

PROJET COOL & LOW NOISE ASPHALT À PARIS

PREMIERS RÉSULTATS

Depuis 2017, la Ville de Paris s'est engagée, avec les entreprises Colas et Eurovia et l'association Bruitparif, dans le projet Cool & Low Noise Asphalt. L'objectif est de tester les performances acoustiques et thermiques ainsi que la durabilité et la tenue mécanique de trois formules innovantes de revêtements pour lutter contre la pollution sonore et les îlots de chaleur urbain. Cet article présente les premiers résultats des mesures réalisées sur les sites pilotes, ainsi que le suivi de l'évolution des revêtements sous le trafic.

Opération d'arrosage
rue Frémicourt en août 2019.



© COLAS

AUTEURS

Éric Godard

Directeur technique
Colas

Lionel Grin

Directeur technique délégué
et référent Innovation
Eurovia Île-de-France Normandie

Kevin Ibtaten

Agence de l'écologie urbaine
Ville de Paris

Jérôme Lefebvre

Laboratoire espace public
Ville de Paris

Carlos Ribeiro

Chef de projet
« Bruit des transports »
Bruitparif

Maïlys Chaniel

Université de Paris, LIED
Ville de Paris

Sophie Parison

Université de Paris, LIED

La Ville de Paris, dans le cadre de son plan climat et de son plan de prévention du bruit dans l'environnement, s'est engagée dans un programme de développement des futurs revêtements de chaussées pour son réseau primaire (voies urbaines denses et à 50 km/h), afin de limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain et d'apaiser l'environnement sonore dans les arrondissements. Avec Colas, Eurovia et Bruitparif, elle a lancé le projet Cool & Low Noise Asphalt (<https://www.life-asphalt.eu/>). Ce projet Life subventionné par la Commission européenne a démarré en juillet 2017 pour une durée de cinq ans. Des revêtements innovants destinés à diminuer le niveau de bruit de roulement et à abaisser la température en cas de forte chaleur ont été formulés et posés sur des sites pilotes en octobre 2018. Depuis, deux hivers et surtout un été sont passés. Cet article présente les premiers résultats des mesures acoustiques et des mesures thermiques réalisées sur les sites pilotes, ainsi que le suivi de l'évolution des revêtements sous le trafic.

Les partenaires du projet sont :

- la Ville de Paris, qui assure son pilotage au travers de l'Agence de l'écologie urbaine (AEU) de la direction des Espaces verts et de l'Environnement (DEVE) ainsi que la gestion de la partie sonore (CPX) et thermique par le Laboratoire de l'espace public (LEM.VP) de la direction de la Voirie et des Déplacements (DVD) avec l'appui du Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED) de l'université de Paris et le concours du service technique de l'Eau et de l'Assainissement (STEA) de la direction de la Propreté et de l'Eau (DPE) ;
- l'association indépendante Bruitparif, centre d'évaluation technique de l'environnement sonore, experte de l'observation du bruit en Île-de-France ;
- l'entreprise Colas, pour la formulation des enrobés bitumineux au Campus scientifique et technique (CST), et Colas Île-de-France Normandie, pour la fabrication et la mise en œuvre des revêtements en bétons bitumineux minces sur deux sites pilotes ;

- l'entreprise Eurovia, pour la formulation des enrobés bitumineux de type asphalte coulé par le laboratoire Île-de-France Normandie, et le centre de recherche de Mérignac et Eurovia Île-de-France, pour leur mise en œuvre sur un site pilote.

OBJECTIFS DU PROJET

Le projet Cool & Low Noise Asphalt s'inscrit dans la politique environnementale de la Ville de Paris et plus particulièrement son plan climat et son plan de prévention du bruit dans l'environnement (PPBE). En effet :

- La canicule de 2003, qui a provoqué le décès de milliers de personnes, a accéléré la nécessité de lutter contre l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU).
- Le taux de Parisiens exposés aux nuisances sonores est évalué à 22 %.

Ce projet a pour ambition de proposer de nouveaux revêtements de chaussées urbains pour la Ville de Paris pouvant contribuer à la diminution du bruit de roulement issu du trafic reçu par les riverains et à la diminution de la température de l'air ainsi que du stress thermique à 1,5 m (hauteur de piéton) en cas de vague de chaleur. Ces revêtements pourraient alors être déclinés dans toutes les villes européennes devant faire face à la même problématique sur ces deux enjeux environnementaux majeurs.

L'amélioration de la température en cas de canicule ne sera pas uniquement amenée par le revêtement, mais aussi par l'aspersion de la chaussée, les jours de plus forte chaleur, grâce au réseau d'eau non potable (ENP) de la ville, l'évaporation de l'eau ayant un effet rafraîchissant pour le revêtement et l'air. La voirie urbaine parisienne cible est le réseau primaire des rues intra-muros, où la vitesse reste à 50 km/h et où le phénomène de surchauffe est présent.

La résolution de ces objectifs passe par la proposition de nouveaux revêtements moins bruyants, possédant des granulats clairs et présentant une macrorugosité adaptée pour conserver l'eau répandue avant son évaporation. Les revêtements mis au point doivent être testés sur site réel, représentatifs et comparés aux revêtements classiques utilisés par la Ville de Paris depuis plus de trente ans. Les sites pilotes sont instrumentés afin de fournir les données nécessaires pour évaluer l'impact des revêtements et de l'aspersion sur le bruit de roulement et la température.

ÉTUDES PRÉALABLES ET RÉALISATION DES SITES PILOTES

La première étape du projet, largement décrite dans l'article publié dans la RGRA en janvier 2019¹, a consisté en une série de tâches préparatoires essentielles :

- la formulation des produits destinés à atteindre les objectifs du projet ;
- la sélection des sites pilotes ;
- la définition des programmes de mesure et de suivi des sites ;
- l'instrumentation partielle des sites avant travaux ;
- l'installation et l'instrumentation des nouveaux produits sur ces sites.

FORMULATION DES REVÊTEMENTS

La formulation des revêtements bitumineux devait satisfaire aux exigences suivantes :

- permettre une réduction de bruit de roulement significative par rapport aux revêtements de référence, et ceci de manière durable ;
- permettre à terme une limitation de son échauffement par temps ensoleillé grâce à un albédo augmenté ;
- disposer d'une capacité de rétention d'eau superficielle suffisante pour optimiser l'efficacité des opérations d'aspersion ;
- avoir une durabilité mécanique équivalente aux revêtements de référence ;
- ne pas générer de surcoût au mètre carré supérieur à 10 % par rapport aux revêtements classiques, pour une même épaisseur.

