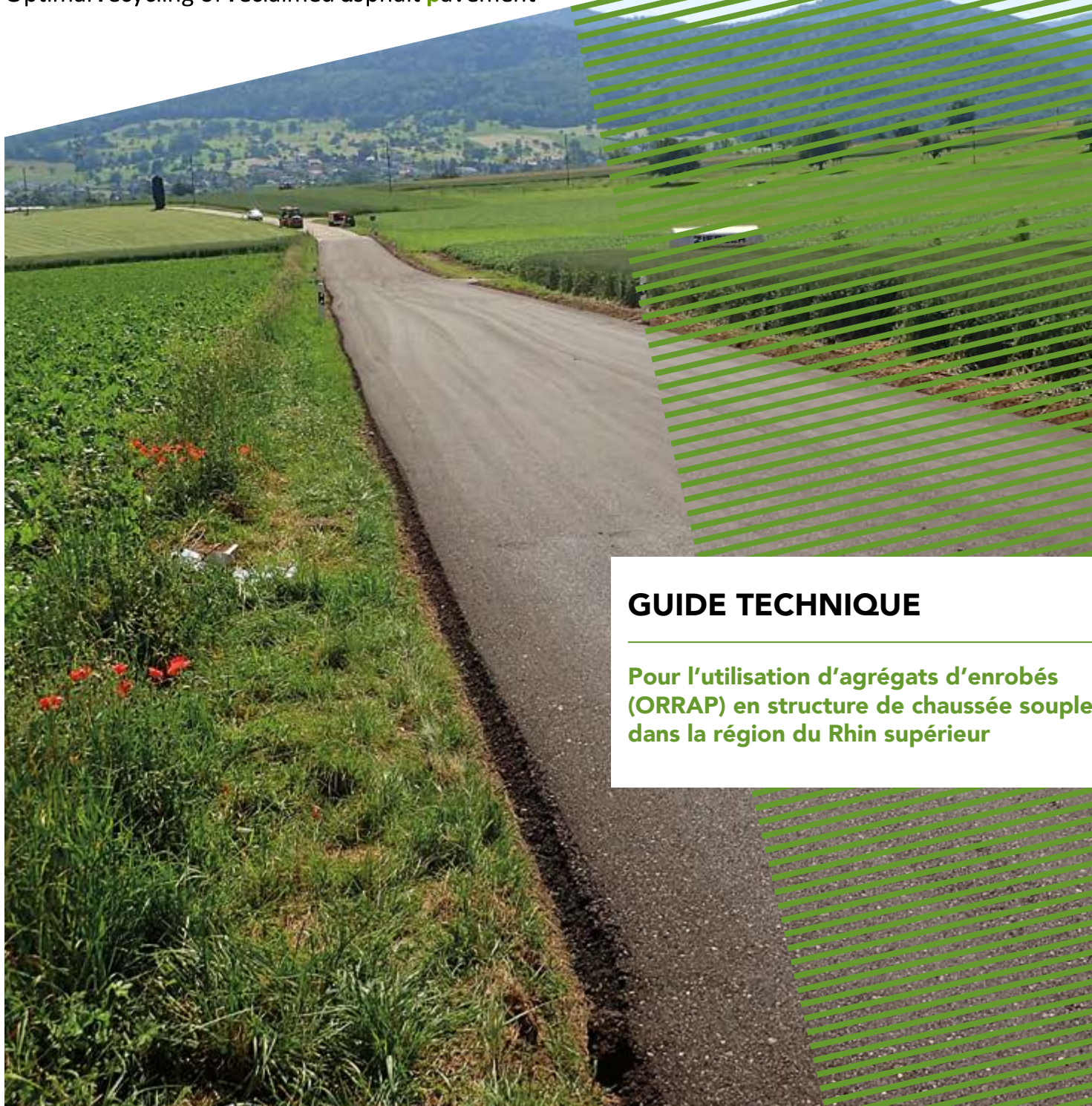




Optimal recycling of reclaimed asphalt pavement



GUIDE TECHNIQUE

Pour l'utilisation d'agrégats d'enrobés (ORRAP) en structure de chaussée souple dans la région du Rhin supérieur



Dépasser les frontières :
projet après projet
Der Oberrhein wächst zusammen,
mit jedem Projekt

