

1. Détail de l'inventaire des procédés

1.1. CENTRALE D'ENROBAGE

La centrale d'enrobage consomme des granulats et du bitume afin de produire des agrégats d'enrobés. Ce procédé consomme une grande quantité d'énergie (généralement du gaz) pour chauffer le bitume et permettre le malaxage avec les granulats. Les tuyauteries transportant le bitume doivent également être chauffées pour conserver une fluidité suffisante du bitume. De l'électricité est également consommée par le séchoir en fonction du taux d'humidité des granulats. Le procédé de la centrale d'enrobage est construit pour fournir 1 m² de surface de chaussée.

La Figure 1 présente une centrale d'enrobage mobile mise en place pour un chantier dans l'Aisne :

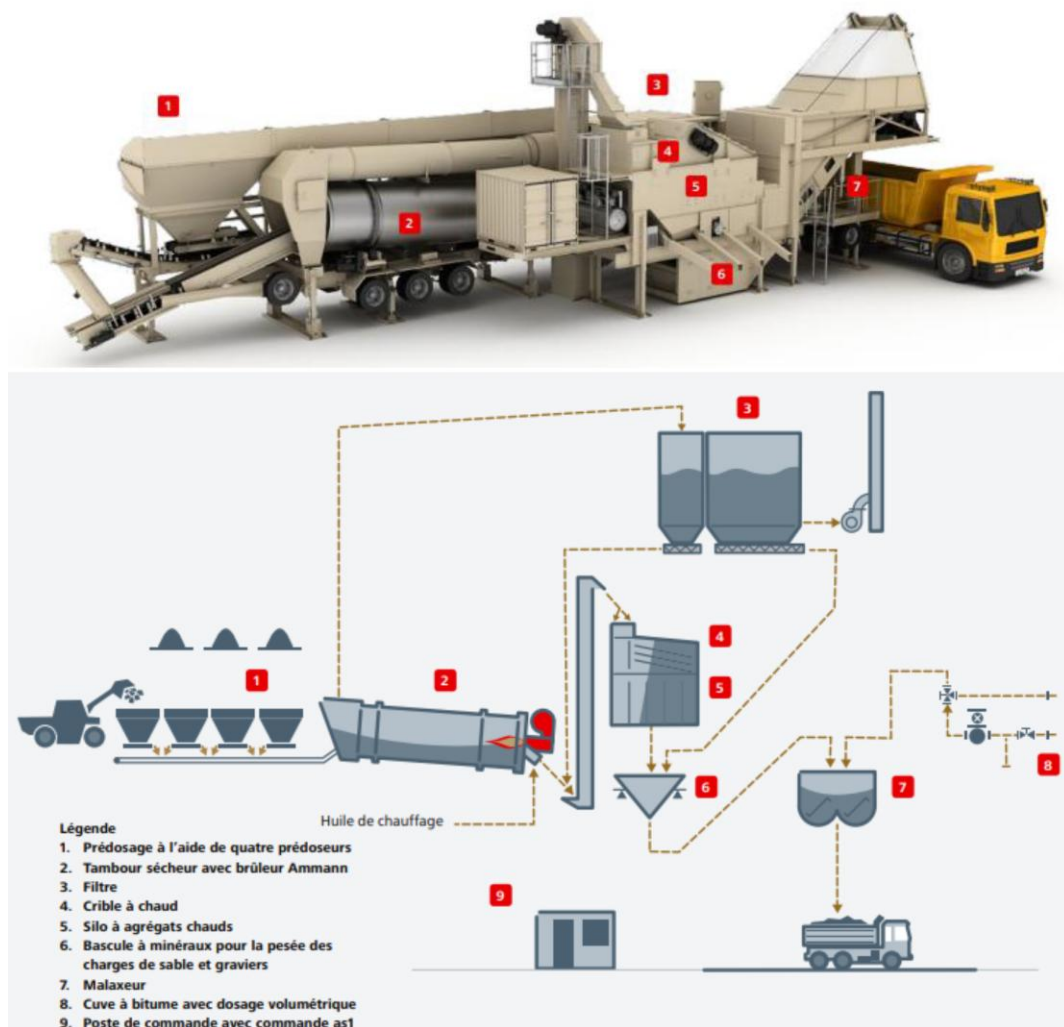


Figure 1 - Schéma de principe d'une centrale d'enrobage à chaud mobile – Source : GUI'S'ENROBE

Pour déterminer les consommations énergétiques de la centrale, les données issues des travaux (Jullien et al. 2006a) sur le chantier de la RN 76 sont exploitées. Pour un taux de recyclage de 0%, la consommation de gaz naturel est de 5.84 Nm³/t. Le Nm³ étant l'unité de volume ramenée aux conditions normales de température (0°C) et de pression (1,014 mbars).