La partie traitée par Colas a consisté à produire deux enrobés dérivés de formulations de référence bien connues en les adaptant au cahier des charges du projet. La formule de référence étant un béton bitumineux mince (BBM) A 0/10 à liant modifié par des polymères SBS, appliquée en 4 cm moyens.

La première formule du projet a été établie en partant d'un enrobé de type *Stone Mastic Asphalt* (SMA) 0/10 largement employé en Europe et connu pour sa forte durabilité. La formule a été modifiée en abaissant la granularité à 0/8 mm et en augmentant la teneur en vides jusqu'à 15 % afin d'améliorer ses performances acoustiques en émission et en absorption. Pour garantir sa durabilité mécanique, elle comporte une forte proportion de mastic, dont la cohésion est assurée par la présence de fibres de cellulose, et un bitume plus fortement modifié par des polymères SBS (BMP 25/55-65). Des gravillons très clairs ont été substitués aux gravillons usuels. La macrotecture de la formulation doit permettre une rétention d'eau superficielle suffisante pour les opérations d'aspersion. Cette formule a été baptisée SMAphon pour le projet.

La seconde formule est dérivée du BBTM (béton bitumineux très mince) 0/6, réputé pour son efficacité sur le plan phonique, mais dont la durabilité mécanique et phonique constatée en milieu urbain dense est insuffisante. Cette formulation de départ a été améliorée en réduisant la teneur en vides à 15 % tout en conservant une granularité 0/6 afin de maintenir des caractéristiques phoniques satisfaisantes en émission et en absorption. Les gravillons

retenus présentent également une forte clarté pour augmenter l'albédo du revêtement et le mastic a été renforcé par l'incorporation de chaux éteinte et l'emploi de bitume fortement modifié aux polymères SBS (BMP 25/55-65) afin d'assurer la durabilité mécanique voulue. La macrotecture de ce revêtement doit contribuer à une rétention d'eau superficielle suffisante pour les opérations d'aspersion. Cette formule a été baptisée BBphon+ pour le projet.

Le principal défi était en effet d'assurer la durabilité des matériaux malgré la forte porosité nécessaire à l'obtention des caractéristiques phoniques attendues. Le recours à un bitume modifié plus performant et à des additifs pour le mastic a aidé à relever ce défi. Afin de vérifier la résistance mécanique aux agressions de fort cisaillement spécifiques au milieu urbain dense (intersection, manœuvres, livraisons, etc.), la machine d'essai mise au point par l'université de Darmstadt (*Darmstadt Scuffing Device*) a été acquise pour le projet. Les formulations retenues pour la réalisation des sites pilotes se sont avérées aussi résistantes, même avec des conditions d'essai plus sévères, que le BBM 0/10 de référence et que la SMA 0/10 connue pour sa durabilité.

Tous les éléments de formulation ont été publiés¹⁻³. La partie traitée par Eurovia a consisté à formuler un asphalte coulé routier de type AC2 afin de satisfaire aussi bien à l'objectif acoustique qu'à l'objectif thermique fixés dans le cadre du projet.

Les asphaltes sont réputés pour leur durabilité mécanique, mais le défi était de proposer un produit aux performances améliorées d'un point de vue acoustique et thermique. L'étude d'une dizaine de formulations a conduit à retenir un mélange avec des constituants adaptés.

L'aspect thermique a été traité en ayant recours à des granulats clairs et des granulats poreux, contribuant ainsi à gagner en performance en termes de clarté, d'albédo et de rétention d'eau. Grâce au traitement mécanique de surface qui accélère le décapage, la caractéristique de clarté recherchée est obtenue plus rapidement.

L'aspect acoustique a été atteint en ayant recours aux granulats poreux et légers, qui se concentrent en surface en raison de leur faible densité, dont les caractéristiques intrinsèques améliorent le potentiel phonique du revêtement. Cette formule a été baptisée Puma pour *Porous Urban Mastic Asphalt* (photo 1).

CHOIX DES SITES PILOTES

Les sites pilotes pour l'expérimentation du projet devaient satisfaire à un certain nombre de critères afin de pouvoir évaluer au mieux les effets des revêtements sur le bruit de roulement et les îlots de chaleur :

- être des rues parisiennes identifiées comme soumises à un niveau sonore élevé et dont la configuration favorise la chaleur urbaine ;
- faire partie du réseau sur lequel la vitesse reste limitée à 50 km/h, avec une orientation au plus près d'un axe Est-Ouest sans présenter d'alignement d'arbres ;
- faire l'objet d'une programmation de travaux en 2018 sur un linéaire minimal de 400 mètres.

Trois sites satisfaisant au mieux aux critères requis malgré quelques écarts ont été retenus : la rue de Courcelles (Paris VIII^e) pour tester le BBphon+, la rue Frémicourt (Paris XV^e) pour tester le SMAphon et la rue Lecourbe (Paris XV^e) pour tester le Puma.

Chaque site est prévu pour recevoir deux planches d'environ 200 mètres de long chacune : l'une avec le revêtement de référence BBM A 0/10 ou asphalte coulé routier type AC2, l'autre avec le produit innovant propre à chaque site.

Le site de la rue Frémicourt présente les particularités, premièrement d'avoir fait l'objet de travaux importants de requalification de la chaussée pendant la période de préparation, ce qui affecte la réalisation et la qualité des mesures avant travaux, et deuxièmement que la planche de référence soit partiellement préexistante avec un revêtement âgé de deux ans.

ESSAIS SUR CHAUSSÉE AVANT TRAVAUX

Afin de disposer d'éléments de référence sur l'état avant travaux, un plan d'instrumentation et de suivi des sites a été établi. Ce plan a nécessité la réalisation d'essais in situ ainsi que l'installation d'équipements de mesures acoustiques et microclimatiques avant la pose des revêtements.