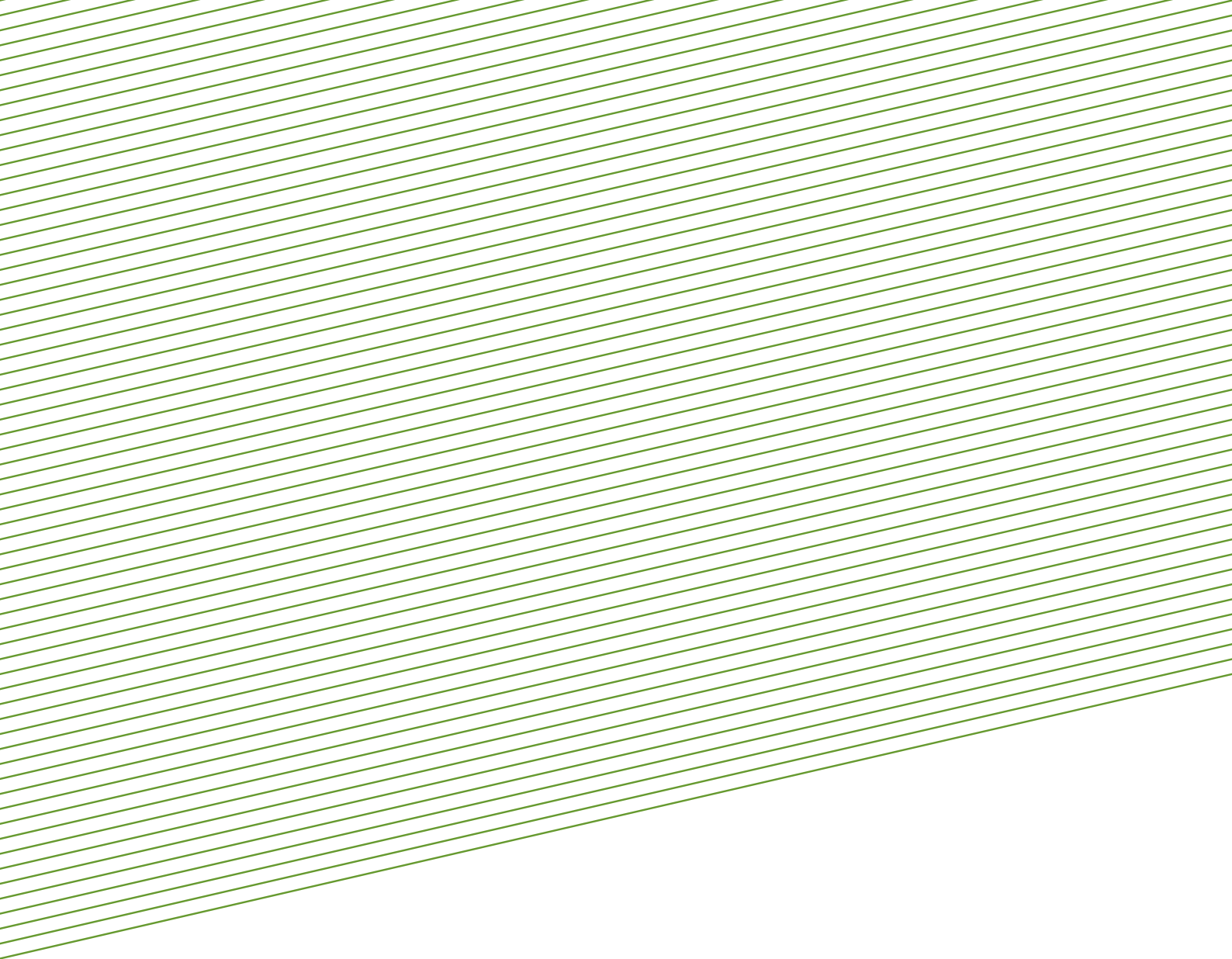


Fonds européen de développement
régional (FEDER)
Europäischer Fonds für regionale
Entwicklung (EFRE)

SOMMAIRE

INTERACTIF 

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. CONTEXTE | 5 |
| 2. CHAMP D'APPLICATION ET CADRE RÉGLEMENTAIRE | 6 |
| 3. ENJEUX ET CADRE RÉGLEMENTAIRE | 7 |
| 3.1 /// SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES | 7 |
| 3.2 /// ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ ET DES ASPECTS SANITAIRES | 7 |
| 3.2.1 // Objectif de l'évaluation de la durabilité | 7 |
| 3.2.2 // Impact environnemental | 8 |
| 3.2.3 // Approche économique | 9 |
| 3.2.4. // Impact pour les usagers | 10 |
| 3.2.5. // Toxicité humaine et écotoxicité | 10 |
| 4. PRODUCTION, DÉVELOPPEMENT ET MISE EN ŒUVRE | 11 |
| 4.1 /// ORIGINE ET ÉVACUATION | 11 |
| 4.2 /// PROCESSUS DE PRODUCTION | 11 |
| 4.2.1 // Fraisage | 11 |
| 4.2.2 // Concassage et/ou criblage | 11 |
| 4.2.3 // Stockage | 12 |
| 4.3 /// PRÉPARATION DE SUPPORT | 12 |
| 4.4 /// APPLICATION | 13 |
| 4.5 /// CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ET FICHES TECHNIQUES PRODUIT (FTP) | 16 |
| 4.5.1 // Constituant: agrégat d'enrobé | 16 |
| 4.5.2 // Produit: méthode ORRAP | 16 |
| 5. CONTRÔLES | 17 |
| 5.1 /// PRÉPARATION DU SUPPORT | 17 |
| 5.2 /// CONTRÔLE IN SITU | 17 |
| 5.3 /// CONTRÔLES EN LABORATOIRE | 17 |
| 5.4 /// CONTRÔLES APRÈS APPLICATION | 17 |
| 6. SYNTHÈSE | 19 |
| 6.1 /// RECOMMANDATIONS | 19 |
| 6.2 /// COMPARAISON AVEC D'AUTRES TECHNIQUES | 19 |
| 7. REMERCIEMENTS | 22 |
| 8. BIBLIOGRAPHIE | 23 |
| ANNEXE 1. ESSAIS SUR SITES D'EXPÉRIMENTATION | 24 |
| ANNEXE 2. ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ | 26 |
| ANNEXE 3. CONSULTATION | 34 |



1. CONTEXTE

La construction, la réhabilitation et l'entretien des routes et des rues impliquent l'utilisation de quantités importantes de ressources naturelles de bonne qualité, qu'il s'agisse de granulats ou de bitume. De nos jours, il devient de plus en plus important de limiter l'exploitation des ressources naturelles en encourageant l'utilisation de granulats recyclés tels que les agrégats d'enrobés (AE).

