les résultats statistiques pour un nombre inférieur à 10 mesures sont donnés à titre d'information.

Dans le cadre de l'interprétation des résultats, pour un nombre de mesures supérieur à 10, un astérisque est associé au nombre de mesures si les résultats des concentrations des polluants ne suivent pas une distribution de loi « normale ». Ainsi, la moyenne arithmétique n'est pas représentative de la tendance centrale et il est suggéré de prendre en compte pour ces données, le résultat de la moyenne géométrique et la médiane.

L'absence d'astérisque signifie que les résultats des concentrations des polluants suivent une distribution de loi « normale », ainsi la moyenne arithmétique est représentative de la tendance centrale. Il est suggéré de prendre en compte pour ces données, le résultat de cette moyenne et de la médiane.

Sur les deux périodes demandées, de 1986 à 2000 et de 2001 à 2011, le tableau 3 récapitule les exploitations réalisées.

Tableau 3 : Exploitation des données réalisée

Grande famille de tâches	Focus	Secteurs d'activité (NAF)	Tâches	Remarques
B34	Travaux en milieu confiné	42.11Z	B3400	Inexploitée
			B3410	Exploité
			B3420	Exploité
		43.99A	B3400	Inexploitée
			B3410	Inexploitée
		42.99Z	Il n'a y que B3420	Exploité
B32	/	43.99A	Inexploitée	Inexploitée

Travaux publics (tâche B34)

Tableau 4 : Famille de tâche B34 « Travaux routiers – Travaux d'étanchéité des ouvrages d'art et bassins » De 1986 à 2000

Polluants	Benzo[a]pyrène sur K7	Pyrène	Poussières totales	Poussières inhalables	Poussières alvéolaires	Fraction soluble CH ₂ Cl ₂
Unité	ng/m ³	ng/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
Prélèvements individuels						
Nombre de mesures	108*	Voir tableau 5	19*	85*	29*	2
Moyenne arithmétique	13,06		1,58	2,31	1,55	/
Etendue	<0,01 – 740,00		0,06 – 10,10	0,01 – 63,80	0,05 – 9,93	/
Médiane	0,88		0,36	0,53	0,74	/
Moyenne géométrique	0,07		0,46	0,65	0,61	/
Percentile 5	<0,01		0,06	0,14	0,08	/
Percentile 75	3,75		1,57	1,33	1,65	/
Percentile 90	18,00		6,09	3,60	4,83	/
Percentile 95	40,00		10,10	4,10	6,40	/
Prélèvements d'ambiance						
Nombre de mesures	20*	/	22*	3	23	6
Moyenne arithmétique	29,08	/	0,87	0,71	1,29	0,08
Etendue	1,00 – 357,95	/	0,04 – 7,53	0,41 – 1,17	0,04 – 4,30	0,01 – 0,17
Médiane	7,00	/	0,16	/	0,52	/
Moyenne géométrique	6,79	/	0,26	/	0,65	/
Percentile 5	1,00	/	0,07	/	0,11	/
Percentile 75	18,70	/	0,49	/	2,56	/
Percentile 90	48,00	/	1,24	/	3,14	/
Percentile 95	203,98	/	5,69	/	4,10	/

Pour cette période, les concentrations en benzo[a]pyrène ont été obtenues à partir de prélèvements réalisés uniquement sur des cassettes. Aucun prélèvement sur des tubes remplis de résine n'a été effectué.

Le tableau suivant recense les concentrations de pyrène en fonction du support.

Tableau 5 : Famille de tâche B34 « Travaux routiers – Travaux d'étanchéité des ouvrages d'art et bassins » Concentration de pyrène De 1986 à 2000

Polluants	Pyrène				
	Type de support	K7 seule	Résine seule	K7 en série	Résine en série
Unité	ng/m ³				
Prélèvements individuels					
Nombre de mesures	/	/	7	7	7
Moyenne arithmétique	/	/	16,80	4,93	21,73
Etendue	/	/	4,00 – 40,00	0,50 – 9,00	8,00 – 49,00
Médiane	/	/	/	/	/
Moyenne géométrique	/	/	/	/	/
Percentile 5	/	/	/	/	/
Percentile 75	/	/	/	/	/
Percentile 90	/	/	/	/	/
Percentile 95	/	/	/	/	/

Pour la période 1986-2000, le pyrène n'a pas fait l'objet de mesure d'ambiance.

Sur la période 1986-2000 pour des mesures individuelles en benzo[a]pyrène, la base recense des concentrations « non détectées » dans les conditions opératoires de l'analyse. Les procédures de calcul de COLCHIC permettent d'affecter un résultat de concentrations dans ces circonstances. Dans la mesure où ces concentrations ont été recalculées pour environ 40 % des mesures de benzo[a]pyrène, le traitement statistique est réactualisé en supprimant ces « concentrations non détectées ».

Benzo[a]pyrène (ng/m ³)	
Nombre de mesures	69*
Moyenne arithmétique	20,44
Etendue	0,25 – 740,00
Médiane	2,40
Moyenne géométrique	3,32
Percentile 5	0,45
Percentile 75	10,00
Percentile 90	30,00
Percentile 95	50,00

Tableau 7 : Famille de tâche B34 « Travaux routiers – Travaux d'étanchéité des ouvrages d'art et bassins » De 2001 à 2011

Polluants	Poussières totales	Poussières inhalables	Poussières alvéolaires	Fraction soluble CH ₂ Cl ₂
Unité	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
Prélèvements individuels				
Nombre de mesures	70*	49*	13	97*
Moyenne arithmétique	0,95	0,83	0,27	0,33
Etendue	0,10 – 16,80	0,01 – 2,97	0,09 – 0,65	0,01 – 1,60
Médiane	0,46	0,69	0,20	0,21
Moyenne géométrique	0,50	0,47	0,22	0,22
Percentile 5	0,16	0,05	0,09	0,06
Percentile 75	0,77	1,20	0,38	0,36
Percentile 90	1,30	1,86	0,56	0,69
Percentile 95	3,01	2,00	0,65	1,23
Prélèvements d'ambiance				
Nombre de mesures	6	18	10	18*
Moyenne arithmétique	1,62	1,19	0,35	0,83
Etendue	0,14 – 3,88	0,17 – 2,22	0,10 – 0,70	0,06 – 3,92
Médiane	/	1,19	0,34	0,41
Moyenne géométrique	/	1,06	0,28	0,44
Percentile 5	/	0,17	0,10	0,06
Percentile 75	/	1,39	0,60	0,74
Percentile 90	/	1,73	0,65	3,68
Percentile 95	/	2,22	0,70	3,92

Le tableau suivant présente les concentrations en benzo[a]pyrène et en pyrène sur la période 2001-2011 en fonction du support de prélèvement.