Pour évaluer le niveau sonore du bruit généré par le contact entre le pneumatique et la chaussée, le laboratoire de l'espace public de la Ville de Paris a réalisé des mesures par la méthode CPX (*Close ProXimity*) sur les revêtements existants des trois sites pilotes (photo 2). La méthode en champ proche CPX consiste à mesurer en continu et à vitesse constante le niveau sonore LVRéf et l'homogénéité acoustique τ VRef d'un revêtement de chaussée par la mesure du bruit de contact entre le pneu et la chaussée.

–Photo 1–
Asphalte coulé innovant Puma
rue Lecourbe.



© EUROVIA

-Photo 2-

Véhicule de mesure de bruit en champ proche CPX.



© VILLE DE PARIS

Sur chaque site, les mesures sont prises à des vitesses de 30 et 50 km/h dans chaque sens de circulation. La caractérisation de l'état initial acoustique s'est déroulée en juillet 2017 pour la rue Frémicourt et en mai 2018 pour les rues de Courcelles et Lecourbe.

Pour évaluer la durabilité des revêtements innovants, des mesures des caractéristiques de surface existantes, telles que la profondeur moyenne de texture (PMT) pour la macrotexture et la valeur équivalente au pendule (VEP) pour la microtexture, ont été réalisées et un état structural de la fondation de chaussée a été déterminé.

INSTALLATION DES STATIONS DE MESURES DE BRUIT

Pour chaque site expérimental, une station de mesure permanente du bruit a été implantée à proximité d'une façade d'habitations à une hauteur de 4 mètres (équivalent d'un 1^{er} étage) pour chaque planche réalisée : une station d'évaluation du revêtement de chaussée de référence (standard) et une station d'évaluation du revêtement de chaussée innovant.

Les mesures sont effectuées au moyen de stations permanentes équipées de sonomètres de classe 1 (précision maximale), faisant l'objet d'étalonnages et de vérifications régulières. Les niveaux LAeq1s ainsi que les niveaux par bandes de fréquences de tiers d'octave sont enregistrés toutes les secondes. Le transfert des données vers les serveurs informatiques de Bruitparif est réalisé en temps réel via le réseau cellulaire. Les niveaux sonores LAeq1s sont publiés sur la plate-forme internet de consultation des données du réseau de mesure de Bruitparif (<http://rumeur.bruitparif.fr/>)⁴⁻⁵.

Le dispositif de mesure a été mis en œuvre au printemps et à l'été 2018, préalablement à la réalisation des travaux, afin de pouvoir comparer les performances acoustiques des nouveaux revêtements de chaussée à ceux d'origine. La station installée au 37 rue Frémicourt (photo 3) a dû être déposée pendant la phase de travaux de requalification de la chaussée, puis réinstallée fin mars 2019.

INSTALLATION DES STATIONS MÉTÉO

Des stations météo ont été mises en place sur chacun des sites (figure 1). Elles sont équipées de capteurs permettant notamment de quantifier l'impact de l'arrosage et/ou des matériaux à hauteur de piéton (1,5 mètre). Afin d'évaluer ces impacts, deux indicateurs sont suivis : la température de l'air et l'UTCI (*Universal Thermal Climate Index* ou indice universel du climat thermique). L'UTCI est un indicateur de stress thermique établi à partir d'un bilan thermique du corps humain, calculé en fonction de la vitesse du vent, de la température de l'air, de l'humidité relative et de la température de globe noir, et faisant des hypothèses sur l'activité métabolique et l'habillement du piéton.

Enfin, des thermo-fluxmètres ont également été disposés à -5 centimètres dans la chaussée afin d'évaluer l'impact thermique de l'arrosage. Ces capteurs mesurent à la fois la température et le flux de chaleurs à 5 centimètres sous la surface du revêtement.

-Photo 3-

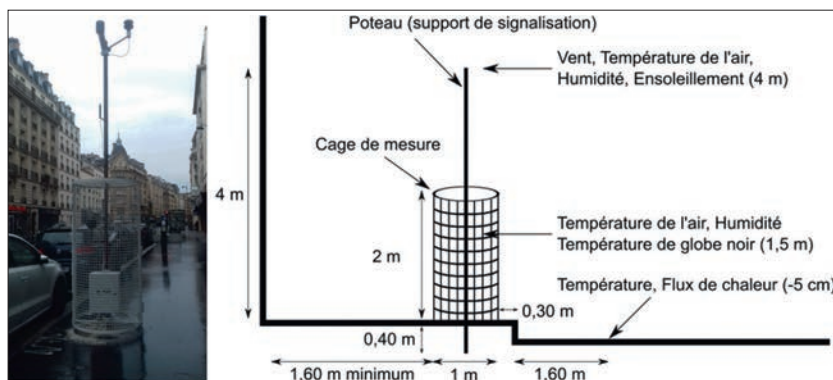
Station de mesure du bruit et station météorologique rue Frémicourt (mars 2019).



© BRUITPARIF

-Figure 1-

Station météo de la rue Frémicourt (à gauche) et son schéma (à droite).

**RÉALISATION DES SITES PILOTES**

La mise en œuvre des sites pilotes s'est échelonnée au cours du mois d'octobre 2018¹, dans des conditions météorologiques acceptables. À la demande du gestionnaire de voirie local, le chantier de la rue de Courcelles a été réalisé de nuit (photo 4). Les deux autres chantiers ont pu avoir lieu en journée.

—Photo 4—

Mise en œuvre du BBphon+ rue de Courcelles, au droit d'une station météo.



© DOLIAS

Dans tous les cas, la planche en revêtement de référence a été posée le même jour que la planche de produit innovant, conformément à ce qui était prévu.

Sur l'asphalte coulé de référence de la rue Lecourbe, le départ du cloutage superficiel a été observé dans les jours qui ont suivi la mise en œuvre, ce qui génère un défaut sur le revêtement de référence à prendre en compte dans l'interprétation du suivi.

ÉTAT DES SITES PILOTES À 18 MOIS

Les sites pilotes font l'objet de visites de terrain deux fois par an par un comité de suivi (COSUI) qui comprend l'ensemble des parties prenantes du projet et des gestionnaires de voirie.

Les trois sites pilotes donnent satisfaction dans leur usage, sont en bon état général et ont évolué normalement après 18 mois de trafic incluant des périodes hivernales.

Rue Frémicourt (SMaphon), l'aspect de surface s'éclaircit progressivement en raison du décapage du film de liant sous l'action du trafic et de l'apparition des granulats clairs. La différence devient notable avec le BBM de référence.