Les contraintes budgétaires croissantes et les objectifs de protection de l'environnement de plus en plus ambitieux justifient l'utilisation de matériaux plus économiques et plus économes en énergie. Bien que l'utilisation d'agrégats d'enrobés soit devenue une pratique courante au cours des dernières décennies, en particulier pour le recyclage dans des mélanges bitumineux à chaud, sa viabilité à long terme suscite encore des interrogations importantes. Cela est principalement dû à la détérioration irréversible des propriétés du liant et des agrégats une fois que ceux-ci ont subi plusieurs cycles de production.

Il existe de plus des contraintes réglementaires limitant l'utilisation des matériaux de recyclage contenant des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont considérés comme pollués. Par conséquent, les matériaux à trop forte concentration en HAP ne peuvent pas être réutilisés dans un mélange à chaud pour des raisons environnementales et sanitaires.

Enfin, les attentes des gestionnaires de réseaux sur les aspects économiques, environnementaux et de durabilité sont de plus en plus grandes.

Afin de répondre aux différents objectifs, un groupe de travail a été constitué dans le cadre d'un projet de recherche européen ORRAP (Optimal recycling of reclaimed asphalt pavement). L'objectif était de réutiliser à température ambiante des agrégats d'enrobés, recyclés à 100 %, sans ajout de liant bitumineux ou de régénérant. Ce matériau est compacté avec une certaine teneur en eau et mis en œuvre dans des structures de chaussées souples pour un trafic faible à modéré. À la suite de ce projet, le groupe ORRAP a développé et modifié une méthode basée sur les expériences suédoises^{1, 2, 3}.

Cette méthode sera appelée « méthode ORRAP » pour la suite du document. Elle prend en compte différents aspects économiques, environnementaux, techniques et sanitaires, car elle permet de préserver les ressources naturelles et d'utiliser des matériaux de moindre qualité. En outre, cette technologie de recyclage à 100 % permet non seulement de réduire la quantité de stocks d'agrégats d'enrobés pollués existants, mais elle constitue également une méthode de construction respectueuse de l'environnement qui permet de réduire les émissions de CO₂ et d'autres gaz semblables.

1 Toutes les notes sont regroupées en fin de document (NDLR).

2. CHAMP D'APPLICATION ET CADRE RÉGLEMENTAIRE

La méthode ORRAP est destinée aux chaussées de trafic faible à modéré (classe de trafic T3 - T5 en France, classe de trafic T1 - T3 en Suisse, classe de charge Bk 0.3 et Bk 1.0 en Allemagne, **voir tableau 1**). Elle est particulièrement adaptée aux routes départementales à faible trafic.

La méthode permet en outre de réutiliser des agrégats d'enrobés qui ne conviennent pas à l'utilisation dans des mélanges à chaud pour les raisons suivantes :

- un niveau de HAP supérieur aux seuils réglementaires mais dans une limite permettant leur réutilisation à froid (**voir tableau 2**);
- un stock de matériaux AE qui ne répond pas aux exigences d'une utilisation optimale dans un processus à chaud (teneur en liant, granulométrie...);
- un matériau qui a déjà subi plusieurs cycles de recyclage et dont les propriétés sont altérées.

Tableau 1 / Charge de trafic appropriée pour l'utilisation de la méthode ORRAP, en France, en Allemagne et en Suisse⁴

| | ORRAP possible | | | Non recommandé pour ORRAP | | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|-------------------|---------------------------|---------------------|-------|----------------------|--------|
| | T5 (≤ 25) | T4 (25 - 50) | T3 (50 - 150) | T2 (150 - 300) | T1 (300 - 750) | | T0 (750 - 2000) | |
| France : classe de trafic (trafic journalier annuel moyen des poids lourds) | | | | | | | | |
| Allemagne : classe de charge Bk (Mio. équivalent de 10 t de charge par essieu en 30 a) | Bk 0.3 | | Bk 1.0 | Bk 1.8 | Bk 3.2 | Bk 10 | Bk 32 | Bk 100 |
| Suisse : classe de trafic (charge de trafic équivalente journalière, 8,16 t de charge à l'essieu) [ESAL/d] | T1 (≤ 30) | T2 (30 - 100) | T3 (100 - 300) | T4 (300 - 1000) | T5 (1000 - 3000) | | T6 (3000 - 10000) | |

Étant donné qu'il n'existe pas de réglementation harmonisée, les conditions environnementales et réglementaires de l'utilisation de la méthode ORRAP dépendent de chaque pays. Bien qu'il soit obligatoire que les stocks d'agrégats d'enrobés ne contiennent pas d'amiante, des seuils réglementaires différents pour les HAP existent (**voir tableau 2**).

Tableau 2 / Seuils autorisés dans la construction de routes⁵

| | Allemagne | Suisse | France |
|-------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Amiante | NON | | |
| HAP | 0 - 25 mg/kg* | 0 - 500 mg/kg | |
| Hydrocarbures C10-C21 | - | | 0 - 300 mg/kg |
| Agrégats d'enrobés de qualité inférieure | OUI | | |

*Depuis le 01/01/2018, les matériaux ayant une teneur en HAP > 25 mg/kg ne doivent plus être installés sur les routes fédérales allemandes. Cette réglementation conçue pour les routes fédérales est généralement appliquée également à d'autres catégories de routes.

3. ENJEUX ET CADRE RÉGLEMENTAIRE

3.1 /// SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

De bonnes performances mécaniques ont été démontrées en laboratoire dans des essais de module caractéristique^{6, 7, 8} (essais triaxiaux à chargements répétés), montrant un matériau qui atteint dans le temps des valeurs légèrement plus élevées qu'un matériau non lié (GNT).