Pour la consommation d'électricité, ces mêmes travaux donnent pour un taux de recyclage toujours égal à 0% une consommation de 140 kWh pour 100 tonnes d'agrégats d'enrobés.

Les émissions dans l'air des gaz suivants sont également extrait de ces mêmes travaux : Phénanthrène, Pyrène, benzo(a)anthracène, Chrysène, Fluoranthène.

1.2. GRANULATS

Pour la production de granulats, le procédé de EcolInvent « *market for gravel, crushed / CH* » a été utilisé sans modification. Le procédé EcolInvent inclut le transport et la production des granulats. Seule la quantité de granulats consommée dans le procédé de la centrale d'enrobage doit être adaptée en fonction de la structure de chaussée à construire.

1.3. BITUME

La fourniture du bitume est dérivée du procédé EcolInvent « *market for pitch / Europe without Switzerland* ». Le transport du bitume a été adapté pour inclure uniquement le fret par camion afin de s'adapter au contexte français.

1.4. CHARGEUSE

Le procédé de la centrale d'enrobage nécessite une chargeuse (cf. Figure 1). L'utilisation d'une chargeuse est modélisée par le procédé EcolInvent « *excavation, skid-steer loader - / RER* » dont le flux de référence est un volume en m³. Le volume nécessaire doit donc être adapté en fonction de la structure de la chaussée. La consommation de la chargeuse en kg de diesel a été adaptée en fonction des données relevées lors des travaux sur la RN76 (Jullien et al. 2006a) qui rapportent une consommation de 11 L/h pour une chargeuse.

Tableau 1 - Consommations de chargeuses

| Type / Modèle | Diesel (L/h) | Sources | Remarques |
|--|--------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Non spécifié | 11.0 | Jullien et al. (2006a) | |
| Moyenne : CAT 226B, Gehl V420, Bobcat S850 | 3.8 – 37.8 | Speceps (2022) | |
| Non spécifié | 26.5 | Zapata et Gambatese (2005) | Donnée chantier réel (contexte US) |
| Bobcat S130 | 6.8 | Bobcat (2008) | |
| Bobcat S205 | 12.9 | Heavy Equipment Forums (2013) | |
| CAT 226B | 37.5 | Speceps (2022) | |

D'après les travaux de l'IFSTAR (2013), une centrale d'enrobés produit en moyenne 129 tonnes par heure. Ainsi, pour produire 0.5875 tonne d'enrobés — quantité nécessaire pour 1 m² de chaussée de type GB3/GB3 (classe TC4₂₀), soit environ 0.25 m³ de granulats — le temps de fonctionnement de la chargeuse est estimé à 0.00455 h (soit environ 16,4 secondes).

En supposant une consommation horaire de 11 litres de gasoil, la consommation pour cette durée est de 0.050 L. En prenant une masse volumique moyenne du gasoil de 0.83 kg/L (source : Total Energies), cela correspond à une masse de carburant consommé de 0.0415 kg.

Ramené au mètre cube, cela représente une consommation de 0.166 kg de diesel par m³ de chaussée. Cette valeur est légèrement supérieure à celle proposée dans la base EcoInvent (0.13 kg/m³), ce qui peut s'expliquer par des différences de contexte opérationnel ou de périmètre de modélisation.

1.5. TRANSPORT DES AGREGATS D'ENROBES

En sortie de centrale, les agrégats doivent être transporté jusqu'au chantier. Le transport est modélisé par le procédé « *market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | RER* ». Ce procédé est modélisé par un flux de référence en t.km. Dans notre cas, il est calculé en multipliant la distance entre la centrale d'enrobage et le chantier (le retour se faisant à vide) par la quantité d'agrégats d'enrobés nécessaire pour produire 1 m² de chaussée.