Rue de Courcelles (BBphon+), le décapage du film de liant se produit également. Ponctuellement, du plumage est constaté en deux points, sous stationnement.

Enfin, rue Lecourbe (Puma), l'aspect de surface est également très satisfaisant : les granulats légers deviennent accessibles, les granulats clairs sont visibles après le grenailage, mais une zone singulière présente de la fissuration. La principale difficulté rencontrée a été le défaut de cloutage de l'asphalte de référence.

SUIVI DES MESURES DU BRUIT

MESURES DU BRUIT DE ROULEMENT

Concernant les mesures en champ proche CPX du bruit de roulement, le plan d'évaluation expérimental, avec des indicateurs du niveau sonore à 50 km/h, prévoit la caractérisation de l'état zéro des sites pilotes afin de les comparer à l'état initial (avant travaux), puis de caractériser tous les ans afin de suivre leur performance dans le temps.

Sont présentés ici :

- les résultats de la comparaison entre l'état initial avant travaux et le point zéro après travaux pour la section innovante, avec un gain attendu de 5 dB(A) ;
- les résultats de la comparaison entre le point zéro de la performance du revêtement innovant et le revêtement de référence, avec un gain attendu de 3 dB(A).

Même si les mesures concernant le point zéro ont été réalisées fin mars 2019, soit 5 à 6 mois après la pose des revêtements en raison des contraintes météorologiques, les résultats obtenus peuvent être associés à l'état initial. En effet, la différence due à ce report est de l'ordre de l'incertitude de la méthode d'essai employée.

Rue Frémicourt, les mesures initiales ont été réalisées en juillet 2017 par anticipation en raison de la programmation des travaux de recalibrage de la rue jusqu'à l'été 2018. Le tronçon concerné se situe entre la rue du Commerce et la place Cambronne. Deux sections sont identifiées :

- La première, longue de 200 mètres, correspond au BBMA de référence. Cette section est composée en partie d'un BBMA réalisé en 2016 sur 140 mètres, et que le comité de pilotage du projet a jugé satisfaisant pour être pris comme revêtement de référence, et d'un BBMA réalisé en même temps que le revêtement innovant.

- La deuxième section, également de 200 mètres, a vu la pose du SMaphon en octobre 2018.

Les mesures de caractérisation du point zéro ont été réalisées durant la nuit du 27 au 28 mars 2019. Le SMaphon a permis un gain de 4,4 dB(A), proche de la cible, par rapport à l'état initial et il possède un gain de 3,5 dB(A) par rapport à sa référence. Toutefois, avec la seule prise en compte du BBMA de référence de 2018, ce gain est abaissé à 2,1 dB(A).

Rue de Courcelles, les mesures à l'état initial ont été réalisées durant la nuit du 2 au 3 mai 2018. Ce site est composé de deux tronçons disjoints :

- Le premier, situé sur environ 140 mètres entre les rues Daru et Hoche, supporte le BBMA de référence mis en œuvre durant la même nuit que le BBphon+.
- Le BBphon+ a été mis en œuvre en octobre 2018 sur le deuxième tronçon de 200 mètres, entre les rues de Murillo et Monceau.

Les mesures de caractérisation de l'état zéro ont été réalisées durant la nuit du 26 au 27 mars 2019. Le gain obtenu par rapport à l'état initial est de 4,7 dB(A) et de 3,3 dB(A) entre le BBphon+ et le BBMA de référence.

Rue Lecourbe, les mesures à l'état initial ont été réalisées dans la même nuit que celles de rue de Courcelles ; celles du point zéro ont été menées durant la nuit du 1^{er} au 2 avril 2019. Ce site est composé d'une voie de circulation et d'une voie bus en sens unique entre la rue de l'Abbé-Groult et la rue de la Convention, sur un linéaire de 140 mètres pour chaque tronçon. Le premier tronçon porte le Puma et le second l'asphalte coulé routier de référence de type AC2. Comme évoqué plus haut, ce tronçon de référence n'est pas considéré comme représentatif en raison du départ du cloutage de surface et ne permet donc pas la caractérisation de la performance du Puma par rapport à sa référence. Le gain obtenu par rapport à l'état initial est de 2,1 dB(A). Le **tableau 1** propose une synthèse des résultats des mesures du bruit de roulement.

MESURES ACOUSTIQUES EN FAÇADE DES IMMEUBLES

Préalablement à la présentation des résultats acoustiques en façade d'habitation, il convient de préciser quelques éléments indispensables à l'interprétation des résultats après la pose des revêtements de chaussée expérimentaux :

- L'exploitation des données de trafic routier mises à disposition par la Ville de Paris a permis l'étude des corrélations entre le volume de trafic routier et les niveaux sonores mesurés en façade d'habitations. Cette analyse a confirmé que la principale source de bruit mesurée sur les trois sites pilotes correspondait au trafic routier.
- L'exploitation de données de trafic a également contribué à identifier les périodes où les conditions de circulation sont propices à la génération d'un bruit de contact pneumatique/chaussée dominant l'environnement sonore global du site. Ainsi, la période nocturne est particulièrement intéressante à analyser du fait d'une vitesse plus élevée.
- La température de l'air a une influence sur le bruit de contact pneumatique/chaussée. Ainsi, pour des conditions de circulation identiques, les niveaux sonores sont plus importants lorsque la température diminue. Pour les sites de la rue Lecourbe et de la rue de Courcelles, les évaluations de l'état initial pour les mesures de bruit en façade d'habitations ont été effectuées au printemps et en été 2018, alors que celles des revêtements expérimentaux ont été réalisées pendant l'hiver 2018, avec des écarts de températures significatifs. Un correctif, fondé sur les normes en vigueur relatives à la mesure du bruit de roulement, a donc été appliqué pour l'évaluation des résultats par rapport à l'état initial.

-Tableau 1-

Comparaison entre les niveaux de bruit émis sur les revêtements innovants, les revêtements avant travaux et les revêtements de référence à l'état zéro.

