

## La route de l'après-pétrole

### La route et le bitume

La plupart des routes sont revêtues d'une ou plusieurs couches quasi-étanches constituées d'un matériau composite à matrice bitumineuse et à charges minérales : l'enrobé bitumineux, où le bitume joue le rôle de « liant » [1]. Cela peut surprendre, mais le bitume existe à l'état naturel sous forme d'asphaltes depuis la nuit des temps. À titre d'exemples, de grands gisements de bitume naturel sont situés sur l'île de Trinidad et en Alberta au Canada (figure 1A). L'exploitation des bitumes naturels étant complexe, ils sont peu valorisés à l'heure actuelle. Ainsi, de nos jours, le bitume est un produit majoritairement issu de l'industrie pétrolière. Il s'agit du résidu de la distillation fractionnée du pétrole. Sa consistance dépend de la température : il devient liquide à haute température ( $\geq 80\text{ °C}$ ) et fragile à basse température ( $\leq -10\text{ °C}$ ). Selon l'application visée, des fluxants (pétroliers ou biosourcés) sont ajoutés au bitume pour réduire sa viscosité. À l'inverse, pour rendre le bitume plus visqueux, il peut être oxydé dans des tours de soufflage afin d'introduire des fonctions polaires créant ainsi des interactions moléculaires supplémentaires. Les besoins actuels en bitume pour la France et pour l'Union européenne sont estimés respectivement à 2,4 et 11,3 millions de tonnes chaque année [2]. Potentiellement, le bitume pétrolier peut être recyclé à 100 % pour fabriquer ou entretenir les chaussées. Cependant, le contexte mondial de l'exploitation du pétrole commence à induire des modifications dans les stratégies de raffinage en privilégiant l'hydroconversion ou le vapocraquage des fractions lourdes bitumineuses en fractions plus légères à plus haute valeur ajoutée, que le bitume (distillats moyens, essence, gaz, ou précurseurs pour la pétrochimie...). Le syndicat routier professionnel Routes de France alerte déjà du risque de pénurie à court terme en bitume pour les entreprises françaises de travaux publics [3]. À ces difficultés d'approvisionnement s'ajoutent les risques sanitaires liés à l'utilisation professionnelle des produits bitumineux et de leurs additifs [4]. Il devient donc nécessaire de développer des solutions de substitution au bitume pétrolier !

### Les liants routiers alternatifs

#### • Liants issus d'huiles végétales et de coproduits de la sylviculture

Les premiers liants végétaux ont été testés en France par les entreprises de travaux routiers dans les années 2000 (voir le tableau, page suivante). Ils sont composés principalement d'un mélange de coproduits d'huile végétale visqueuse (minérale ou végétale) et d'un matériau à haut poids moléculaire issu généralement de l'industrie du bois (huile de conifères, ou tall oil, résine naturelle ou chimiquement modifiée). Des polymères jouant le rôle d'agents de consistance sont ajoutés pour optimiser la rhéologie.

Il est à noter que seul le *Végécol* de Colas peut être qualifié de 100 % végétal, car aucun polymère d'origine pétrolière n'entre dans sa composition. Aussi, des fluxants biosourcés ont déjà été développés

à l'échelle industrielle et sont obtenus par des réactions de transestérifications d'huiles végétales. Le développement de ces liants est limité en raison :

- du prix plus élevé que celui d'un bitume pétrolier ;
- de la faible disponibilité des matières premières ;
- de l'utilisation de produits entrant en compétition avec la nutrition humaine, en particulier les huiles alimentaires.

Pour ces raisons, ces liants sont pour l'instant presque exclusivement mis en place sur des pistes cyclables, des allées piétonnes, des trottoirs ou encore des parkings (figure 1C).

#### • Liants basés sur d'autres matières premières

Plusieurs autres brevets ont été déposés ces vingt dernières années qui portent sur le développement d'alternatives au bitume pétrolier. À titre d'exemples, l'université de Picardie Jules Verne a élaboré un liant à partir de composés protéiques et de vinaigre (ou d'autres acides organiques issus du monde végétal) [10]. L'Institut national polytechnique de Toulouse a utilisé de la biomasse cellulosique (biomasse la plus abondante sur Terre) dans un liant routier [11]. Le principe est basé sur l'estérification des fonctions hydroxyles des unités glucose composant la cellulose par des acides gras, transformant ainsi les propriétés hydrophiles originelles de la cellulose en propriétés hydrophobes, recherchées pour un liant routier. La recherche en matériaux routiers alternatifs s'est également intéressée à la lignine (principalement issue du procédé Kraft) en tant qu'additif au bitume pétrolier [12-14], avec des expériences sur chantier qui ont déjà permis de valider ce principe.