Le camion choisi est 16-32 tonnes car en contexte urbains ils sont plus faciles à manœuvrer et donc plus réaliste comme hypothèse.

La distance moyenne entre une centrale et un chantier est de 20 km d'après les FDES de Routes de France. Donc 40 km multiplié par 0.6168 t donne environ 24.7 t.km.

1.6. FINISSEUR

L'application des couches successives d'enrobés bitumineux se fait grâce à un finisseur. Cet engin n'existant pas dans la base de données EcoInvent, il a été créé en modifiant le procédé correspondant à la chargeuse (« *excavation, skid-steer loader | RER* »).

Les consommations et les temps de mise en œuvre sont issus des travaux sur la RN76 par (Jullien et al. 2006a). En prenant l'hypothèse que la mise en œuvre prend le même temps quelle que soit l'épaisseur de chaussée, on considère que la réalisation de 2,280 m² se fait en 3h20. En fonction du nombre de couches à réaliser on multipliera le temps par le nombre de couches. En connaissant l'épaisseur mise en œuvre, le volume traité par le finisseur peut être déduit et permet alors de renseigner son flux de référence.

Un finisseur consomme deux types de carburants. Du gasoil pour se mouvoir et du propane pour chauffer les agrégats et permettre leur répardage. Les consommations extraites des travaux menés sur la RN 76 rapportent des consommations de 30 L/h de gasoil et de 50.4 L/h de propane. Le propane est converti en MJ consommé par le procédé « *market for propane, burned in building machine | GLO* ». Le rapport entre litre de propane et MJ est de 1L pour 25.59 MJ (Ministry of Finance - British Columbia 2013).

Tableau 2 - Consommations des finisseurs

| Type / Modèle | Diesel (L/h) | Propane (L/h) | Sources | Remarques |
|---------------|--------------|---------------|---------|-----------|
|---------------|--------------|---------------|---------|-----------|

| | | | | |
|--------------|-------------|------|----------------------------|------------------|
| Non spécifié | 30.0 | 50.4 | Jullien et al. (2006a) | Gasoil + propane |
| CAT AP600F | 11.4 – 17.0 | – | Ezyquip (2020) | |
| CAT AP1000F | 15.1 – 18.9 | – | Ezyquip (2020b) | |
| Vögele-2100 | 25.9 | – | Xie et al. (2021) | |
| Non spécifié | 15.1 | – | Zapata et Gambatese (2005) | |

La consommation de carburants associée à l'application de l'enrobé a été estimée à partir des mesures publiées par Jullien et al. (2006a). Pour le diesel, le finisseur consomme environ 30 L/h. L'application d'une plaque de 2,280 m² requiert 50 minutes, soit une consommation de 25 L. Cela correspond à 0,011 L de diesel par m², soit 0.0091 kg en considérant une masse volumique de 0.83 kg/L. Sur trois couches d'enrobé, cela représente 0.027 kg/m², soit 0.109 kg/m³ rapporté au volume de chaussée (hypothèse de 0.25 m³/m²).

Concernant le propane, la consommation est estimée à 50.4 L/h, soit 42 L pour une plaque de 2,280 m². Cela correspond à 0.0184 L/m²/couche, soit 0.471 MJ/m² en considérant un pouvoir calorifique inférieur de 25.59 MJ/L. Pour trois couches, la consommation atteint 1.414 MJ/m², soit 5.656 MJ/m³.

1.7. REPANDEUSE OU PATA

A l'interface entre chaque couche, une colle est nécessaire, celle-ci est (dans le cas des chaussées bitumineuses) sous forme de bitume pur répandu par une répandeuse. Le procédé n'existant pas dans la base Ecolvent, il a de nouveau été créé en modifiant le procédé correspondant à la chargeuse (« *excavation, skid-steer loader / RER* ») et en y ajoutant une consommation de propane à l'instant du finisseur. D'après les données relevées par (Jullien et al. 2006a), la répandeuse peut répandre du bitume sur 570 m² en 5 minute et consomme 10 L/h de gasoil et 4.2L/h de propane. Comme pour le finisseur, le rapport entre volume de propane et MJ se fait grâce aux données fournies par le Ministère des Finances de la Colombie Britannique (Ministry of Finance - British Columbia (CA), « Conversion Factors for Fuel », mai 2013).