Tableau 8 : Famille de tâche B34 « Travaux routiers – Travaux d'étanchéité des ouvrages d'art et bassins » De 2001 à 2011 - Benzo[a]pyrène et pyrène

Polluants	Benzo[a]pyrène					Pyrène				
	K7 seule	Résine seule	K7 en série	Résine en série	Totale K7 + résine série	K7 seule	Résine seule	K7 en série	Résine en série	Totale K7 + résine série
Unité	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³				
Prélèvements individuels										
Nombre de mesures	64	1	81*	81*	81*	20*	5	79*	79*	79*
Moyenne arithmétique	3,36	/	3,38	2,35	5,73	1,61	8,10	23,10	8,05	31,15
Etendue	0,15 – 8,30	/	0,15 – 75,40	0,35 – 6,50	0,55 – 77,40	0,64 – 6,50	4,50 – 9,50	2,00 – 608,00	0,50 – 117,00	3,00 – 725,00
Médiane	3,20	/	1,50	2,00	4,00	1,39	/	3,50	4,50	8,00
Moyenne géométrique	2,10	/	1,83	2,03	4,03	1,37	/	5,90	5,14	12,76
Percentile 5	0,15	/	0,50	0,40	0,85	0,66	/	3,00	1,00	5,00
Percentile 75	6,15	/	2,00	2,50	4,50	1,73	/	7,00	7,40	17,00
Percentile 90	7,00	/	4,00	3,50	8,50	2,18	/	30,00	13,00	45,40
Percentile 95	7,00	/	9,00	5,00	12,50	4,38	/	181,00	16,00	184,00
Prélèvements d'ambiance										
Nombre de mesures	10	3	10*	10	10	6	7	8	8	8
Moyenne arithmétique	8,04	2,71	0,78	2,43	3,21	26,60	13,59	6,41	6,57	12,98
Etendue	0,20 – 25,64	2,50 – 2,88	0,10 – 3,00	0,10 – 8,00	0,45 – 11,00	0,72 – 70,52	6,00 – 23,31	0,29 – 29,00	0,25 – 33,80	3,00 – 34,09
Médiane	2,75	/	0,40	0,57	0,79	/	/	/	/	/
Moyenne géométrique	3,08	/	0,41	1,02	1,56	/	/	/	/	/
Percentile 5	0,20	/	0,10	0,10	0,45	/	/	/	/	/
Percentile 75	17,00	/	1,00	4,50	5,50	/	/	/	/	/
Percentile 90	25,17	/	2,25	6,50	8,75	/	/	/	/	/
Percentile 95	25,64	/	3,00	8,00	11,00	/	/	/	/	/

Bâtiment et travaux publics (tâche B32)

Tableau 9 : Famille de tâche B32: Bâtiment et travaux publics De 1986 à 2000

Polluants	Benzo[a]pyrène K7 seule	Pyrène	Poussières totales	Poussières inhalables	Poussières alvéolaires	Fraction soluble CH ₂ Cl ₂
Unité	ng/m ³	ng/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
Prélèvements individuels						
Nombre de mesures	18*	/	20	50*	17	/
Moyenne arithmétique	25,67	/	3,13	13,46	3,48	/
Etendue	1,00 – 360,00	/	1,14 – 4,92	<0,01 – 96,70	0,07 – 9,66	/
Médiane	2,00	/	3,26	1,10	3,20	/
Moyenne géométrique	2,90	/	2,91	1,53	1,52	/
Percentile 5	1,00	/	1,30	0,07	0,07	/
Percentile 75	2,00	/	3,91	14,40	5,10	/
Percentile 90	70,00	/	4,62	58,60	9,00	/
Percentile 95	360,00	/	4,88	86,00	9,66	/
Prélèvements d'ambiance						
Nombre de mesures	/	/	19	17*	5	/
Moyenne arithmétique	/	/	1,75	19,99	0,34	/
Etendue	/	/	0,19 – 5,54	0,05 – 100,80	0,08 – 0,97	/
Médiane	/	/	1,22	2,40	/	/
Moyenne géométrique	/	/	1,14	2,50	/	/
Percentile 5	/	/	0,19	0,05	/	/
Percentile 75	/	/	2,88	29,00	/	/
Percentile 90	/	/	5,10	85,60	/	/
Percentile 95	/	/	5,54	100,80	/	/

Pour la période 1986-2000, les concentrations en benzo[a]pyrène ont été obtenues à partir de prélèvements réalisés uniquement sur des cassettes. Aucun prélèvement sur des tubes remplis de résine n'a été effectué.

Tableau 10 : Famille de tâche B32: Bâtiment et travaux publics De 2001 à 2011

Polluants	Poussières totales	Poussières inhalables	Poussières alvéolaires	Fraction soluble CH ₂ Cl ₂
Unité	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³	mg/m ³
Prélèvements individuels				
Nombre de mesures	/	87*	9	13
Moyenne arithmétique	/	6,58	2,22	0,22
Etendue	/	0,10 – 54,79	0,14 – 12,10	<0,01 – 0,86
Médiane	/	3,90	/	0,16
Moyenne géométrique	/	3,30	/	0,02
Percentile 5	/	0,26	/	<0,01
Percentile 75	/	8,81	/	0,28
Percentile 90	/	15,20	/	0,52
Percentile 95	/	25,57	/	0,86
Prélèvements d'ambiance				
Nombre de mesures	2	60*	5	/
Moyenne arithmétique	/	2,96	2,03	/
Etendue	/	0,07 – 19,10	0,23 – 4,78	/
Médiane	/	1,33	/	/
Moyenne géométrique	/	1,25	/	/
Percentile 5	/	0,16	/	/
Percentile 75	/	3,38	/	/
Percentile 90	/	7,71	/	/
Percentile 95	/	13,80	/	/

Le tableau suivant présente les concentrations en benzo[a]pyrène et en pyrène en fonction du support de prélèvement.

Tableau 11 : Famille de tâche B32: Bâtiment et travaux publics De 2001 à 2011 - Benzo[a]pyrène et pyrène

Polluants	Benzo[a]pyrène					Pyrène				
	K7 seule	Résine seule	K7 en série	Résine en série	Totale K7 + résine série	K7 seule	Résine seule	K7 en série	Résine en série	Totale K7 + résine série
Unité	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³				
Prélèvements individuels										
Nombre de mesures	12*	/	8	8	8	/	/	8	8	8
Moyenne arithmétique	8,22	/	4,18	0,60	4,78	/	/	16,79	7,44	24,23
Etendue	0,05 – 30 90	/	0,15 – 10,00	0,45 – 1,00	0,60 – 10,5	/	/	0,30 – 47,00	1,00 – 25,00	1,30 – 64,00
Médiane	6,06	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Moyenne géométrique	4,19	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Percentile 5	0,05	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Percentile 75	8,30	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Percentile 90	16,10	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Percentile 95	30,90	/	/	/	/	/	/	/	/	/

Pour la période 2001-2011, la concentration en benzo[a]pyrène a fait l'objet d'une seule mesure d'ambiance.

Annexe 11 : USIRF – Synthèse des données CIMAROUT

- Sur la base des données renseignées sur CIMAROUT à la date du 9 avril 2013,
- Réalisée en prenant la méthode n°2 : « Si une valeur est inférieure à la limite de détection (<LD), on retient une valeur égale à la moitié de la limite de détection ».
- Pour établir cette synthèse, aucun des critères suivants n'a été sélectionné : Laboratoire, Type d'activité, Produits, Température, Configuration, Poste de travail, Statut fumeur,
- La sélection n'a été effectuée que sur 2 filtres :
 - « Initiative de l'étude » (SST* ou entreprises)
 - et « Date de l'étude » pour un certain nombre d'agents chimiques.
- (*) : SST > Services Santé au Travail (CARSAT, Médecine du Travail, CHU)

1 - Protocoles INRS - CARSAT - Médecine du Travail - USIRF

Benzo(a)Pyrène		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
VO : 150 ng/m3						mini	maxi	50	75	90	95
depuis 2000	SST*	172	75%	100%	2,35	0,04	9	2	3,5	5,8	6,38
	Entreprises	126	90%	100%	6,62	1,5	24	5,5	6,5	10,4	12
	Total	298	81%	100%	4,15	0,04	24	3,5	6	7	9,05
depuis 2006	SST*	79	54%	100%	1,61	0,04	9	0,545	1,9	5,88	6,26
	Entreprises	23	100%	100%	5,35	1,5	8,5	6	6,63	8,35	8,5
	Total	102	65%	100%	2,45	0,04	9	1,04	5,25	6,5	7,9
depuis 2012	SST*	41	22%	100%	0,658	0,04	5,53	0,335	0,69	1,15	2,36
	Entreprises	0									
	Total	41	22%	100%	0,658	0,04	5,53	0,355	0,69	1,15	2,36