Enfin, une équipe américaine s'est intéressée à la valorisation de lisier de porc, en le transformant en huile par un processus thermochimique : la liquéfaction hydrothermale (HTL) [15]. Le procédé HTL utilise de l'eau pressurisée de 5 à 15 MPa et chauffée à des températures de 250 à 350 °C. C'est l'un des processus les plus prometteurs pour la transformation de la biomasse humide solide en biohuiles.

Les bitumes alternatifs issus de la biomasse présentent des difficultés de développement à l'échelle industrielle compte tenu soit du manque de disponibilité des biomasses employées soit des propriétés d'usages insuffisantes. À l'heure actuelle, ils peuvent être toutefois utilisés en tant qu'additifs au bitume conventionnel.

#### • Liants obtenus à partir de microalgues

Les microalgues (phytoplancton) sont des microorganismes unicellulaires à croissance très rapide. Elles peuvent produire de la biomasse à forte teneur en protéines et lipides. Des procédés de culture mimant les conditions naturelles ont été développés [16]. Les microalgues cultivées sur des terres non arables pourraient constituer une biomasse disponible en grande quantité dans le futur proche. Un consortium constitué de laboratoires ligériens (projet Algoroute) a étudié la possibilité de transformer des résidus de microalgues pour produire un bio-liant ; ces résidus de microalgues sont initialement issus d'une première valorisation qui vise à extraire les protéines [17,18]. C'est le procédé de HTL employé premièrement

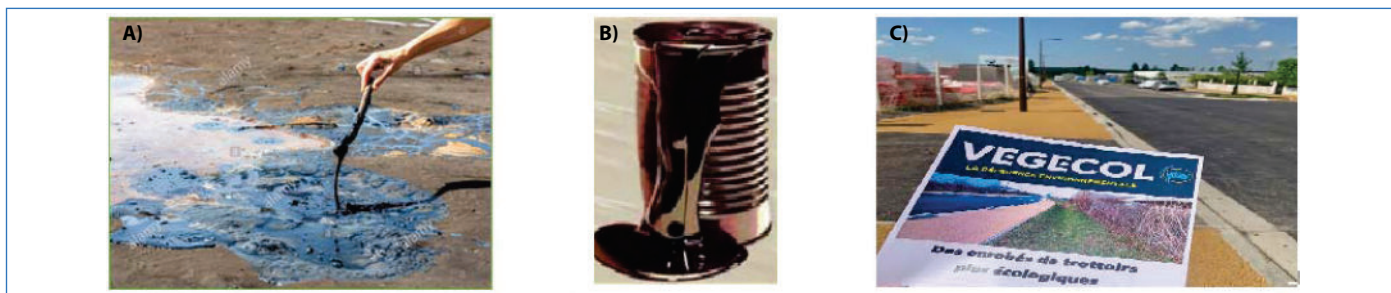


Figure 1 - A) Suintements d'asphalte naturel, île de Trinidad, Vénézuéla. B) Bitume pétrolier. C) Exemple de chantier Végécol : trottoirs de la rue Louis Armand (ZAC des Danjons) à Bourges.

Nom commercial	Entreprise	Composition	Référence
Non défini	-, 1991	Résine d'huile de tall, de bois - Térébenthine + huile minérale ou végétale - Huile de tall + additifs	[5]
Végécol	Colas, 2004	Colophanes naturelles ou modifiées + huile de lin, de ricin ou de bois, brute, raffinée ou modifiée + additifs	[6]
Biophalt	Eiffage, 2007	Colophanes naturelles ou modifiée, terpènes solides ou modifiés + poix d'huile de tall + la cire + sels minéraux à base de Co, Va, Ca, etc.	[7]
Floraphalte	Shell, 2010	Ester de colophane + huile de colza, de palme ou huile de tall	[8]
Séquoia	Eurovia, 2010	Colophanes naturelles ou modifiées, terpènes naturels ou modifiés + Polyester obtenu par polycondensation d'acides gras d'une huile de colza, tournesol, soja, palme ou huile de tall avec des polyacides + agents protecteurs des UV + additifs modifiant la rhéologie + des sels de Ti ou de Fe	[9]