Tableau 3 - Consommations des répandeuses (PATA)

| Type / Modèle | Diesel (L/h) | Propane (L/h) | Sources |
|---------------|--------------|---------------|----------------------------|
| Non spécifié | 10,0 | 4,2 | Jullien et al. (2006a) |
| Non spécifié | 26,5 | – | Zapata et Gambatese (2005) |
| Non spécifié | 6 – 8 | | Scribd |

L'application des couches de collage entre les matériaux GB3/GB3 et GB3/BBSG dans la structure TC420 est associée à des consommations spécifiques de carburants. La surface traitée est estimée à 3,420 m²/h, avec une consommation de 10 L/h de diesel et 4.2 L/h de propane (Jullien et al. 2006a).

Cela correspond à une consommation de 0.00292 L de diesel/m², soit 0.00242 kg/m² (en supposant une masse volumique de 0.83 kg/L). En tenant compte d'un volume traité de 0.19 m³/m² (deux interfaces collées), cela équivaut à 0.0127 kg de diesel/m³.

Pour le propane, la consommation est de 0.00123 L/m², soit 0.0315 MJ/m² (à partir d'un pouvoir calorifique inférieur de 25.59 MJ/L). Rapportée au m³, cette consommation correspond à 0.166 MJ/m³.

1.8. COMPACTEURS

Deux types de compacteurs sont considérés. Un compacteur à pneus pour les couches inférieures et un compacteur vibrant pour la couche de roulement. Ces deux procédés sont modélisés distinctement à partir du procédé de chargeuse (« *excavation, skid-steer loader | RER | ecoinvent-391-cutoff* »).

Le temps de fonctionnement de ces engins est déduit grâce aux avis technique produits pour les outils spécialisés en ACV des chaussées (ECORCE et SEVE)(IDRRIM 2013a; 2013b). On relève un temps d'exécution pour compacter les couches inférieures de 1,5 jour pour 500 m² et de 1 jour pour la couche de roulement. La consommation des engins est tirée des mesures effectués sur le chantier de la RN 76 (Jullien et al. 2006a). La consommation de gasoil du compacteur à pneu est estimée à 8.6 L/h et celle du compacteur vibrant à 6 L/h.

Tableau 4 - Consommations des compacteurs

| Type / Modèle | Diesel (L/h) | Sources |
|----------------------------|--------------|----------------------------|
| Non spécifié | 8.6 | Jullien et al. (2006a) |
| Non spécifié | 6.0 | Jullien et al. (2006a) |
| Dynapac CC6200 (acier) | 17.9 | Xie et al. (2021) |
| HAMM HD138 (acier) | 17.0 | Xie et al. (2021) |
| XCMG XP303 (pneumatique) | 20.0 | Xie et al. (2021) |
| XCMG XP262 (pneumatique) | 17.9 | Xie et al. (2021) |
| BOMAG AD203 (double acier) | 4.2 | Xie et al. (2021) |
| Non spécifié | 17.0 | Zapata et Gambatese (2005) |

L'étape de compactage est assurée par deux types d'engins distincts : un compacteur tandem, utilisé pour la couche de surface (BBSG), et un compacteur à pneus, utilisé pour les couches intermédiaires et de base en GB3. Les temps de passage et les consommations ont été estimés à partir des avis

techniques des outils ECORCE et SEVE, adaptés aux contextes urbains et confirmés par les données de (Jullien et al. 2006a).

Pour le compacteur tandem, le temps de passage est estimé à 0.035 h/m^2 , avec une consommation horaire moyenne de 6 L/h , soit $0.21 \text{ L de diesel/m}^2$. Cette valeur correspond à 0.174 kg/m^2 (en prenant une densité de 0.83 kg/L). La couche concernée ayant un volume de $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^2$, cela représente une consommation de $2.91 \text{ kg de diesel par m}^3$.

La consommation d'eau associée au compacteur tandem est estimée à 500 L pour 500 m^2 sur 17.5 h , soit 1 L/m^2 , équivalant à 16.7 L/m^3 pour la couche supérieure.