La méthode ORRAP est utilisée de préférence comme couche d'assise construite sur une nouvelle ou une ancienne structure de chaussée existante et recouverte soit d'un enrobé bitumineux, soit d'un enduit superficiel d'usure.

3.2 /// ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ ET DES ASPECTS SANITAIRES

3.2.1 // OBJECTIF DE L'ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ

Afin de pouvoir formuler des recommandations pour l'utilisation de la méthode ORRAP, il faut prendre en considération la durabilité de cette méthode. Le tableau 3 énumère les facteurs qui peuvent influencer les résultats de l'évaluation, tant positivement que négativement. Ces facteurs constituent également la base des recommandations générales pour l'utilisation de la méthode ORRAP. Les recommandations émises dans ce chapitre ne sont valables que si les seuils spécifiques des pays mentionnés au chapitre 2 et les restrictions locales et relatives aux matériaux sont respectés. Ce chapitre est basé sur une évaluation trinationale de l'environnement et des coûts, qui comprend des normes françaises, allemandes et suisses, ainsi qu'une évaluation supplémentaire de l'environnement et des coûts pour les conditions suisses. Les résultats sont cohérents pour les deux études (**détails en annexe 2**), mais des différences existent, liées à l'influence des scénarios et des calculs.

Tableau 3 / Conditions limites possibles et leurs effets sur l'évaluation de la durabilité

| | Frais de matériel, de transport, de chantier (économie) | Demande d'énergie pour la production de matériaux, les chantiers de construction, les transports (économie et environnement) | Consommation de matières (environnement) | Temps de trafic supplémentaire (utilisateur du trafic) | Demande d'énergie pour le trafic supplémentaire (environnement) | Toxicité humaine et écotoxicité (HAP) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Épaisseur de la couche | X | X | X | | | X |
| Hypothèse de durée de vie | X | X | X | X | X | X |
| Nécessité d'une couche de surface | X | X | X | X | X | X |
| Distance entre la production de matériaux et l'usine de mélange /le chantier de construction | X | X | | | | |
| Distance supplémentaire de déviation | | | | X | X | |
| Volume du trafic de déviation | | | | X | X | |
| Limites de HAP dans les matériaux et manipulations requises | | | | | | X |

Pour l'évaluation de la durabilité, différentes méthodes de construction sont comparées d'un point de vue environnemental et économique (**voir annexe 2**). En outre, les effets sur la circulation et la santé des employés et de la population doivent être pris en compte lors de l'évaluation de la méthode de construction.

Les structures considérées dans l'annexe 2 reflètent les limites de l'utilisation prévue. Comme il n'existe pas encore de méthode ORRAP standardisée, les aspects suivants sont examinés :

- durée de vie variable ;
- avec ou sans couche de roulement en enrobé sur le produit ORRAP ;
- remplacement d'une couche d'enrobé à chaud ou d'une couche de matériau granulaire non lié (GNT).

Les recommandations les plus importantes concernant l'utilisation de la méthode ORRAP sont résumées ci-dessous. Les résultats correspondants relatifs aux évaluations environnementale et économique sont documentés en annexe 2.

3.2.2 // IMPACT ENVIRONNEMENTAL

La demande d'énergie primaire et la consommation de ressources naturelles ont été comparées. Les émissions de gaz à effet de serre sont proportionnelles à la demande d'énergie primaire. D'autres indicateurs de l'impact environnemental existent mais n'ont pas été utilisés dans le cadre de cette étude sur la méthode ORRAP.

/ Demande d'énergie primaire et potentiel de réchauffement climatique (Global warming potential - GWP)

La méthode ORRAP peut conduire à des économies en énergie et en émissions de gaz à effet de serre significatives :

- l'impact peut être considérablement réduit par la méthode ORRAP par rapport à une structure bitumineuse épaisse (chaussée avec une couche d'assise en mélange bitumineux à chaud), surtout si aucune couche de surface en enrobé n'est prévue ;
- l'impact peut être quelque peu réduit par la méthode ORRAP par rapport à une couche en GNT ;
- l'impact peut être considérablement réduit si une couche ORRAP existante est re-traitée en place, par rapport à une réutilisation plus conventionnelle en centrale.

La mise en place de déviation génère une demande en énergie primaire et des émissions de gaz à effet de serre importantes, mais généralement plus faibles que pour la part construction. La demande d'énergie primaire et l'indicateur GWP sont plus élevés si l'on tient compte de longs itinéraires de déviation et/ou d'un trafic de déviation important.

/ Utilisation de ressources naturelles

La méthode ORRAP peut réduire la demande en matériaux de construction primaires :

- cette demande est légèrement inférieure avec la méthode ORRAP par rapport à une structure en mélange hydrocarboné à chaud, si aucune couche de roulement en enrobé n'est prévue. Si une couche de roulement en enrobé est nécessaire, la demande en matériaux primaires de construction est presque équivalente à celle d'une structure bitumineuse épaisse ;
- elle est nettement inférieure avec la méthode ORRAP par rapport à la méthode de construction avec une couche en GNT constituée de granulats naturels.

La méthode ORRAP permet l'utilisation d'agrégats d'enrobés par rapport à une couche en GNT, ce qui permet de réduire les stocks. L'utilisation d'agrégats d'enrobés est également plus importante avec la méthode ORRAP qu'avec un enrobé à chaud. Toutefois, ceci n'est vrai que lorsque la couche ORRAP est produite pour la première fois.