CPX dB(A)	Réduction	Vitesse 30 km/h	Vitesse 50 km/h
Objectifs du projet après la pose	Par rapport à l'existant	-	- 5,0
	Par rapport à la référence	-	- 3,0
Rue Frémicourt (SMaphon)	Par rapport à l'existant	- 3,6	- 4,4
	Par rapport à la référence	- 2,9	- 3,5
Rue de Courcelles (BBphon+)	Par rapport à l'existant	- 4,2	- 4,7
	Par rapport à la référence	- 2,3	- 3,3
Rue Lecourbe (Puma)	Par rapport à l'existant	- 2,8	- 2,1
	Par rapport à la référence	- 0,1	- 0,1

- Pour le revêtement Puma mis en œuvre rue Lecourbe, le revêtement de référence (ACR 0/10 AC2) ne correspond pas à la réalité en termes d'asphalte routier en raison de la mauvaise tenue du cloutage de surface, qui engendre une absence de réduction du niveau sonore par rapport au revêtement de référence.
- L'évaluation des performances acoustiques des revêtements des chaussées en façade d'habitations a été réalisée avec des revêtements neufs (0 à 2 mois d'exploitation), hormis pour la rue Frémicourt (6 mois d'exploitation).
- Pour la rue Frémicourt, bien qu'évalués 6 mois après la pose du revêtement SMaphon, les résultats présentés dans cet article sont retenus pour l'évaluation de l'état juste après la pose de l'enrobé : « état zéro ». Pour information, le suivi depuis 2012 de revêtements acoustiques sur la section du boulevard périphérique parisien de la porte de Vincennes montre une augmentation moyenne du niveau du bruit de roulement de l'ordre de 0,5 dB(A) par an (étude Ville de Paris, Bruitparif). Les différentes études disponibles sur le sujet confirment cet ordre de grandeur. Sur cette base, pour le projet Life Cool & Low Noise Asphalt, la différence entre l'évaluation à l'état zéro et celle à 6 mois est de l'ordre de 0,25 dB(A). Elle pourra être réévaluée, en fin de projet, lorsque les augmentations moyennes annuelles en dB/an associées à chacun des revêtements innovants seront disponibles.

Le **tableau 2** synthétise les réductions obtenues sur la composante bruit de roulement attribuables aux performances acoustiques des revêtements de chaussées expérimentaux⁶.

L'ensemble des objectifs de réduction du bruit de contact pneumatique / chaussée en façade d'habitations est atteint pour le SMaphon et le BBphon+.

-Tableau 2-

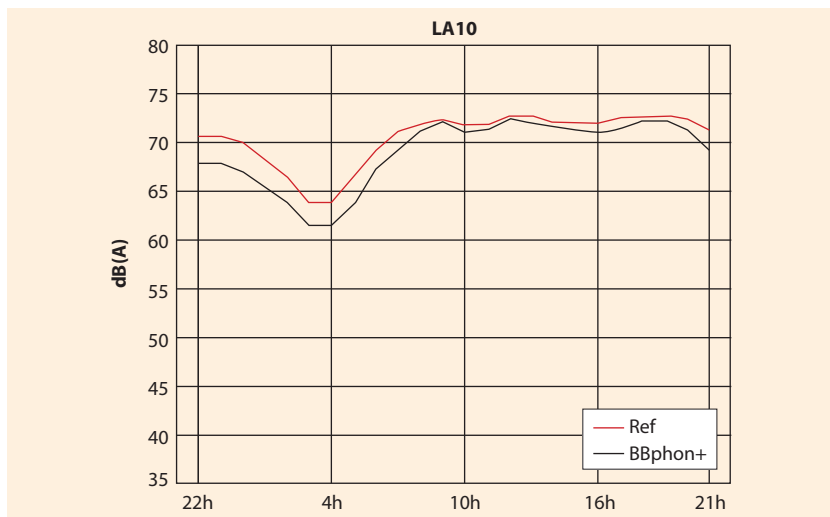
Comparaison des niveaux de bruit de roulement à l'état zéro en façade des immeubles au droit des revêtements innovants par rapport à l'existant avant travaux et par rapport aux revêtements classiques après travaux.

Bruit de roulement LA10 22h-6h en dB(A)	Par rapport à l'existant	Par rapport à la référence
Objectifs du projet après pose	- 3	- 2
Rue Frémicourt (SMaphon)	- 4,3*	- 2,3
Rue Lecourbe (Puma)	- 1,2*	0
Rue de Courcelles (BBphon+)	- 3,5*	- 2,8

* Correction de la température.

-Figure 2-

Niveaux sonores horaires moyens en façade d'habitations rue de Courcelles ; comparaison revêtement de référence / revêtement innovant ; indicateur LA10.



-Photo 5-

Circulation diurne sur le SMaphon rue Frémicourt.



Pour le Puma, l'absence de réduction par rapport au revêtement de référence s'explique par une référence non représentative de la réalité et favorable en terme de mesures acoustiques. Des travaux de réfection sur l'asphalte de référence sont prévus en 2020. Une évaluation des performances acoustiques sera produite au terme de ces travaux.

Ces réductions sont clairement observables lors du passage des véhicules isolés, la nuit, lorsque les vitesses de circulation routière sont relativement plus élevées et les autres sources de bruit en présence réduites (travaux, activité humaine...).

Ainsi, l'indicateur LA10 22h-6h reflète clairement la réduction associée au bruit de roulement (figure 2). Par rapport au revêtement initial :

- La réduction du bruit de roulement est comprise entre - 3,5 à - 4,3 dB(A) pour le SMaphon et le BBphon+ lors du passage de véhicules isolés la nuit. La réduction est d'environ - 1 dB(A) pour le Puma.
- Ces réductions se traduisent également sur les niveaux sonores moyens toutes sources confondues en période nocturne (22h-6h), avec des diminutions comprises entre - 3,0 et - 3,7 dB(A) pour le SMaphon et le BBphon+ et - 1,4 dB(A) pour le Puma.

Par rapport au revêtement de référence :

- Sur la période nocturne, plus propice à l'évaluation du bruit routier, une réduction de - 2,3 à - 2,8 dB(A) du bruit de roulement associé aux passages de véhicules isolés est observée pour le BBphon+ et le SMaphon. Aucune réduction n'est observée pour l'instant pour le Puma.
- Ces réductions se traduisent également sur les niveaux sonores moyens sources confondues en période nocturne (22h-6h), avec des diminutions comprises entre - 1,1 et - 1,4 dB(A) pour le SMaphon et le BBphon+.