Pour le compacteur à pneus, également mobilisé pendant 0.035 h/m^2 , la consommation de carburant est estimée à 12.2 L/h , soit 0.427 L/m^2 ou $0,354 \text{ kg/m}^2$. Rapportée au volume de matériaux traités ($0.19 \text{ m}^3/\text{m}^2$), cela correspond à une consommation de $1.87 \text{ kg de diesel par m}^3$.

1.9. FRAISEUSE, RABOTEUSE

La fraiseuse ou la raboteuse est modélisée en reprenant le procédé de chargeuse (« *excavation, skid-steer loader / RER* ») et en adaptant les consommations de carburants ainsi qu'en ajoutant une consommation d'eau nécessaire à cette opération.

Le temps de fonctionnement et les consommations associées sont déduits des travaux de (Jullien et al. 2006a). 350 L de gasoil sont consommés en $3\text{h}49$ de travail ainsi que $4,800 \text{ L}$ d'eau sur la même durée et la surface traitée sur cette période est de $2,280 \text{ m}^2$.

D'autres sources sur ce type d'engins n'ont pas été trouvées. Seules des indications sur le volume du réservoir ($1,108 \text{ L}$) ou sur la vitesse d'avancement (5.9 km/h) de certaines machines (PM620 - CAT) ont pu être identifiées sans que cela permette de calculer une consommation à l'heure.

Le rabotage des couches supérieures de la chaussée (épaisseur totale : 10 cm) est estimé à partir de mesures issues d'un relevé de terrain étudiant. Sur une section de $600 \text{ m} \times 3.8 \text{ m}$ (soit $2,280 \text{ m}^2$), l'opération a duré $3 \text{ h } 49 \text{ min}$, avec une consommation de 350 L de diesel et $4,800 \text{ L}$ d'eau.

Cela correspond à une consommation horaire de 91.7 L/h de diesel et $1,257.6 \text{ L/h}$ d'eau. À l'échelle d' 1 m^2 , cela représente une consommation de 0.1535 L de diesel, soit 0.1274 kg (avec une densité de 0.83 kg/L), pour un volume raboté de $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Cela équivaut à $1.27 \text{ kg de diesel par m}^3$ de chaussée rabotée.

La consommation d'eau est estimée à $2,105 \text{ L/m}^2$, soit 21.05 L/m^3 . Ces valeurs sont intégrées dans le modèle ACV pour représenter les impacts associés à la phase de démolition partielle des couches superficielles.

1.10. BALAYEUSE

La création du procédé balayeuse est modélisé sur le même principe que la fraiseuse/raboteuse mais les consommations sont issues des travaux de (Jullien et al. 2006a).

La balayeuse traite $2,280\text{m}^2$ en 7 h et consomme 75 L de gasoil pour le camion en lui-même, 40 L de gasoil pour le fonctionnement des moteurs balais et $2,000 \text{ L}$ d'eau.

Tableau 5 - Consommations balayeuses

| Type / Modèle | Diesel (L/h) | Sources | Remarques |
|---------------|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| Non spécifié | 16.4 (75L+40L / 7h) | Jullien et al. (2006a) | Camion + moteurs balais |
| Moyenne | 15.0 | Perucca et al. (2022) | |
| Non spécifié | 17.0 | Zapata et Gambatese (2005) | |

Le nettoyage final de la chaussée est modélisé à partir d'une intervention sur 2,280 m² réalisée en 7 heures (1 journée de travail). Les consommations correspondantes sont de 75 L de diesel pour le camion, 40 L pour les balais mécaniques, et 2,000 L d'eau, soit respectivement 115 L de diesel et 2,000 L d'eau pour l'ensemble de l'intervention.

Ces consommations sont ramenées à l'unité de surface puis converties à l'échelle volumique. La consommation de diesel est de 0.0504 L/m², soit 0.04186 kg/m² (avec une densité de 0.83 kg/L), ce qui correspond à 0.698 kg/m³ de chaussée traitée (pour un volume de 0.06 m³/m²). La consommation d'eau atteint 0.8772 L/m², soit 14.62 L/m³.