sur des résidus issus de *Scenedesmus sp.* (une microalgue d'eau douce), et deuxièmement sur des résidus de *Spirulina sp.* (une cyanobactérie) [19] qui a permis d'obtenir des matériaux hydrophobes viscoélastiques similaires à celles d'un bitume conventionnel. Le rendement de la phase hydrophobe après liquéfaction hydrothermale est d'environ 55 % en poids par rapport à la matière sèche de départ. Il a été également montré que des catalyseurs de type oxyde (de cérium en particulier) favorisaient des réactions de polycondensation entre les acides gras et les acides aminés (issues de la décomposition des protéines des microalgues) pour former des molécules à plus haut poids moléculaire.

La caractérisation de ces bioliants obtenus par HTL a permis d'identifier plus de 800 molécules de poids moléculaire allant de 165 à 450 Da. Parmi celles-ci, des molécules azotées riches en composés aromatiques semblent jouer un rôle similaire à celui des asphaltènes dans le bitume pétrolier. Ces composés « asphalténiques » avec une forte aromaticité et des chaînes d'alkyle pourraient contribuer aux propriétés rhéologiques uniques du bioliant obtenu par HTL [20]. Cependant, le principal problème à l'emploi de ce type de matériau réside dans un risque significatif de toxicité après lessivage par les eaux de pluie.

## Vers d'autres biomasses disponibles actuellement à plus grande échelle

Dans le projet Bitume 2.0, il a été montré que des huiles alimentaires usagées (HAU) associées à des dérivés cellulotiques pouvaient être transformées en un liant alternatif au bitume pétrolier en ajustant leur viscosité. En 2014, il a été estimé que 36 000 tonnes d'HAU étaient potentiellement disponibles en France (source : Ademe, DGDDI) et que 100 000 à 700 000 tonnes d'HAU pouvaient être collectées en Europe chaque année. Actuellement, les HAU sont transformées en biocarburant sous forme d'esters méthyliques. Cependant, la quantité de biocarburant produite pourrait être limitée par des quotas. La directive EnR II fixait l'objectif d'incorporer 3,5 % de biocarburants avancés (avec une limite de 1,7 % pour le biodiesel issu des HAU) dans les carburants totaux d'ici 2030 [21]. Cela encourage donc à explorer de nouvelles méthodes de valorisation des HAU comme liant vert pour la route, où le carbone sera stocké pour de nombreuses années.

## Conclusion et perspectives

Le développement de biobitumes et autres alternatives biosourcées (par exemple, les fluxants) aux produits pétroliers employés dans la route a fait l'objet de nombreux investissements ces vingt dernières années. En effet, ces produits pourraient offrir une alternative plus durable et respectueuse de l'environnement aux bitumes pétroliers.

En réduisant la dépendance aux ressources fossiles et en limitant les émissions de gaz à effet de serre, les biobitumes peuvent contribuer à atténuer les impacts environnementaux associés à la construction et à l'entretien des infrastructures routières.

Cependant, malgré leurs nombreux avantages, les biobitumes font encore face à des défis, tels que la disponibilité limitée des matières premières et les coûts de production parfois plus élevés. Pour favoriser leur adoption à grande échelle, des efforts supplémentaires sont nécessaires en termes de recherche et développement (où la chimie a toute sa place !), de sensibilisation et d'incitations politiques (exemple réglementation européenne sur les moteurs à combustion : initiative Euro 7) [22].