/ Vulnérabilité environnementale

Les indicateurs environnementaux ont également été agrégés avec la méthode de la rareté environnementale, qui est basée sur la politique environnementale suisse. Les résultats indiquent une performance légèrement meilleure (12 %) pour la méthode ORRAP (**voir annexe 2**).

3.2.3 // APPROCHE ÉCONOMIQUE

La méthode ORRAP peut permettre de réaliser d'importantes économies sur les coûts de construction dans les conditions suivantes (les coûts de mise en décharge ne sont pas pris en compte) :

- les coûts de construction peuvent être réduits par la méthode ORRAP par rapport à une structure bitumineuse épaisse, si aucune couche de surface en enrobé n'est prévue ;

- par rapport à la méthode de construction avec une couche en GNT, les coûts sont approximativement les mêmes ;
- les coûts peuvent être réduits si les transports de matériaux peuvent être réduits. Cela est possible si la couche ORRAP existante est re-traitée en place.

3.2.4 // IMPACT POUR LES USAGERS

La méthode ORRAP et une structure bitumineuse épaisse nécessitent le même temps de construction et ont donc le même impact sur le trafic. Toutefois, si la durée de vie du revêtement ORRAP est plus courte, les mesures de renouvellement supplémentaires entraîneront davantage de pertes de temps pour les usagers de la route. Plus la route de déviation est longue et/ou plus le volume de trafic à dévier est important, plus la perte de temps et les autres impacts sur les usagers de la route sont importants.

3.2.5 // TOXICITÉ HUMAINE ET ÉCOTOXICITÉ

La toxicité pour l'humain et l'écotoxicité (environnement) des HAP ont été calculées à l'aide du modèle USEtox. Avec cette méthode, l'exposition aux fumées donne la valeur de toxicité la plus élevée, devant l'exposition aux poussières. Cependant, cet effet pourrait s'expliquer par le fait que les données ne sont peut-être pas assez représentatives. L'exposition aux HAP par les fumées a été supposée proportionnelle à la quantité d'agrégats d'enrobés recyclée à chaud, lesquels font partie de la couche de base de l'enrobé à chaud mais pas de la couche ORRAP. L'exposition aux HAP par la poussière a été supposée proportionnelle à la quantité totale d'agrégats d'enrobés traitée, à chaud et à froid. Cette quantité est plus élevée pour la méthode ORRAP. Par conséquent, l'exposition aux HAP par la fumée est plus faible avec la méthode ORRAP, mais l'exposition aux HAP par la poussière est plus élevée.

4. PRODUCTION, DÉVELOPPEMENT ET MISE EN ŒUVRE

4.1 /// ORIGINE ET ÉVACUATION

La plupart des agrégats d'enrobés utilisés dans la région du Rhin supérieur sont dérivés des alluvions silico-calcaires du Rhin. De ce fait, les caractéristiques intrinsèques des agrégats sont considérées comme relativement homogènes et bien contrôlées. L'enquête menée dans le cadre du projet ORRAP a montré des résultats semblables pour les valeurs de densité, de résistance à la fragmentation et à l'usure entre des matériaux prélevés dans des stocks en Allemagne, en Suisse et en France.

4.2 /// PROCESSUS DE PRODUCTION

Les agrégats d'enrobés sont produits par fraisage et par des opérations de concassage et/ou de criblage. Au cours de ce processus, il est particulièrement important de ne pas générer de gros morceaux.

4.2.1 // FRAISAGE

Une bonne méthodologie de fraisage (épaisseur constante, vitesse d'entraînement du rotor, etc.) permet de limiter les opérations de concassage et de criblage ultérieures.

4.2.2 // CONCASSAGE ET/OU CRIBLAGE

Les agrégats d'enrobés transportés vers les usines de concassage et de criblage proviennent souvent de diverses sources. Ces conditions d'origine affectent les processus de production.

Habituellement, les usines d'enrobés reçoivent des déchets d'enrobés bitumineux sous quatre formes principales :

- enrobés fraisés d'une chaussée ;
- retours de déconstruction de chantiers sous forme de dalles et de croûtes ;
- retour de chantiers non réalisés ;
- blancs et surplus de production.

La gestion des stocks des agrégats d'enrobés détermine également le traitement nécessaire. En particulier, la gestion des retours et des blancs doit être effectuée afin d'éviter la formation de blocs.

Lorsque ces précautions ne sont pas prises, un prétraitement avec un broyeur est nécessaire pour réduire la taille du bloc à 500 mm avant de passer par l'installation de broyage.

En fonction de la nature des matériaux récupérés (EN 13108-8), la préparation de l'agrégat d'enrobé nécessite :

- concassage et criblage pour les croûtes et les morceaux grossiers d'enrobés, si nécessaire ;

OU

- criblage pour fraisage grossier.

À la fin de ces opérations, le produit du processus de criblage est repris pour former un stock, en étalant successivement des couches d'agrégats d'enrobés en « mille-feuilles ». Ce stock est repris frontalement, de bas en haut, afin de découper les couches horizontales.

4.2.3 // STOCKAGE

Toutes les règles relatives au stockage des granulats naturels s'appliquent au stockage des agrégats d'enrobés. Toutefois, pour limiter la création de morceaux, il est conseillé d'éviter la circulation de machines sur les stocks.

Si une plate-forme possède plusieurs stocks d'agrégats d'enrobés, ceux-ci doivent être physiquement identifiés (panneau).

Afin de maîtriser la teneur en eau, il est recommandé de couvrir les stocks d'agrégats d'enrobés ou de les protéger de la pluie après le criblage.