Pour la période diurne (6h-22h), les indicateurs acoustiques montrent un bénéfice réduit, voire nul. En effet, sur cette période, les vitesses de circulation routière plus faibles engendrent une prédominance de la composante « bruit moteur » et d'autres sources de bruit sont particulièrement présentes (travaux, activité humaine...) (photo 5). Toutefois, la capacité de distinction des sources de bruit par l'oreille humaine peut contribuer à ressentir le bénéfice apporté par les revêtements innovants. Une enquête a été menée in situ auprès des usagers et riverains de la rue Frémicourt en octobre 2019 afin d'apporter des éléments de réponse à cette question. Le bilan présenté plus loin dans cet article est plutôt positif.

IMPACT THERMIQUE ET MICROCLIMATIQUE

Les campagnes d'arrosage ont eu lieu entre début juin et mi-septembre 2019. Elles ont été déclenchées comme prévu lorsque certains critères météorologiques ont été réunis (tableau 3), assouplis par rapport à une alerte canicule parisienne.

-Tableau 3-

Conditions météorologiques de déclenchement de l'arrosage.

Température min. moyennes sur 3 jours	Température max. moyennes sur 3 jours	Vent	Couverture nuageuse
16 °C	25 °C	< 10 km/h	Ensoleillé (< 3octas)

Les trois sites sont découpés en plusieurs portions qui ne sont pas toutes arrosées et qui se différencient par leurs revêtements. Ainsi, seule la portion témoin (revêtement d'origine) n'est pas arrosée. Elle permet d'effectuer une comparaison avec les portions innovantes (nouveau revêtement) et de référence (revêtement classique remis à neuf).

L'arrosage se déroule de la façon suivante :

- un passage toutes les 1 h 30 de 7 h à 11 h 30 et un passage toutes les 30 minutes de 14 h à 18 h 30 pour la rue de Courcelles ;
- un passage toutes les 1 h 30 de 7 h à 11 h 30 et un passage toutes les 45 minutes de 14 h à 18 h 30 pour les rues Frémicourt et Lecourbe, les contraintes de ces sites rendant impossible une fréquence de 30 minutes.

L'été 2019 a été marqué par trois périodes de forte chaleur qui ont permis de réaliser 12 jours d'arrosage.

Afin d'isoler l'impact de l'arrosage, les journées arrosées sont ensuite comparées à des journées de référence (sans arrosage) dont les conditions météorologiques sont similaires à celles du tableau 3. Une dizaine de jours de référence environ ont été identifiés pour chacun des sites.

ANALYSE MICROCLIMATIQUE

La méthode utilisée pour l'analyse microclimatique consiste à s'intéresser aux différences inter-stations préexistantes et à leur évolution lors des journées avec arrosage⁷⁻⁹. Pour ce faire, on considère la différence entre la station d'étude (innovante ou de référence) et la station témoin d'abord sans arrosage, puis avec arrosage. Ces différences inter-stations « arrosée » et « non arrosée » aident à s'affranchir des différences préexistantes entre les stations de mesure d'un même site.

Un test statistique est réalisé sur ces profils afin d'évaluer la robustesse des résultats obtenus, avec un seuil de significativité de 95 %.

Le **tableau 4** réunit les résultats obtenus grâce au test statistique effectué pour les trois sites expérimentaux.

De manière générale, on observe un impact positif de l'arrosage. En effet, les campagnes d'arrosage tendent à réduire la température de l'air d'environ 1 °C en effet maximum et d'environ 0,4 °C en moyenne. Le stress thermique subi par les piétons est également réduit : entre 1,9 °C et 3,6 °C en effet maximum, et de 0,4 °C à 0,8 °C en moyenne en fonction des sites.

Pour comparaison, des campagnes d'arrosage ont été menées par la Ville de Paris entre 2013 et 2018 sur un revêtement classique rue du Louvre. Ces campagnes ont eu pour résultat une réduction de la température de l'air d'environ 1 °C en effet maximum et 0,3 °C en moyenne. La température équivalente UTCL a quant à elle été réduite d'environ 2 °C au maximum et d'environ 0,4 °C en moyenne¹⁰.

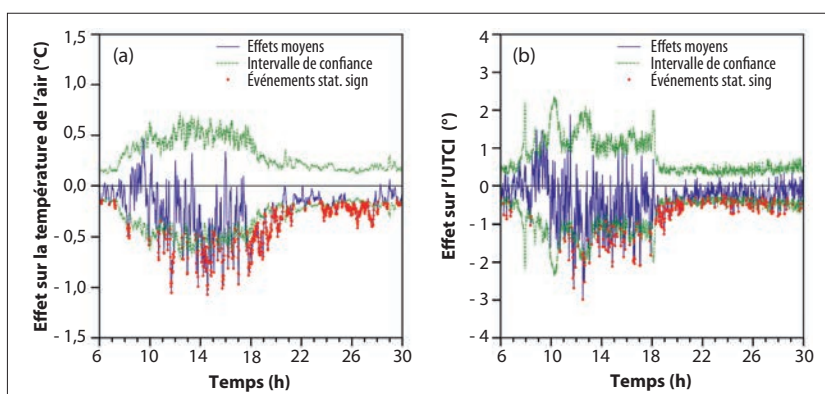
–**Tableau 4**–

Effets maximaux et moyens de l'arrosage pour chaque site à 1,5 mètre de hauteur pour la température de l'air (Ta) et la température équivalente-UTCL (UTCL).

Site	Rue Frémicourt		Rue Lecourbe				Rue de Courcelles			
	Innovant		Innovant		Référence		Innovant		Référence	
Paramètre	Ta	UTCL	Ta	UTCL	Ta	UTCL	Ta	UTCL	Ta	UTCL
Effet maximal (°C)	- 1,1	- 3,0	- 0,8	- 1,9	- 1,0	- 2,0	- 1,1	- 2,9	- 1,2	- 3,6
Effet moyen (°C)	- 0,4	- 0,8	- 0,4	- 0,4	- 0,4	- 0,5	- 0,4	- 0,6	- 0,4	- 0,6

–**Figure 3**–

Effet de l'arrosage sur la température de l'air (a) et la température équivalente-UTCL (b) de la zone innovante de la rue Frémicourt. Les effets de l'arrosage sont représentés en bleu, l'intervalle de confiance en vert et les événements statistiquement significatifs en rouge.