1.11. TRANSPORT DES ENGINS DE CHANTIERS

Le transport des engins de chantier sur le site de construction est également pris en compte. Le même procédé que pour le transport des granulats : « *market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | RER | ecoinvent-391-cutoff* » est exploité. Chaque engin de chantier utilisé est déplacé sur 285 km (Jullien et al. 2006b). Des hypothèses sur les machines utilisées sont prises en considérant qu'elles doivent pouvoir être transportées en restant sous la charge utile des camions modélisés dans le procédé « *market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | RER | ecoinvent-391-cutoff* ». Les valeurs suivantes sont déduites : compacteur 14.68 t, finisseur 13.6 t (moyenne sur 11 finisseurs différents de la même marque), compacteur tandem 9,56 t. Soit, 0.359 t.km pour 1 m² de route à construire.

2. Bibliographie

- BM FRANCE. s. d. *PM620* / *BM FRANCE*. Consulté le 30 mai 2025. <https://bm-cat.com/fr/product/pm620/>.
- Bobcat. 2008. *Bobcat S130 Skid-Steer Loader Specifications March 11, 2008*.
- Ezyquip. 2020a. *AP600F Asphalt Paver - Ezyquip Hire*. septembre 27. <https://www.ezyquip.com.au/product/ap600f-asphalt-paver/>.
- Ezyquip. 2020b. *AP1000F Asphalt Paver - Ezyquip Hire*. septembre 27. <https://www.ezyquip.com.au/product/ap1000f-asphalt-paver/>.
- GUIS'ENROBE. s. d. « Notice HSE - Centrale d'enrobage à chaud ». Consulté le 16 février 2024. <https://www.aisne.gouv.fr/contenu/telechargement/33201/215244/file/Annexe+1a+Notice+HSE+GUIS%27ENROBES+m.pdf>.
- Heavy Equipment Forums. 2013. « S205 Fuel Consumption ». Heavy Equipment Forums, mars 23. <https://www.heavyequipmentforums.com/threads/s205-fuel-consumption.34721/>.
- IDRRIM. 2013a. « Avis technique n°158 : ecOcomparateur Routes construction entretien v2.0 ». juin. https://www.idrrim.com/ressources/documents/3/1717,IDRRIM_AvisTechnique_158_2307_V2.pdf.
- IDRRIM. 2013b. « Avis technique N°160 : Système d'Evaluation de Variantes Environnementales V 2 ». septembre. https://www.seve-tp.com/wp-content/uploads/2022/05/1936IDRRIM_AvisTechnique_160_0310V2.pdf.
- IFSTAR, DAUVERGNE, JULLIEN, et al. 2013. « Manuel de référence ECORCE 2.0 - ECO comparateur Routes Construction Entretien ». mars 19.
- Jullien, Agnès, Pierre Moneron, Anne Ventura, et al. 2006a. « Chapitre 4: Collecte des données environnementales ». In *Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76. Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage*. <https://hal.science/hal-00932819>.
- Jullien, Agnès, Pierre Moneron, Anne Ventura, et al. 2006b. « Chapitre 5: Inventaire de Cycle de Vie de la couche de liaison ». In *Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76. Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage*. <https://hal.science/hal-00932821>.
- Perucca, Massimo 1, Lucia 2 Capuano, Giacomo 2 Magatti, et al. 2022. *Environmental Performance of Road Asphalts Modified with End-of-Life Hard Plastics and Graphene: Strategies for Improving Sustainability*. 2151. <https://doi.org/10.3390/pr10102151>.
- Scribd. s. d. « Standard Fuel Consumption | PDF | Machines | Industrial Equipment ». Scribd. Consulté le 30 mai 2025. <https://www.scribd.com/document/596079308/STANDARD-FUEL-CONSUMPTION>.
- Speceps. 2022. « How Much Fuel Does a Skid Steer Use Per Hour? Our Research ». <https://speceps.com/blog/how-much-fuel-does-skid-steer-use-pwer-hour.html>.

- Xie, Jun, Zhihu Wang, Fusong Wang, Shaopeng Wu, Zongwu Chen, et Chao Yang. 2021. « The Life Cycle Energy Consumption and Emissions of Asphalt Pavement Incorporating Basic Oxygen Furnace Slag by Comparative Study ». *Sustainability* 13 (8): 8. <https://doi.org/10.3390/su13084540>.
- Zapata, Pablo, et John A. Gambatese. 2005. « Energy Consumption of Asphalt and Reinforced Concrete Pavement Materials and Construction ». *Journal of Infrastructure Systems* 11 (1): 9-20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2005\)11:1\(9\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2005)11:1(9)).