Pyrène		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
ng/m3						mini	maxi	50	75	90	95
depuis 2000	SST*	141	50%	-	38	0,04	725	4,5	12	153	228
	Entreprise	37	54%	-	29,2	5,5	89	13,5	48,8	68	83,3
	Total	178	51%	-	36,2	0,04	725	6	15,5	91,2	217
depuis 2006	SST*	56	41%	-	16,1	0,04	208	0,55	5	28	159
	Entreprise	17	41%	-	32,9	5,5	89	14,5	55	73,1	85,6
	Total	73	41%	-	20	0,04	208	1,74	8,5	64,1	112
depuis 2012	SST*	41	54%	-	0,788	0,04	7,86	0,123	0,913	1,77	2,42
	Entreprise	0									
	Total	41	54%	-	0,788	0,04	7,86	0,123	0,913	1,77	2,42

Fumées		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
VO : 5 mg/m3						mini	maxi	50	75	90	95
depuis 2000	SST*	2	0%	100%	0,1	0,1	0,1	-	0,1	0,1	0,1
	Entreprise	129	28%	100%	0,25	0,02	1,9	0,185	0,32	0,481	0,546
	Total	131	27%	100%	0,248	0,02	1,9	0,18	0,32	0,479	0,545

Fraction soluble dans le dichlorométhane VO : 0,5 mg/m ³		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
						mini	maxi	50	75	90	95
Depuis 2000	SST*	106	20%	81%	0,315	0,01	2	0,2	0,4	0,7	1,14
	Entreprises	129	78%	100%	0,116	0,02	0,48	0,08	0,104	0,276	0,35
	Total	235	51%	91%	0,206	0,01	2	0,1	0,2	0,49	0,7
Depuis 2005	SST*	26	65%	88%	0,192	0,01	1,2	0,1	0,175	0,536	0,667
	Entreprises	129	78%	100%	0,116	0,02	0,48	0,08	0,104	0,276	0,35
	Total	155	75%	98%	0,129	0,01	1,2	0,08	0,122	0,295	0,367
Depuis 2012	SST*	0									
	Entreprises	0									
	Total	0									

Poussières inhalables ou poussières totales VO : 10 mg/m ³		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
						mini	maxi	50	75	90	95
depuis 2000	SST*	20	10%	100%	0,489	0,05	2	0,22	0,6	1,4	1,4
	Entreprise	47	26%	100%	0,743	0,03	3,32	0,575	0,973	1,67	1,87
	Total	67	21%	100%	0,667	0,03	3,32	0,45	0,862	1,61	1,87

2 - HAP Particulaires

Etudes Services Santé au Travail											
HAP Particulaires ng/m ³	nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile				
					mini	maxi	50	75	90	95	
Anthracène	4	0%	-	1,35	1,28	1,39	1,36	1,37	1,38	1,39	
Fluoranthène	47	38%	-	2,78	0,08	50,5	0,35	1,44	2,7	3,26	
Pyrène	50	44%	-	2,26	0,04	33,6	0,28	1,37	5	6,96	
Benzo(a)anthracène	47	53%	-	0,43	0,08	1,66	0,248	0,518	1,03	1,37	
Chrysène	47	17%	-	1,21	0,09	5,1	0,805	1,38	2,73	4,16	
Benzo(b)fluoranthène	54	63%	-	1,38	0,08	7,5	0,235	1,56	5	5,75	
Benzo(j)fluoranthène	41	88%	-	0,237	0,075	1,59	0,143	0,23	0,415	0,681	
Benzo(k)fluoranthène	54	61%	-	0,45	0,04	1,5	0,125	0,595	1,5	1,5	
Benzo(a)pyrène	50	24%	-	0,725	0,04	5,53	0,46	0,995	1,37	2,32	
Benzo(e)pyrène	41	73%	-	0,67	0,075	7,13	0,16	0,39	1,67	3,13	
Dibenzo(ah)anthracène	41	98%	-	0,158	0,075	0,5	0,13	0,204	0,244	0,331	
Benzo(ghi)pérylène	54	74%	-	1,58	0,075	15,6	0,21	1,43	5	7,5	
Indéno(123cd)pyrène	41	83%	-	0,303	0,08	4,49	0,148	0,23	0,416	0,678	
Σ HAP particuliers	43	0%	-	11,5	0,66	86,4	4,14	13,7	18,4	42	
Σ HAP KC	36	0%		3,78	0,3	16,3	2,24	4,32	8,18	11,7	

3 - HAP Gazeux

Naphtalène		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
VO : 0,5 mg/m3						mini	maxi	50	75	90	95
Depuis 2000	SST*	42	0%	100%	1080	465	2350	874	1400	1990	2180
	Entreprise	44	2%	100%	497	15	5030	215	380	1150	1920
	Total	86	1%	100%	784	15	5030	561	1040	1780	2150

Nota : les 44 mesures « entreprises » ont été réalisées sur des activités fabrication ou application d'asphalte.

Etudes Services Santé au Travail											
HAP Gazeux		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
ng/m3	VO ng/m3					mini	maxi	50	75	90	95
Naphtalène	50 000 000	86	1%	100%	784	15	5030	561	1040	1780	2150
Acénaphène		42	0%	-	176	49,3	1520	125	184	250	331
Fluorène		42	0%	-	94,1	34,8	385	76,5	109	151	178
Phénanthrène		42	0%	-	165	62,4	308	158	217	266	283
Anthracène		46	0%	-	7,8	0,7	21,8	6,3	11,7	14,3	15,9
Fluoranthène		46	0%	-	5,4	1	20,5	3,6	5,22	14,9	19,1
Pyrène		46	0%	-	5,05	0,8	12,1	3,9	6,5	10,6	11,7
Benzo(a)anthracène		4	0%	-	3,11	2,29	5,03	2,5	2,62	4,07	4,55
Chrysène		4	0%	-	4,55	2,29	10,8	2,5	2,62	7,51	9,14
Benzo(b)fluoranthène		4	0%	-	4,6	3,59	5,24	4,58	4,99	5,14	5,19
Benzo(k)fluoranthène		4	0%	-	5,8	2,29	15,8	2,5	2,62	10,5	13,2
Benzo(a)pyrène		4	0%	-	4,01	2,29	8,62	2,5	2,62	6,22	7,42
Benzo(ghi)pérylène		4	0%	-	8,21	4,58	15,4	4,99	7,9	12,4	13,9
Σ HAP Gazeux		45	0%	-	1760	660	6200	1390	2060	2760	3010

4 – Hydrocarbures aromatiques – Solvants pétroliers

Benzène		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
VO : 3250 µg/m3						mini	maxi	50	75	90	95
Depuis 2000	SST*	13	92%	100%	12,3	0,005	40	10	15	15	23,7
	Entreprise	107	90%	100%	6,92	0	84,5	6	7	8	13,6
	Total	120	90%	100%	7,5	0	84,5	6	7	13	15

Etudes Services Santé au Travail											
Hydrocarb. Aromatiq. Solvants pétroliers		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
						mini	maxi	50	75	90	95
mg/m3	VO										
Cyclopentane		4	75%	100%	0,141	0,015	0,52	0,015	0,015	0,318	0,419
n-hexane	72	4	75%	100%	0,038	0,01	0,12	0,01	0,01	0,076	0,098
Toluène	192	8	75%	100%	0,182	0,01	0,78	0,01	0,015	0,644	0,712
Styrène	215	4	75%	100%	0,036	0,01	0,11	0,01	0,015	0,072	0,091
Xylènes	221	8	88%	100%	3,04	0,15	14	2	2	4,4	9,2
Ethylbenzène	88,4	8	88%	100%	2,89	0,05	13	2	2	4,2	8,6