Si l'homogénéité du stock n'est pas considérée comme suffisante, il convient de l'améliorer par un déstockage partiel et un brassage. Pour les « grands stocks », cela permet de mieux contrôler les variations de la teneur en liant et de la taille des grains. Dans ce cas, il est nécessaire de caractériser chaque sous-stock par sa granulométrie et sa teneur en liant, les autres caractéristiques ayant déjà été identifiées dans le stock initial.

4.3 /// PRÉPARATION DE SUPPORT

Avant de mettre en œuvre la méthode ORRAP, une visite du site et un relevé de l'état du support sont recommandés (**voir la partie contrôles**). Il est important d'entreprendre tout travail préparatoire nécessaire. Selon l'état et le type de matériaux de la chaussée existante, il peut être nécessaire de traiter les fissures et/ou d'appliquer une couche d'étanchéité (point-à-temps, couche d'accrochage ou enduit).

Dans certains cas, le fraisage ou le rainurage de la chaussée existante peut être nécessaire pour réduire son épaisseur et obtenir la rugosité de surface nécessaire pour assurer un bon emboîtement. En outre, une couche d'accrochage est recommandée.

La méthode ORRAP sur les sites suisse et français a été appliquée sur une couche bitumineuse. Même si elle n'a pas été évaluée dans le cadre de ce projet, une application sur une couche non liée peut être réalisée.



Figure 2 / ORRAP Suisse & France - Support primaire/revêtement monocouche
Source Cerema

4.4 /// APPLICATION

Avant l'application, la présence et le bon fonctionnement de tous les équipements de mise en œuvre et les méthodes de guidage des équipements d'application sont examinés.

L'application des matériaux ORRAP peut être effectuée avec une niveleuse ou un finisseur.

Bien que la couche ORRAP puisse être appliquée à température ambiante, une température minimale supérieure à 15 °C est conseillée. De manière générale, une application pendant la saison estivale est préférable. Il est recommandé de ne pas appliquer les matériaux ORRAP sous de fortes pluies.



Figure 3 / ORRAP Suisse & France - Mise en œuvre avec un finisseur/une niveleuse
Source Empa & Cerema

L'épaisseur minimale recommandée de la méthode ORRAP n'est pas inférieure à :

– 3 fois U, U étant la plus grande dimension de l'agrégat d'enrobé ;

OU

– 5 fois D, D étant la plus grande dimension de l'agrégat désenrobé.

L'épaisseur maximale recommandée est de 15 cm en une passe. Pour le moment, il n'est pas recommandé d'appliquer une épaisseur totale supérieure à 25 cm (cette épaisseur n'a pas été évaluée dans le cadre du projet et augmente le risque d'orniérage).

Pendant l'application, les matériaux ORRAP doivent être maintenus à un état d'humidité suffisant (basé sur le test Optimum proctor modifié - OPM) afin de faciliter le compactage du matériau. En règle générale, une teneur en eau $W(OPM) + 2/- 1 \%$ peut être adoptée. Dans tous les cas, il est important d'avoir une compacité suffisante du matériau appliqué (densité moyenne sur le site $\geq 97 \%$ de la densité au OPM).

La caractérisation des matériaux ORRAP montre une assez faible sensibilité de la densité optimale avec la teneur en eau. Par conséquent, l'humidification en centrale n'est pas nécessaire et un arrosage sur place peut être réalisé. Un dispositif spécifique pour l'arrosage du matériau doit être utilisé avant et après l'épandage ainsi qu'avant le compactage. Cela peut être fait en utilisant des dispositifs d'arrosage par pulvérisation montés sur le finisseur ou sur une citerne à eau.



Figure 4 / ORRAP Suisse & France - Arrosage par aspersion. Source Cerema

L'atelier de compactage consiste en des compacteurs à pneumatiques et des compacteurs à billes en acier qui assurent le pétrissage des matériaux, la densification et un aspect de surface lisse et uniforme.

Il est conseillé d'éviter l'utilisation de vibrations de compacteurs à billes trop lourds afin d'éviter l'apparition de fissures : selon l'état d'humidité du matériau, la vibration des compacteurs peut générer des fissures qui doivent être fermées avec le compacteur à pneumatiques. Si les fissures persistent après avoir ré-humidifié le matériau, il est conseillé d'arrêter les vibrations et d'augmenter l'action des compacteurs à pneumatiques. En cas de doute, une section d'essai doit être réalisée sur les 100 premiers mètres du chantier afin d'ajuster l'atelier de compactage.



Figure 5 / ORRAP Suisse - Des vibrations peuvent générer des fissures
Source Cerema

Le compactage des rives de chaussée (en particulier en dehors des zones urbaines) est plus délicat qu'avec les enrobés à chaud et les GNT. Il est donc recommandé d'appliquer la couche ORRAP sur une largeur supérieure à celle de la voie de circulation afin d'éviter que le trafic ne se retrouve sur les bords (environ 30 à 50 cm de surlargeur supplémentaire de part et d'autre). Si nécessaire, une stabilisation de l'accotement avec une GNT classique peut être envisagée avant la mise en œuvre de la couche ORRAP.



Figure 6 / ORRAP Suisse & France - Compactage difficile sur les rives de chaussée
Source Cerema

En général, l'effort de compactage (nombre de passes de rouleaux) est proche de celui des matériaux non liés (GNT) et environ le double de la quantité nécessaire pour un enrobé à chaud. Des températures plus élevées améliorent la compactabilité du matériau ORRAP et contribuent à réduire le nombre de passes.