Ainsi, concernant la température de l'air, on obtient quasiment les mêmes résultats, contrairement à ceux de l'UTCL, qui se révèlent être légèrement plus élevés.

La **figure 3** illustre directement les effets moyens de l'arrosage (courbe bleue) sur la température de l'air (figure 3a) et sur l'UTCL (figure 3b). Seul l'impact de l'arrosage de la zone innovante de la rue Frémicourt est présenté ci-après.

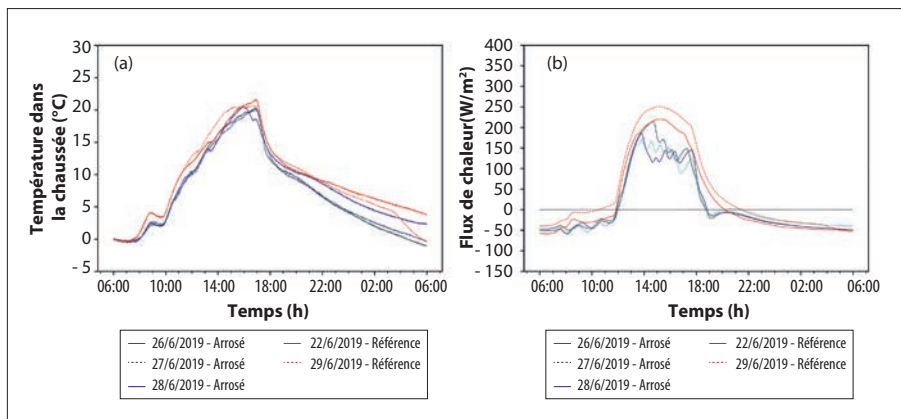
ANALYSE THERMIQUE

Les capteurs installés à une profondeur de 5 cm dans les chaussées mesurent à la fois la température et la transmission de chaleur par le revêtement. Avec la mesure de la température à -5 cm, on s'intéresse à l'amplitude de la température (différence entre les températures minimale et maximale) lors des jours de référence, puis à son évolution durant les jours avec arrosage. Le flux de chaleur permet d'étudier le temps de séchage des matériaux innovants et de référence. En effet, l'arrosage affecte directement ce paramètre en le réduisant fortement. Une fois le revêtement sec, le flux de chaleur augmente à nouveau.

Les **figures 4a et 4b** représentent respectivement l'évolution de la température et l'évolution du flux de chaleur sur 24 heures de la portion innovante rue Lecourbe. Par souci de lisibilité, seule la première campagne d'arrosage est représentée, mais le **tableau 5** synthétise la totalité des campagnes pour les rues Lecourbe et de Courcelles. Le capteur rue Frémicourt ayant été endommagé, aucune donnée n'est disponible pour l'été 2019 pour ce site.

—Figure 4—

Température à 5 cm de profondeur (a) et flux de chaleur (b) dans la chaussée innovante rue Lecourbe pour la première campagne d'arrosage et les jours de référence associés.



—Tableau 5—

Amplitudes moyennes des températures à - 5 cm et temps de séchage entre 13 h 30 et 17 h.

Site	Rue Lecourbe		Rue de Courcelles	
	Innovant	Référence	Innovant	Référence
Amplitude moyenne avec arrosage	20,2 °C	13,6 °C	13,5 °C	10,0 °C
Amplitude moyenne sans arrosage	21,4 °C	16,3 °C	17,8 °C	11,6 °C
Temps de séchage	22 min	19 min	29 min	26 min

Comités de suivi et communication

Le projet est suivi par un comité scientifique (COSCI) et un comité de parties prenantes (ou *stake holders* – COSTA).

Le COSCI est composé d'experts techniques et scientifiques chargés de donner des avis, conseils et recommandations relevant de leurs compétences. Ce comité garantit l'intérêt et l'appropriation des connaissances générées par le projet au bénéfice de la communauté scientifique et technique. Les principaux organismes représentés au COSCI sont le Centre de recherche routière belge (CRR ou BRRC), le Cerema de Nantes, le Conseil national du bruit, l'Iddrim, l'université Gustave Eiffel (anciennement Ifsttar), Météo France et l'Université de Paris.

Au sein du COSTA, qui garantit une large diffusion des résultats et intervient aux côtés des partenaires du projet sur des questions liées à la dissémination et à la répliquabilité, on compte, parmi les institutions qui suivent le projet : Acoucté, l'Ademe Île-de-France, l'Agence parisienne du climat, l'Agence de protection de l'environnement de Rotterdam (DCMR), Bruxelles Environnement, l'Eurocities Working Group Noise, la Métropole Européenne de Lille, la Métropole du Grand Paris, l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC), la Ville de Florence, la Ville de Madrid, la Ville de Turin.

Les membres du COSCI et du COSTA sont invités chaque année à un rendez-vous d'information et d'échange sur l'avancement du projet. Le dernier s'est tenu le 18 octobre 2019 à la Maison des acteurs du Paris durable, dans le XIV^e arrondissement de Paris. Les conférences des partenaires et la séance d'échange ont été suivies par une visite du site de la rue de Courcelles dans le VIII^e arrondissement, les sites des rues Frémicourt et Lecourbe ayant été visités lors de la journée précédente, en octobre 2018. Cette journée a fait l'objet d'un résumé vidéo disponible sur le site internet du projet : <https://www.life-asphalt.eu/actus/>. Les principaux intéressés que sont les riverains des sites pilotes et, plus largement, la population parisienne ne sont pas oubliés : des actions de communication et d'information sont menées régulièrement par les médias régionaux, par voie d'affichage sur les sites ou de distribution de feuillets d'information dans les boîtes aux lettres. En complément, il est prévu d'organiser en 2020 des actions plus spécifiquement à l'attention des enfants via les écoles ou les centres de loisirs.

Enfin, plusieurs articles scientifiques et professionnels ont été publiés. Les principaux sont mentionnés dans les références bibliographiques.

En étudiant les flux de chaleur sur la figure 4b, les périodes d'arrosage sont repérables facilement, comme expliqué précédemment. Ainsi, chaque pic illustre le moment où la chaussée est arrosée. À l'inverse, lorsque le flux augmente à nouveau, la chaussée est sèche et recommence à chauffer. On peut en déduire les temps de séchage approximatifs.