5 - Hydrocarbures CnHm – Coupes pétrolières

Etudes « Entreprise » sur activité application d'asphalte											
Coupes pétrolières		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
						mini	maxi	50	75	90	95
mg/m3											
C5-C7		24	71%	-	0,012	0,002	0,097	0,002	0,005	0,021	0,069
C7-C8		24	92%	-	0,003	0,002	0,021	0,002	0,002	0,003	0,015
C8-C9		24	92%	-	0,004	0,002	0,021	0,002	0,002	0,012	0,018
C9-C10		24	92%	-	0,003	0,002	0,020	0,002	0,002	0,003	0,015
C10-C11		24	71%	-	0,005	0,002	0,032	0,002	0,004	0,012	0,023
C11-C12		24	54%	-	0,005	0,002	0,026	0,003	0,005	0,008	0,021
C12-C14		24	46%	-	0,008	0,002	0,061	0,004	0,005	0,007	0,043
C6-C12 vapeurs	1000	3	67%	100%	4,85	0,05	10	2,28	5,88	8,35	9,17

6 - Particules émises par les moteurs diesel

Etudes Services Santé au Travail											
Particules émises par les moteurs diesel		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
						mini	maxi	50	75	90	95
VO	µg/m3										
Carb. Organ.		4	0%	-	89,8	45	135	85	94	119	127
Carb. Élément.	100	15	0%	93%	38,9	17	105	25,5	36,5	85	91,5
Carbone Total	150	4	0%	50%	153	62	240	129	181	216	228

Nota : prélèvements réalisés en espace semi-fermé (tunnel ou parking souterrain)

7 - Autres agents chimiques

Etudes Services Santé au Travail											
Autres agents chimiq.		nbre valeur	% val. < LD	% val. < VO	moy. arith.	Etendue		Percentile			
VO	mg/m3					mini	maxi	50	75	90	95
Formaldéhyde	0,6	6	33%	100%	0,013	0,003	0,03	0,01	0,016	0,024	0,027
Acétaldéhyde	180	5	20%	100%	0,041	0,003	0,11	0,02	0,045	0,08	0,095
Monoxyde carb.	55	1	0%	100%	9	9	9	-	-	-	-

Annexe 12 : Réparations – Tableau de maladies professionnelles

En France, pas de tableau bitume

Actuellement, il n'y a pas en France de tableau de maladies professionnelles (TMP) spécifique concernant des affections provoquées par le bitume, comme il en existe dans les cas du goudron de houille et de ses dérivés ou dans le cas de certains dérivés du pétrole.

Cependant, la reconnaissance comme professionnelles de pathologies observées chez des travailleurs exposés au bitume et/ou ses fumées n'est pas exclue pour autant puisque ... *"peut être également reconnue d'origine professionnelle une maladie caractérisée non désignée dans un tableau de maladies professionnelle lorsqu'il est établi qu'elle est essentiellement et directement causée par le travail habituel de la victime..."* (reconnaissance "hors tableau", voir article L.461.1 du code de la sécurité sociale).

Dans le cas des travaux routiers, sans attendre un éventuel alignement sur nos pays voisins ayant déjà listé les cancers cutanés comme maladies professionnelles liées au bitume (Eurogip. 2010), il existe d'autres possibilités de reconnaissance, en référence aux tableaux TMP 16 bis et TMP 36, notamment pour les affections cancéreuses impliquant certains produits ajoutés au bitume.

Tableau 16 bis

Rebaptisé (décret du 15 janvier 2009), le TMP 16 bis s'intitule désormais : ***Affections cancéreuses provoquées par les goudrons de houille, les huiles de houille, les brais de houille et les suies de combustion du charbon.***

Dans sa version précédente, il n'y avait aucune allusion à la pose de revêtements routiers dans la liste limitative des travaux pris en compte, malgré l'utilisation courante, dans le passé, de dérivés du goudron dans la formulation des liants bitumineux. Lors de la dernière révision, le cas des produits routiers à base de dérivés houillers et les postes de travail correspondants ont été discutés. Au final, seuls les ***"Travaux au poste de vannier avant 1985 comportant l'exposition habituelle à des bitumes goudrons lors de l'application de revêtements routiers"*** ont été retenus pour les tumeurs primitives de l'épithélium urinaire (!), mais non pour l'épithélioma de la peau ni pour le cancer broncho-pulmonaire.

Un complément a cependant été proposé sous forme d'annexe destinée aux CRRMP ; elle concerne la pose de revêtements bitumineux à base de brai de houille (sans restriction quant au poste de travail). Deux types de produits sont cités : les bitumes-goudrons pour enduits superficiels routiers et les anti-kérosènes pour zones aéroportuaires (les premiers ont progressivement disparu au cours des années 80 ; par contre, les seconds étaient encore utilisés jusqu'au début des années 2000).

Tableau 36 bis

Lui aussi rebaptisé et révisé, il concerne les épithéliomas primitifs de la peau : ***Affections cancéreuses provoquées par les dérivés suivants du pétrole : huiles minérales peu ou non raffinées et huiles minérales régénérées utilisées dans les opérations d'usinage et de traitement des métaux, extraits aromatiques, résidus de craquage, huiles moteur usagées ainsi que suies de combustion des produits pétroliers.***

Deux types de travaux dans la liste limitative pourraient être évoqués dans un dossier de demande de reconnaissance : ceux exposant aux extraits aromatiques pétroliers utilisés comme fluxants des bitumes et ceux exposant aux résidus de craquage utilisés comme liants ou fluidifiants...

Annexe 13 : Résultats de l'extraction du RNV3P

Dans le contexte de l'évaluation des risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs, les recherches sont réalisées à partir des codes « nuisances » suivants :

- 33360 : Houille (produits de décomposition thermique)
- 33460 : houille (produits dégagés lors de...)
- 333CO : produits noirs (goudron bitume, produits de la décomposition thermique)
- 334CO : produits noirs (goudron bitume, créosote, asphalte, produits dégagés lors de ...)
- 36F00 : produits noirs (asphalte, goudrons, créosote)
- 36FY0 : déchets de produits noirs
- C1A01 : préparation de goudron

La suite des résultats présentés ci-dessous ne concernent que les pathologies professionnelles en lien avec les codes retenus en nuisance (voir Tableau 1 ci-dessous). La base de données compte 192 PST classés sous cette terminologie associés aux codes nuisances cités.

104 PST pour lesquels « les nuisances notifiées » et « l'imputabilité de ces nuisances dans l'apparition de la pathologie considérée comme professionnelle avec un niveau d'imputabilité au minimum faible ou aggravée par le travail » ont été retrouvés dans la base nationale du RNV3P. Pour information, ils se répartissent de la manière suivante : 36 PST avec une imputabilité égale à 1¹⁸ ; 30 PST avec une imputabilité égale à 2 et 38 PST avec une imputabilité égale à 3. Les PST concernent 1 femme âgée de 34 ans et 103 hommes âgés en moyenne de 57 ans.

Les pathologies ainsi rapportées au sein du RNV3P sont très diverses. La liste des groupes de pathologies considérées comme liées au travail en relation avec les produits bitumineux en nuisance principale figure dans le tableau 1 ci-dessous. Le groupe de pathologies les plus fréquemment rapportées concerne les tumeurs (72 %).