Figure 7 / ORRAP Suisse & France - Compactage. Source Cerema

Après l'application du matériau ORRAP, la section ne peut être laissée sans couche de surface que pendant quelques jours et avec des précautions de circulation appropriées (limitation de vitesse, avertissement de l'utilisateur...).

La méthode ORRAP ne peut pas être utilisée comme couche de surface car elle ne répond pas aux mêmes exigences (qualité des granulats, micro-texture, macro-texture) et en raison du risque de perte de granulats et de déchaussement.

Il est donc recommandé d'appliquer une couche de surface en béton bitumineux ou en enduit superficiel le lendemain de l'application des matériaux ORRAP.

Dans tous les cas, il est recommandé de surveiller les sections ORRAP pendant les trois premiers mois afin d'évaluer l'orniérage (lié au post-compactage du matériau). Si l'orniérage apparaît, l'enduit superficiel doit être recouvert d'une couche de béton bitumineux.



Figure 8 / ORRAP France - Enduit superficiel d'usure en finition. Source Cerema

4.5 /// CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX ET FICHES TECHNIQUES PRODUIT (FTP)

4.5.1 // CONSTITUANT: AGRÉGAT D'ENROBÉ

Sur le plan technique, l'utilisation d'agrégats d'enrobés dans la méthode ORRAP implique la détermination de certaines caractéristiques et la fourniture d'une fiche technique produit. Cette dernière comprend, au minimum, les éléments suivants :

- agrégats d'enrobés de catégorie U AE 0/D (EN 13108-8);
- courbe granulométrique des agrégats désenrobés (EN 12697-2), valeurs minimale et maximale sur la base d'un essai / 2000 tonnes - 3 analyses par stock minimum;
- teneur en liant des agrégats d'enrobés (EN 12697-1), valeurs minimale et maximale sur la base d'un essai / 2000 tonnes - 3 analyses par stock minimum;
- détermination de la pénétrabilité (EN 1426) et de la température bille & anneau du liant récupéré (EN 1427), valeurs minimale et maximale sur la base d'un test / 2000 tonnes - 2 analyses par stock minimum;
- détermination de la masse volumique réelle des AE (EN 12697-5) sur la base d'un test par stock.

4.5.2 // PRODUIT: MÉTHODE ORRAP

Sur le plan technique, l'utilisation d'agrégats d'enrobés dans une méthode ORRAP implique la détermination de certaines caractéristiques et la fourniture d'une fiche technique produit. Cette dernière comprend, au minimum, les éléments suivants :

- détermination de la courbe OPM (Optimum proctor modifié) (EN 13286-2) et de la teneur en eau optimale sur la base d'un essai par stock;
- détermination de l'indice de portance immédiat (EN 13287-47) sur la base d'un test par stock.

L'essai triaxial à chargements répétés^{6,7,8} doit être effectué si une optimisation de la structure est souhaitée (afin de réduire l'épaisseur de la couche).

En cas de doute sur le comportement à l'orniérage du produit à un âge précoce, un test d'orniérage peut être effectué^{9,10}. Cela peut être fait avec l'essai standard (EN 12697-22) ou sur une dalle en utilisant le MMLS3¹¹.

5. CONTRÔLES

L'entreprise précise dans son plan d'assurance qualité, les moyens mis à disposition pour la réalisation du projet et le plan de contrôle qui sera mis en place lors du chantier.

5.1 /// PRÉPARATION DU SUPPORT

En cas de doute, la qualité du support doit être vérifiée mécaniquement au préalable. (Essai de portance ou de déflexion).

5.2 /// CONTRÔLE IN SITU

Des contrôles de compacité doivent être effectués lors de l'application afin de garantir une densification adéquate du matériau utilisé. Dans ce cas, un gammadensimètre à double sources sera préféré (Césium 137 - Américium 241/ Béryllium 9), car il donne également des informations sur la teneur en eau du produit. Les appareils de mesure par transmission électrique ne peuvent pas être utilisés pour cette technique en raison de la forte teneur en eau du matériau.

Il est important de surveiller la température ambiante pendant l'application et éventuellement la température des matériaux pendant le compactage.

L'épaisseur de la couche peut également être vérifiée pendant l'application à l'aide d'une jauge de profondeur.

5.3 /// CONTRÔLES EN LABORATOIRE

Il est recommandé de prélever des échantillons pour déterminer la teneur en eau en laboratoire, si aucun essai de compacité n'est prévu pendant l'application, par exemple.

En outre, des essais en laboratoire doivent être effectués pour garantir la cohérence des éléments entre le produit appliqué et la fiche technique proposée au préalable, tels que la teneur en liant et la granulométrie des matériaux échantillonnés. Les résultats sont comparés avec la fiche technique fournie.

5.4 /// CONTRÔLES APRÈS APPLICATION

En cas d'orniérage (observé visuellement), certains essais doivent être effectués afin de quantifier la profondeur de l'ornière. Si la profondeur de l'ornière dépasse 10 mm (moyenne) ou 15 mm (valeur maximale) entre 3 et 6 mois, il est recommandé d'appliquer un béton bitumineux, éventuellement après avoir réalisé un reprofilage.

D'autres essais peuvent être programmés afin de vérifier la stabilité du matériau. En effet, des mesures de déflexion peuvent être effectuées à un « âge précoce » (après l'application de la couche de roulement) et après au moins trois mois afin de comparer les résultats et d'évaluer la montée en cohésion des matériaux.