- [1] Un point sur n° 25, La structure chimique des bitumes pétroliers, *L'Act. Chim.*, **2014**, 385, p. 63. [www.societechimiquedefrance.fr/numero/fiche-n-25-la-structure-chimique-des-bitumes-petroliers-p63-n385](http://www.societechimiquedefrance.fr/numero/fiche-n-25-la-structure-chimique-des-bitumes-petroliers-p63-n385)
- [2] [www.eurobitume.eu/home](http://www.eurobitume.eu/home) (consulté le 11/02/24).
- [3] [www.routesdefrance.com/penurie-de-bitume-5261](http://www.routesdefrance.com/penurie-de-bitume-5261) (consulté le 11/02/24).
- [4] [www.anses.fr/fr/content/exposition-aux-bitumes](http://www.anses.fr/fr/content/exposition-aux-bitumes) (consulté le 11/02/24).
- [5] O. Pinomaa, Dyeable pavement material, US5021476 (A).
- [6] Entreprise Colas, Liant de nature végétale pour la réalisation de matériaux pour le bâtiment et/ou les travaux publics. EP1466878 (A1).
- [7] Eiffage, Composition comprenant une fraction organique pour la réalisation d'une couche et/ou d'un revêtement de voie ou de bâtiment. FR2915204 (A1).
- [8] Shell, Binder composition and asphalt mixture. WO2010128105 (A1).
- [9] Eurovia, Liant synthétique essentiellement à base de matières issues de ressources renouvelables, en particulier d'origine végétale, et ses applications en technique routière. FR2955586 (A1).
- [10] M. Quenedec-T'kint, B. Dupré, B. Laidoudi, L.-B. Mbounba-Mboundou, Procédé de fabrication d'un liant, notamment destiné à l'élaboration et/ou l'enrobage de granulats ou encore entrant dans la composition de matrices pour la fabrication de biocomposites. EP2473562 (A1).
- [11] C. Vaca-Garcia, Coating material for road construction. WO2010003838 (A1).
- [12] Y. Ren *et al.*, Improved aging properties of bio-bitumen coating sheets by using modified lignin, *J. Env. Manage.*, **2020**, 274, 111178.
- [13] C. Moretti *et al.*, Kraft lignin as a bio-based ingredient for dutch asphalts: an attributional LCA, *Sci. Total Environ.*, **2022**, 806, 150316.
- [14] Y. Zhang *et al.*, Effect of bio-oil on rheology and chemistry of organosolv lignin-modified bitumen, *J. Mater. Civ. Eng.*, **2022**, 34(4), 04022009.
- [15] E. Fini *et al.*, Chemical characterization of biobinder from swine manure: sustainable modifier for asphalt binder, *J. Mater. Civ. Eng.*, **2011**, 23(11), p. 1506-13.
- [16] <https://algorithmsource.com> (consulté le 11/02/24).
- [17] M. Audo *et al.*, Subcritical hydrothermal liquefaction of microalgae residues as a green route to alternative road binders. *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **2015**, 3(4), p. 583-590.
- [18] E. Chailleux *et al.*, Matériau viscoélastique obtenu par liquéfaction hydrothermale de microalgues. WO2015044891 (A1).
- [19] I. Borghol *et al.*, Biosourced analogs of elastomer-containing bitumen through hydrothermal liquefaction of spirulina sp microalgae residues, *Green Chem.*, **2018**, 20(10), p. 2337-44.
- [20] C. Geantet *et al.*, FT-ICR MS characterization of bio-bitumens for road pavement from HTL of microalgae residues, *J. Env. Chem. Eng.*, **2022**, 10(3), 107361.
- [21] F. Lashari, La stratégie européenne de développement des biocarburants : réorientation vers des biodiesels avancés issus de déchets et de résidus alimentaires ; opportunités et risques, *DUMAS*, **2020**, p. 45.
- [22] [www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/09/25/euro-7-council-adopts-position-on-emissions-from-cars-vans-buses-and-trucks](http://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2023/09/25/euro-7-council-adopts-position-on-emissions-from-cars-vans-buses-and-trucks) (consulté le 11/02/24).

Cette fiche a été réalisée par **Justine CANTOT**, chargée de recherche, Université Gustave Eiffel, **Emmanuel CHAILLEUX**, directeur de recherche, Université Gustave Eiffel, et **Clémence QUEFFELEC** (clemence.queffelec@univ-nantes.fr), maître de conférences, Nantes Université.

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par Jean-Pierre FOULON (jpfoulon@wanadoo.fr). Elles sont regroupées en téléchargement libre sur [www.lactualitechimique.org](http://www.lactualitechimique.org).