Tableau 1 : Pathologies associées aux codes nuisances incriminés

Groupe de pathologie	N	%
Tumeurs (hors tumeurs bénignes)	75	72,12%
Maladies de l'appareil respiratoire + hyperréactivité bronchique	16	15,38%
Maladies de la peau et du tissu cellulaire sous-cutané	7	6,73%
Autres	4	3,85%
Codes spécifiques RNV3P : SIOC ¹⁹	2	1,92%
Total général	104	100,00%

¹⁸ Le niveau de relation entre l'exposition et la maladie est estimé par les médecins grâce à un degré d'imputabilité : nulle (0), possible (1), probable (2), certaine (3).

¹⁹ SIOC : Syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques.

Le Tableau 2 ci-dessous présente le détail des pathologies associées aux codes nuisances incriminés.

Tableau 2 : Pathologies associées aux codes nuisances incriminés par niveau d'imputabilité

Imputabilité	Faible N	Possible N	Certaine N	Total N	Pourcentage %
Tumeurs (hors tumeurs bénignes)	23	21	31	75	72,1
C00- C14 - Tumeurs malignes de la lèvre, de la cavité buccale et du pharynx	1		1	2	1,9
C30 – C39 – Tumeurs malignes des organes respiratoires et intrathoraciques	7	16	11	34	32,7
C43– C44– Mélanome malin et autres tumeurs malignes de la peau	1	3	7	11	10,6
C60 – C63 - Tumeurs malignes des organes génitaux de l'homme			1	1	1,0
C64 – C68 – Tumeurs malignes des voies urinaires	12	2	10	24	23,1
C81- C96 – Tumeurs malignes primitives ou présumées primitives des tissus lymphoïde, hématopoïétique et apparentés	2			2	1,9
D02 – Carcinome in situ de l'oreille moyenne et de l'appareil respiratoire			1	1	1,0
Maladies de l'appareil respiratoire + hyperréactivité bronchique	9	5	2	16	15,4
J31 - Rhinite, rhinopharyngite et pharyngite chroniques	1	1		2	1,9
J40-J47 – Maladies chroniques des voies respiratoires inférieures	6	4	1	11	10,6
J60 – J70 - Autres maladies du poumon dues à des agents externes	1		1	2	1,9
R060 - Dyspnée	1			1	1,0
Maladies de la peau et du tissu cellulaire sous-cutané	1	2	4	7	6,8
L23 – L30- Dermatoses et eczémas		1	4	5	4,80
L40 – L45 - Lésions papulo-squameuses	1			1	1,0
L80 – L99 – Autres affections e la peau et du tissu cellulaire sous-cutané		1		1	1,0
Autres	3	2	1	6	5,7
H109 - Conjonctivite sans précision	1			1	1,0
R51 - Céphalée		1		1	1,0
R942 - Résultats anormaux d'explorations fonctionnelles pulmonaires		1		1	1,0
U07 - Syndrome aigu neuro-digestif	1			1	1,0
U03 - Syndrome d'intolérance aux odeurs chimiques	1		1	2	1,9
Total général	36	30	38	104	100,00

Le Tableau 3 fait état des secteurs d'activité mis en cause dans les PST qu'ils soient actuels dans le parcours professionnel du patient ou bien antérieurs. Le secteur de la construction (45) et les industries manufacturières (15-37) rassemblent à eux seuls 72 % des PST notifiés.

Tableau 3 : Secteur d'activité en lien avec les PST

Groupe d'activité responsable	N	%
Construction (45)	51	49,04%
Industries manufacturières (15-37)	21	20,19%
Transport et communication (60-64)	7	6,73%
(vide)	7	6,73%
Administrations publiques (75)	7	6,73%
Commerces, réparation automobile et d'articles domestiques (50-52)	4	3,85%
Agriculture, pêche, sylviculture (01,02)	2	1,92%
Industries extractives (10-14)	1	0,96%
Production et distribution de gaz, d'eau et d'électricité (40, 41)	1	0,96%
Autres services collectifs, et sociaux personnels (90-93)	1	0,96%
Pêche, aquaculture (05)	1	0,96%
Immobilier, location et services aux entreprises (70-74)	1	0,96%
Total général	104	100,00%

Le Tableau 4 propose une liste des professions associées au code nuisance recherché. Les professions responsables des expositions aux produits bitumineux dans les PST déclarés correspondent aux métiers de la construction de chaussées et sols sportifs (452P) pour 17 % et aux travaux d'étanchéification pour 9 %.

Tableau 4 : Poste en lien avec les PST

Poste responsables	N	%
452P - Construction de chaussées et sols sportifs	18	17,31%
452K - Travaux d'étanchéification	10	9,62%
(vide)	7	6,73%
751A - Administration publique générale	4	3,85%
452B - Construction de bâtiments divers	4	3,85%
601Z - Transports ferroviaires	3	2,88%
452J - Réalisation de couvertures par éléments	3	2,88%
452V - Travaux de maçonnerie générale	2	1,92%
231Z - Cokéfaction	2	1,92%
453C - Travaux d'isolation	2	1,92%
27 - Métallurgie	2	1,92%
452U - Autres travaux spécialisés de construction	2	1,92%
271Z - Sidérurgie (CECA)	2	1,92%
453A - Travaux d'installation électrique	2	1,92%
351C - Réparation navale	2	1,92%
502Z - Entretien et réparation de véhicules automobiles	2	1,92%
45 - Construction	2	1,92%
451A - Terrassements divers, démolition	2	1,92%
75 - Administration publique	2	1,92%
453E - Installation d'eau et de gaz	1	0,96%
602P - Location de camions avec conducteur	1	0,96%
524Y - Commerce de détail de charbons et de combustibles	1	0,96%
372Z - Récupération de matières non métalliques recyclables	1	0,96%
285A - Traitement et revêtement des métaux	1	0,96%
410Z - Captage, traitement et distribution d'eau	1	0,96%
321B - Fabrication de composants électroniques passifs	1	0,96%

275A - Fonderie de fonte	1	0,96%
341Z - Construction de véhicules automobiles	1	0,96%
275E - Fonderie de métaux légers	1	0,96%
274C - Production d'aluminium	1	0,96%
01 - Agriculture, Chasse, Services annexes	1	0,96%
285D - Mécanique générale	1	0,96%
745B - Travail temporaire	1	0,96%
454F - Revêtement des sols et des murs	1	0,96%
14 - Autres industries extractives	1	0,96%
515J - Commerce de gros de fournitures pour plomberie et chauffage	1	0,96%
90 - Assainissement, Voirie et Gestion des déchets	1	0,96%
60 - Transport Terrestres	1	0,96%
050A - Pêche	1	0,96%
602M - Transports routiers de marchandises interurbains	1	0,96%
452R - Travaux maritimes et fluviaux	1	0,96%
612Z - Transports fluviaux	1	0,96%
275G - Fonderie d'autres métaux non ferreux	1	0,96%
281A - Fabrication de constructions métalliques	1	0,96%
452C - Construction d'ouvrages d'art	1	0,96%
752C - Défense	1	0,96%
203Z - Fabrication de charpentes et de menuiseries	1	0,96%
247Z - Fabrication de fibres artificielles ou synthétiques	1	0,96%
23 - Cokéfaction, Raffinage, Industries Nucléaires	1	0,96%
011D - Horticulture , pépinières	1	0,96%
Total général	104	100,00%