Le tableau 5 montre que les amplitudes tendent à être réduites en cas d'arrosage, phénomène observable également sur la figure 4a. L'arrosage semble aider les matériaux à stocker moins de chaleur. On remarque également que les revêtements innovants sèchent plus lentement que leurs références. L'écart reste faible, mais devrait évoluer positivement grâce à l'usure superficielle, qui facilite l'accès à la porosité en surface du matériau, grâce à laquelle il pourra mieux retenir l'eau et ainsi optimiser l'effet de l'évaporation.

PREMIERS RÉSULTATS D'UNE ENQUÊTE DE PROXIMITÉ

Une enquête de satisfaction portant sur le ressenti du bruit routier a été mise en œuvre in situ en octobre 2019 auprès des usagers et riverains de la rue Frémicourt. Le questionnaire est également disponible sur la plate-forme internet dédiée au projet Life Cool & Low Noise Asphalt pour l'ensemble des sites pilotes. Un premier bilan des résultats de cette enquête, dressé en mars 2020, est plutôt positif.

Depuis le changement du revêtement de chaussée au dernier trimestre 2018, 63 % des personnes interrogées ont noté une diminution du bruit routier. Parmi elles :

- 32,4 % jugent cette réduction faible, 44,1 % moyenne et 23,5 % importante.
- 82,4 % attribuent cette réduction à la composante « Bruit de roulement (pneumatique/chaussée) » et 5,9 % à la composante « Bruit mécanique/moteur ».

L'exploitation des réponses à la question libre « Pouvez-vous décrire en quelques mots ce qui a changé selon vous ? » met en valeur l'effet positif du revêtement de chaussée dans 35,3 % des réponses et un effet positif la nuit dans 11,8 % des réponses pour le groupe de personnes ayant noté une diminution du bruit routier.

En analysant les réponses du groupe de personnes n'ayant pas noté de diminution du bruit routier, on peut identifier les motifs d'insatisfaction. Le premier argument correspond à l'augmentation du trafic, des sirènes et des avertisseurs sonores (30 % des réponses). Les travaux sont également mis en avant dans 10 % des réponses d'insatisfaction. Ces éléments qualitatifs complémentaires en termes de ressenti enrichissent l'évaluation du projet.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Plus de deux ans après son lancement en 2017, le projet Life Cool & Low Noise Asphalt piloté par la Ville de Paris a donné l'opportunité aux entreprises Colas et Eurovia de formuler des revêtements innovants destinés à contribuer à l'abaissement des nuisances sonores et des effets des pics de chaleur en ville. Ces revêtements ont été mis en place sur trois sites pilotes de la Ville de Paris, où leur comportement fait l'objet d'un suivi scientifique.

La tenue des revêtements 18 mois après la pose est satisfaisante.

La réduction du bruit à la source a été mesurée par le laboratoire de l'espace public de la Ville de Paris après quelques mois et donne satisfaction jusqu'à présent. Les effets sur le bruit ambiant sont plus difficiles à quantifier, mais Bruitparif a pu vérifier l'efficacité des produits innovants sur le bruit de roulement généré par le trafic en période nocturne, plus favorable à une circulation fluide et à l'absence d'autres sources sonores.

En ce qui concerne la réduction de la température dans la chaussée et le ressenti au niveau des piétons, le LIED a montré l'efficacité des opérations d'aspersion de la chaussée, dans la continuité des expérimentations précédentes menées à plus petite échelle. L'évaluation de l'impact des revêtements innovants sur ces différents paramètres sera poursuivie en 2020 et jusqu'en 2022. Si les résultats sont satisfaisants, un suivi pourra être programmé jusqu'en 2027 afin d'évaluer la pérennité des bénéfices obtenus.

Suite à ces premiers résultats satisfaisants, la Ville de Paris a d'ores et déjà intégré ces produits innovants dans son marché d'entretien des couches de roulement pour permettre leur utilisation sur l'ensemble du territoire parisien. ■

RÉFÉRENCES

1. E. Godard, O. Chrétien, K. Ibtaten, A. Lemée, J. Lefebvre, L. Grin, C. Ribeiro, S. Parison, « Cool & Low Noise Asphalt : des revêtements innovants pour l'environnement à Paris », RGRA n° 960, pp. 66-73, février 2019.
2. E. Godard, O. Chrétien, J. Lefebvre, M. Sineau, L. Grin, C. Ribeiro, "Life Project: Cool & Low Noise Asphalt Project in Paris", Proceedings of 26th World Road Congress, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2019.
3. E. Godard, O. Chrétien, J. Lefebvre, M. Sineau, L. Grin, "Cool & Low Noise Asphalt Project in Paris", Proceedings of E&E 2020, Madrid, Spain, 2021.
4. C. Ribeiro, F. Mietlicki, M. Sineau, J. Lefebvre, K. Ibtaten, "Monitoring the acoustic performance of low-noise pavements", Proceedings of Euronoise 2018, Heraklion, Crete, 2018.
5. C. Ribeiro, J. Lefebvre, K. Ibtaten, F. Mietlicki, M. Sineau, « Suivi des performances acoustiques de revêtements de chaussées peu bruyants », Proceedings of CFA 2018, Le Havre, France, 2018.
6. C. Ribeiro, J. Lefebvre, K. Ibtaten, F. Mietlicki, M. Sineau, "Monitoring the acoustic performance of low-noise pavements", Proceedings of CFA 2020, Lyon, France, 2020.
7. S. Parison, M. Hendel, J. Royon, "In situ assessment of cooling effects of pavement-watering: application to Cool & Low Noise Asphalt", Proceedings of IC2UHI 2019, Hyderabad, India, 2019.
8. S. Parison, M. Hendel, A. Grados, J. Royon, « Comportement thermique de revêtements innovants à Paris pour le projet Cool & Low Noise Asphalt », Proceedings of CIFQ 2019, Québec, Canada, 2019.
9. S. Parison, M. Hendel, and L. Royon, "An Updated Method for Quantifying the Field Effects of Urban Heat Island Mitigation Techniques", Urban Climate (under review).
10. M. Hendel, P. Gutierrez, M. Colombert, Y. Diab, and L. Royon, "Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques in the field: Application to the case of pavement-watering in Paris", Urban Climate, 2016.