Annexe 14 : Les cancers cutanés

1) Carcinomes basocellulaires (BCC). L'origine de ces cancers se trouve dans les cellules de la couche basale de l'épiderme et de ses annexes. La composante cellulaire reproduit les différents types cellulaires présents soit dans la couche basale de l'épiderme soit dans les annexes cutanées (poils, glandes sudoripares, glandes sébacées). Ces cancers métastasent exceptionnellement. Cette tumeur est localement invasive, destructrice et peut être ulcérée. Il s'agit de la tumeur la plus commune chez les sujets à peau claire, son incidence est en augmentation et représente un problème de santé majeur. Les BCC prédominent sur les zones exposées au soleil et le soleil en est le facteur étiologique majeur. Le risque de développer un BCC augmente directement avec les expositions solaires cumulées et diminuent avec le degré de pigmentation. Les BCC sont observés généralement à partir de 40 ans et sont plus fréquents chez l'homme que chez la femme. L'arsenic, largement utilisé comme insecticide dans l'agriculture et sous forme de liqueur de Fowler pour traiter le psoriasis et l'asthme est à l'origine de nombreux BCC ou carcinomes spinocellulaires essentiellement superficiels. Le traitement de ce type de tumeur est essentiellement chirurgical, au prix de cicatrices généralement modestes. Une forme de BCC est particulièrement invasive et nécessite une attention spéciale pour éviter la récurrence locale. *Les BCC ne métastasent qu'exceptionnellement et constituent un problème strictement local.*

2) Carcinomes spinocellulaires (SCC). Les épithéliomas spinocellulaires cutanés sont des proliférations malignes des kératinocytes de l'épiderme. Le SCC survient habituellement sur une lésion précurseur (kératose). En général, on connaît les SCC de forme verruqueuse et non verruqueuse. La forme verruqueuse se développe lentement et envahit les tissus sous-jacents avant de métastaser. Ce type de cancer a été très tôt (1775) reconnu par Percivall Pott qui l'a décrit chez les travailleurs attachés au nettoyage des cheminées qui, enfants, pouvaient se glisser dans les cheminées. Ce type de cancer possède un potentiel métastatique significatif ; la suie additionnée à l'irritation du scrotum par la corde de suspension a été identifiée comme responsable.

De nos jours, les expositions solaires sont la cause majeure des SCC. Comme les BCC, les SCC augmentent en fonction des quantités de rayonnements UV et en relation particulière avec des surexpositions aiguës entraînant une réaction érythémale intense accompagnée de phlyctène. Les SCC sont aujourd'hui encore présents au niveau du scrotum et de la vulve, chez les travailleurs exposés à la paraffine et au goudron, aux huiles de coupe, chez les travailleurs de l'industrie pétrochimique et les machinistes. Chez ces sujets, la carcinogenèse chimique peut être augmentée par la carcinogenèse induite par les rayonnements UV. Les SCC induits par les hydrocarbures sont fréquemment multiples et associés aux lésions irritatives induites par les produits chimiques. Ce type de cancer peut métastaser et si la lésion primitive n'est pas traitée, la métastase survient entre un et dix ans après l'apparition de la lésion (métastase ganglionnaire).

Alors que les métastases survenant sur un SCC d'origine solaire sont extrêmement rares, celles survenant à partir de carcinogènes chimiques sont plus fréquentes. Lorsque le SCC survient sur zone irradiée (rayons X, α , β , γ), la fréquence de métastases atteint 20 à 26 %.

3) Les kérato-acanthomes représentent une forme particulière de SCC. Ils en diffèrent par leur involution centrale et un très faible risque de métastases.

Lésions précurseurs : les kératoses actiniques. Ce sont les lésions précurseurs des SCC et des kérato-acanthomes. Ces lésions sont essentiellement induites par les expositions aux rayonnements UV. Elles sont extrêmement fréquentes chez les sujets caucasiens à partir de 50 ans, affectant pratiquement 100 % des individus âgés de 70 ans et plus, vivant en dessous de 40° de latitude Nord ou Sud.

4) Les mélanomes malins. Ils sont constitués par la multiplication de mélanocytes malins, envahissant et métastasants, conduisant en absence d'ablation chirurgicale précoce, à une issue fatale. Parmi les 8 000 à 9 000 cas diagnostiqués annuellement en France, 15 % ont une issue mortelle. Ils surviennent soit à partir de nævus préexistant (grain de beauté = prolifération mélanocytaire bénigne) soit sur peau saine. Ils sont localisés essentiellement sur les zones exposées du corps soit en permanence soit de manière intermittente. Initialement intra-épidermique, l'évolution plus ou moins rapide se fait par envahissement des tissus sous-jacents et le pronostic lors de l'ablation chirurgicale est fonction du risque d'invasion vasculaire et lymphatique. La constatation d'une métastase ganglionnaire assombrit le pronostic (50 % d'issues fatales).

Plus de 100.000 cas de cancers cutanés sont diagnostiqués chaque année en France, chiffre en augmentation constante d'environ 3% par an. Leur agressivité dépend essentiellement de leur forme histologique : si 90% d'entre eux sont des carcinomes développés à partir des kératinocytes, basocellulaires (75%) et spinocellulaires ou épidermoïdes (15%), facilement accessibles à un traitement simple et sans pronostic léthal, 10% sont des mélanomes développés à partir des mélanocytes (9.000 nouveaux cas par an en France) dont le pronostic est d'autant plus sévère que leur dépistage est tardif (25% de mortalité à 5 ans). L'InVS a projeté, pour 2011, l'incidence (standardisée monde) des mélanomes chez les sujets masculins à 9,7 pour 100.000 et le taux de mortalité à 1,1 pour 100.000. l'âge médian du diagnostic est de 60 ans chez l'homme et 70% des nouveaux cas sont diagnostiqués au-delà de l'âge de 49 ans.

En Europe, l'incidence du mélanome cutané est très hétérogène et varie proportionnellement avec la latitude. Pour indication, l'incidence chez l'homme est de 16,1 pour 100.000 en Suède et 2,5 pour 100.000 en Grèce, soulignant ainsi que ce type de cancer est principalement lié aux différences de phototypes cutanés et à la prédisposition génétique entre les populations européennes, le niveau d'exposition solaire n'étant que secondaire (Ferlay, Shin *et al.* 2010).

Annexe 15 : Agents identifiés comme initiateurs ou promoteurs de cancers cutanés chez l'animal

HAP
Benzo[a]pyrène* 7,12-diméthylbenz(a)anthracène 3-méthylcholanthrène Dibenz(a,h)anthracène* Goudron de tabac*
Agents alkylants
Béta-Propriolactone* 4-Nitroquinoline-N-oxyde Bis(chlorométhyl) éther* Moutarde azotée* Cisplatine*
Nitrosamines et nitrosamides
N,N'-diméthylnitrosurée* N-Méthyl-N'-Nitro-N-Nitrosoguanidine*
Amines aromatiques
2-acéthylaminofluorène
Esters aromatiques
Esthers de phorbol, huile de croton (diterpène) Anthraline* Phénol* 7-bromométhylbenz(a)anthracène
Agents physiques
Radiations ionisantes* Blessures*, abrasions* Radiations ultraviolettes*
Autres
Uréthane* Dinitropyrène* Acide rétinoïque* Peroxyde de benzoyl* 2,3,7,8-Tétradichlorodibenzo-p-dioxine* Diacylglycérols, dodecane

(* agents connus pour leur contact chez l'Homme)

Annexe 16 : Mécanismes de la cancérogénèse induite par les UV

La cancérogénèse cutanée chez l'homme est un sujet très étudié, en particulier en relation avec l'importance des expositions aux rayonnements UV. La possibilité d'induire des cancers sur la peau chez la souris est le plus vieux modèle expérimental pour l'étude de la cancérogénèse chimique. Le même modèle a été utilisé pour les rayonnements UV. Un certain nombre de produits chimiques ont été associés au développement de cancers cutanés chez l'homme (voir annexe 15). Les cellules en culture de plusieurs espèces sont transformées par l'exposition aux carcinogènes.

In vitro, de nombreuses études ont confirmé l'évolution en étapes multiples de ces cancers ainsi que leur induction. Les mécanismes de carcinogenèse sont univoques. Expérimentalement, le premier stade d'induction d'un cancer cutané est appelé *initiation*. Cette initiation est irréversible et implique un mécanisme de mutations. Le second stade est la *promotion*. Ce stade est réalisé par les expositions répétées à un agent non-carcinogène et ses effets sont réversibles. Il s'agit là d'un phénomène épigénétique. Les agents de promotion réduisent la période de latence des tumeurs qui se formeraient par applications répétées de carcinogènes. Chez l'homme, des modifications de l'épiderme réalisent des hyperkératoses, et la conversion maligne des tumeurs précancéreuses ne se produit que dans un nombre limité de cas. La conversion implique d'autres facteurs génétiques : c'est la *carcinogenèse complète*. Les métastases à distance résultent de l'acquisition de propriétés génétiques nouvelles par les cellules cancéreuses : pénétration intravasculaire, survie dans le milieu sanguin (résistance aux chocs), pénétration des tissus à distance et acclimatation au nouveau milieu (homing).

Les agents physiques sont, dans la pratique, essentiellement constitués par le rayonnement ultraviolet solaire ou artificiel et plus rarement, les rayonnements produits par la radioactivité et les rayons X. Ils induisent des cancers cutanés ou profonds.

Les cancers induits par les UV présentent une signature spécifique dans la séquence d'ADN codant pour le gène p53. Ce gène contrôle l'apoptose et les divisions cellulaires. Certains codons sont sensibles aux rayonnements UV et les cancers induits par les rayonnements UV présentent toujours une mutation de p53 dans ses codons sensibles : signature UV des cancers cutanés.

Les agents promoteurs induisent des irritations de la peau avec inflammation et hyperplasie. Ils favorisent le développement spécifique des cellules initiées selon différents mécanismes. Ils peuvent activer la protéine kinase C dans les kératinocytes. Le rayonnement UVA active également la protéine kinase C. Les agents promoteurs stimulent la multiplication clonale des cellules initiées dans l'épiderme humain.

Annexe 17 : Liens mentionnés dans les déclarations publiques d'intérêts des experts

Cette partie présente les liens déclarés par les experts dans le cadre de leur déclaration publique d'intérêt et précise d'une part comment ces liens ont été analysés par rapport au domaine sur lequel porte la saisine et d'autre part la manière dont ils ont été gérés, eu égard à un risque potentiel de conflit d'intérêts.

Les déclarations publiques d'intérêts sont mises à jour par les experts à chaque changement de situation. Au cours des expertises, les liens d'intérêts sont réexaminés au vu de l'ordre du jour au début de chaque réunion.

RAPPEL DES RUBRIQUES DE LA DECLARATION PUBLIQUE D'INTERETS

IF	Intérêts financiers dans le capital d'une entreprise
IP-A	Interventions ponctuelles : autres
IP-AC	Interventions ponctuelles : activités de conseil
IP-CC	Interventions ponctuelles : conférences, colloques, actions de formation
IP-RE	Interventions ponctuelles : rapports d'expertise
IP-SC	Interventions ponctuelles : travaux scientifiques, essais, etc.
LD	Liens durables ou permanents
PF	Participation financière dans le capital d'une entreprise
SR	Autres liens sans rémunération (relatifs à un parent)
SR-A	Autres liens sans rémunération)
VB	Activités donnant lieu à un versement au budget d'un organisme

POUR LE COMITE D'EXPERT SPECIALISE

NOM	Prénom <i>Rubrique de la DPI</i> Description de l'intérêt <i>en cas de lien déclaré</i>	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :		

<p>BELZUNCES</p>	<p>Luc</p> <p>LD</p> <p>Université d'Avignon : Enseignements (depuis 1998) (Vacations) Université d'Angers : Enseignements (depuis 2004) (Vacations) Université Aix-Marseille 3 : Enseignements (depuis 2000) (Vacations) Centre Agronomique de Chania, Crète : Enseignements (01/11/2005 au 10/11/2010) (Salaire)</p> <p>IP</p> <p>ADAPi (Association pour le Développement de l'Apiculture Provençale) : Conférences (2000-2006) (Rémunération personnelle) UNAF (Union nationale de l'apiculture française) : Conférences (2000-2006) (Rémunération personnelle) et consultance (2011) (Rémunération ponctuelle personnelle) ADARA : Conférences (2000-2006) (Rémunération personnelle) GIE Apiculture Pays de Loire : Formation toxicologie abeille (02/02/2011) (Rémunération personnelle) Agoodforgood : Consultance (08-09/09/2011) (Rémunération) Organisations apicoles : Conférences régulières (Permanent) (Rémunération personnelle)</p> <p>VB</p> <p>Bayer : Effets de l'imidaclopride chez l'abeille donnant lieu à versement à l'INRA (50 % du budget du laboratoire où l'expert est Directeur de recherche) (contrat clos en 2001) Aventis-BASF : Action des sécrétions de tournesol chez l'abeille donnant lieu à versement à l'INRA (50 % du budget du laboratoire) (2002) Aventis : Mode d'action de l'acétamipride donnant lieu à versement à l'INRA (50 % du budget du laboratoire) (2001-2003)</p> <p>SR</p> <p>BASF : enfant stagiaire (2007) Association Terre d'Abeilles : Bourse de thèse (Sujet</p>	<p>13 mars 2012</p>
-------------------------	--	---------------------

	de la thèse : Amélioration des procédures d'évaluation du risque pesticides pour les abeilles) (10/2011 à 10/2014)	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
BONVALLOT	Nathalie	25 janvier 2011
	LD EHESP : CDD (oct. 2008-oct. 2011)	Démission en mars 2011
	IP PBE + (performance Bretagne environnement), association d'entreprises bretonnes de tous secteurs : Journées PBE +, Toxicologie (avril 2008) (Aucune rémunération) EDF GDF : Formation EQRS (juin chaque année) (Aucune rémunération)	
	SR OBERTHUR : Conjoint responsable Hygiène, sécurité et environnement	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
BOURGEOIS	Damien	24 janvier 2011
	IF Rhodia : Plan d'épargne en entreprise, quelques actions	
	SR Maintenance Service Environnement : Conjoint ingénieur (depuis 01/12/2010)	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
CASSIER-CHAUVAT	Corinne	01 février 2011
	LD CNRS CEA : chercheur CNRS dans unité mixte CEA CNRS (depuis 1983)	
	SR CEA : Conjoint Chercheur Chef de laboratoire (depuis 1985)	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
CHEVALIER	Anne	19 octobre 2011
	Aucun lien déclaré	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	

EMPEREUR-BISSONNET	Pascal SR Institut de recherche international SERVIER : Épouse Directeur Support Opérationnel (1990-2011)	26 janvier 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
ENRIQUEZ	Brigitte IF et LD Fondatrice et gérante de Bio Eco Pharma depuis mars 2011 (Aucun salaire) IP Tribunal de Mende : Expertise sur fraude (utilisation de médicament vétérinaire interdit dans l'UE) (Octobre 2011) (Honoraire)	06 janvier 2012
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
GUENOT	Dominique IP 2 ^{ème} édition de la manifestation « A votre santé ! » Le Mois de la santé et de la recherche médicale en Alsace : Intervention/débat suite à projection de film (1 journée en mars 2010) (Aucune rémunération)	02 février 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
GUERBET	Michel IP AFSSAPS : expert au sein du groupe préclinique (2006-2012) et au sein de la commission d'AMM des médicaments (2010-2013) (Aucune rémunération)	02 février 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
HUYNH	Cong Khanh VB ERTEC (filiale suisse de Colas) : formation pour les analyses des HAP dans le bitume par GC-MS donnant lieu au versement à l'IRST (0,08% du budget) (2012)	28 mars 2012
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
KRISHNAN	Kannan IP Regulatory checkbook : Invited speaker and panelist, Naphthalene: State of the Science Symposium and Workshop (3 jours en 2006) (Vacation, frais de déplacement) VB	02 mars 2011

	ExxonMobil conjointement avec le conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada : Subvention de recherche pour « An integrated fugacity-pharmacokinetic model » donnant lieu à versement à l'Université de Montréal, Trent University et Université du Québec à Montréal (< 10 % du budget) (2007-2010)	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
LAFON	Dominique	9 juin 2011
	LD Archives des maladies professionnelles : droits d'auteur (depuis 1995) Dassault Falcon service : Médecin du travail en CDI (depuis 1995)	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
LAGADIC-GOSSMANN	Dominique	30 janvier 2011
Analyse Anses :	Aucun lien déclaré Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
LAUDET	Annie	17 mars 2011
Analyse Anses :	Aucun lien déclaré Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
MÉNÉTRIER	Florence	26 janvier 2011
Analyse Anses :	IP ANR : Appel à projets Santé-environnement/santé-travail (juin 2006-août 2006) (Aucune rémunération) Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
MICHIELS	Fabrice	27 juin 2011
Analyse Anses :	LD ASSTV 86 : Contrat du 01/05/2011 au 30/06/2012 (Salaire) Ministère de la Défense : militaire de carrière depuis 1987 (Salaire) IP Université de Bretagne occidentale : enseignement aux médecins du travail (depuis 2010) (Vacations) Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	

	<p>PRAT Odette</p> <p>Aucun lien déclaré</p>	30 janvier 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
	<p>SCHROEDER Henri</p> <p>IF</p> <p>Air France, Rexel, BNP : actions</p> <p>Fonds de placement LCL Protection : Produits financiers</p> <p>VB</p> <p>Industries agro-alimentaires : Contrat sur aliments fonctionnels donnant lieu à versement à l'université Henri Poincaré (50 % du laboratoire où l'expert est Enseignant-chercheur, responsable des études réalisées) (2001-2006)</p> <p>ANSES : Veille bibliographique (auteur des notes de veille) donnant lieu à versement à l'université Henri Poincaré (15 % du budget du laboratoire) (2009-2011)</p>	28 janvier 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
SECRETAN-LAUBY	<p>Béatrice</p> <p>LD</p> <p>CIRC : Salariée (depuis 2001)</p> <p>IP</p> <p>Encyclopedia of Cancer (Springer Verlag) : Article sur "UV radiation (déc. 2007 à fév. 2008) (Aucune rémunération)</p> <p>AFTIM (Association française des techniciens et ingénieurs de sécurité et des médecins du travail) : Journée AFTIM-ADHYS, Paris (2004) (Aucune rémunération)</p> <p>ADHYS (Association pour le développement de l'hygiène et de la sécurité dans les établissements de recherche ou d'enseignement supérieur) : 22ème journées de l'ADHYS (2005) (Aucune rémunération)</p> <p>BTP : 28èmes journées Nationales du BTP (2005) (Aucune rémunération)</p> <p>DRASS : Journée d'échange de pratiques professionnelles sur les CMR (2005) (Aucune rémunération)</p> <p>TSR (Télévision Suisse romande) : Emission "A bon entendeur" sur le benzène dans les boissons de table (2006) (Aucune rémunération)</p> <p>AFSSET : Substitution: un enjeu pour les CMR (2007) (Aucune rémunération)</p>	03 février 2011

	<p>Université de Grenoble : Journée FMC Quoi de neuf en Cancérologie (2008) (Aucune rémunération)</p> <p>Université Claude Bernard Lyon 1er : Journée de formation de la Société de SMST Lyon: Les cancers professionnels (2010) (Aucune rémunération)</p> <p>Université de Grenoble : Enseignement (1 journée en 2006, 2007, 2010) (Aucune rémunération)</p>	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
TISSOT	Sylvie	27 janvier 2011
	Aucun lien déclaré	Démission en mars 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	

POUR LE GROUPE DE TRAVAIL

NOM	Prénom	Date de déclaration des intérêts
Analyse Anses :	<p>Rubrique de la DPI</p> <p>Description de l'intérêt</p> <p><i>en cas de lien déclaré</i></p>	
APPENZELLER	Brice	31 mai 2012
	Aucun lien déclaré	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
BOURGEOIS	Damien	24 janvier 2011
	IF	
	Rhodia : Plan d'épargne en entreprise, quelques actions	
	SR	
	Maintenance Service Environnement : Conjoint ingénieur (depuis 01/12/2010)	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
CESARINI	Jean-Pierre	3 novembre 2011
	IP-SC	
	Laboratoire Oenobiol (Paris 16) : Investigateur principal (De 2006 à 2007) (Rémunération personnelle)	
	IP-RE	
	CPP Ile de France IV : Rapporteur interne (Aucune rémunération)	

	<p>AFSSAPS : Expert, Groupe de travail "Produits de protection solaire" (depuis décembre 2005) (Rémunération personnelle)</p> <p>GALDERMA : Expert Sources bleues (depuis 2010) (Vacation à l'acte)</p> <p>IP-AC</p> <p>Laboratoire MERCK - Médication familiale : Compléments alimentaires (depuis 01/07/2010) (Honoraires)</p> <p>IP-CC</p> <p>Laboratoire MERCK - Médication familiale : Participation à des congrès (depuis 01/07/2010) (Honoraires)</p> <p>Association "Sécurité solaire" : Conseil Scientifique (depuis 1997)</p>	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
GARCON	Guillaume	21 juin 2012
	<p>IP-SC</p> <p>Domaines d'Intérêt Majeur (DIM)-Santé Environnement Toxicologie (SEnT) Ile-de-France : Expertise (De 2010 à 2010)</p> <p>Domaines d'Intérêt Majeur (DIM)-Santé Environnement Toxicologie (SEnT) Ile-de-France : Expertise (De 2011 à 2011)</p>	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
HUYNH	Cong Khanh	28 mars 2012
	<p>VB</p> <p>ERTEC (filiale suisse de Colas) : formation pour les analyses des HAP dans le bitume par GC-MS donnant lieu au versement à l'IRST (0,08% du budget) (2012)</p>	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
LAFONTAINE	Michel	20 décembre 2012
	Aucun lien déclaré	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
SCHROEDER	Henri	28 janvier 2011
	<p>IF</p> <p>Air France, Rexel, BNP : actions</p> <p>Fonds de placement LCL Protection : Produits financiers</p> <p>VB</p> <p>Industries agro-alimentaires : Contrat sur aliments fonctionnels donnant lieu à versement à l'université Henri Poincaré (50 % du laboratoire où l'expert est Enseignant-chercheur, responsable des études réalisées) (2001-2006)</p> <p>ANSES : Veille bibliographique (auteur des notes de</p>	

	veille) donnant lieu à versement à l'université Henri Poincaré (15 %du budget du laboratoire) (2009-2011)	
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
STÜCKER	Isabelle Aucun lien déclaré	10 février 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	
SUTTER	Benjamin IP-SC Institut national de Recherche et Sécurité : Projet "Bitumes et Travaux Routiers" (2011) (Salaire)	17 mai 2011
Analyse Anses :	Pas de risque de conflit d'intérêt par rapport à la thématique de la saisine	

Notes



Agence nationale de sécurité sanitaire
de l'alimentation, de l'environnement et du travail
27-31 avenue du général Leclerc
94701 Maisons-Alfort Cedex
www.anses.fr