À ce jour, il n'est pas possible de fixer des exigences concernant l'uni longitudinal, mais il est recommandé de contrôler cette caractéristique. Un bon uni peut être difficile à obtenir avec la couche ORRAP et un enduit superficiel. Il peut être amélioré avec une couche de surface en béton bitumineux, mis en œuvre quelques mois plus tard.

6. SYNTHÈSE

Les résultats détaillés se trouvent en¹².

6.1 /// RECOMMANDATIONS

- La méthode ORRAP ne concerne que les couches de base et est recommandée pour les faibles niveaux de trafic (**voir tableau 1**). L'utilisation pour les chaussées à plus fort trafic n'est pas recommandée car elle n'a pas été évaluée ;
- comme des difficultés de compactage peuvent survenir (en raison des effets négatifs associés aux températures plus basses sur la compactabilité et le durcissement de la production ainsi que sur l'enduit superficiel utilisé), l'application de la couche ORRAP pendant les saisons froides n'est pas recommandée (risque élevé d'échec) ;
- la préparation de l'agrégat d'enrobé doit permettre d'éviter les morceaux grossiers, qui peuvent compliquer l'application avec le finisseur ou contribuer à la naissance de défauts dans la couche appliquée ;
- l'application est limitée à une épaisseur de 15 cm par couche ; une épaisseur totale inférieure à 25 cm est recommandée ;
- pour limiter la fissuration, il est conseillé d'éviter l'utilisation de compacteurs à billes trop lourds ;
- la couche ORRAP nécessite un effort de compactage élevé, comparable à celui des matériaux non liés (GNT) et environ deux fois plus important que pour un enrobé à chaud ;
- le compactage des rives de chaussée étant délicat, il est recommandé d'appliquer la couche ORRAP sur une largeur supérieure à celle de la voie de circulation pour éviter d'avoir le passage du trafic sur les rives (surlargeur d'environ 30 à 50 cm de chaque côté).
Si nécessaire, une stabilisation de l'accotement peut être envisagée ;
- la méthode ORRAP doit être recouverte d'une couche de surface (enduit superficiel ou béton bitumineux) ;
- un bon uni est difficile à obtenir avec une couche ORRAP surmontée d'une couche de roulement en enduit superficiel d'usure ;
- la méthode ORRAP nécessite une période d'observation pendant les premiers mois (apparition potentielle d'ornièrage).

6.2 /// COMPARAISON AVEC D'AUTRES TECHNIQUES

Le tableau récapitulatif ci-dessous présente les principales différences entre la méthode ORRAP et une GNT traditionnelle faite de granulats naturels d'une part, et un enrobé bitumineux (EB) à chaud d'autre part.

Tableau 4 / Comparaison technique de la méthode ORRAP avec une GNT et un enrobé à chaud

| | ORRAP comparé à GNT | ORRAP comparé à EB |
|--------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Performances mécaniques | = / + (jeune âge) / (long terme) | - |
| Facilité de fabrication | = / + (GNT de carrière) / (GNT en centrale) | + (pas de centrale nécessaire) |
| Facilité de stockage | - (création de mottes) | + (matériau froid) |
| Facilité d'application | - (difficulté de compactage) | - (difficulté de compactage) |
| Facilité de caractérisation | - (présence de liant) | + (moins de performances à déterminer) |
| Recyclabilité | = | - (présence potentielle de HAP) |
| Comportement au jeune âge | - / = (risque d'orniérage) | - (risque d'orniérage) |
| Comportement sur le long terme | + | - (module) |

Légende

+: meilleur

=: équivalent

-: moins bon

La demande en énergie primaire et le potentiel de réchauffement climatique de la méthode ORRAP sont souvent inférieurs à ceux de la méthode traditionnelle. La méthode ORRAP permet également une économie en ressources naturelles. Ces avantages dépendent du type de construction et de la durée de vie de la méthode ORRAP. Une réduction des coûts de construction est possible, mais ne constitue pas la raison principale de l'utilisation de la méthode ORRAP (voir figure 9, figure 10).

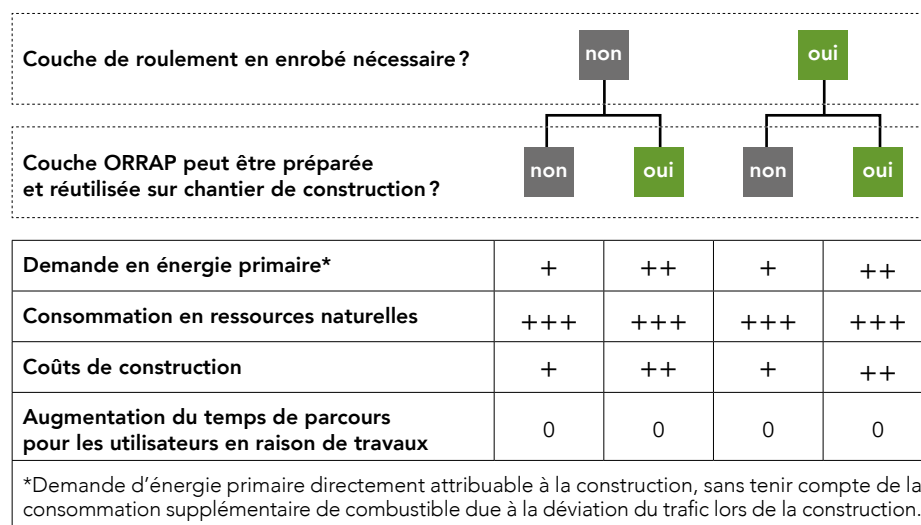


Figure 9 / Comparaison de la durabilité de la méthode ORRAP avec une GNT avec des agrégats naturels

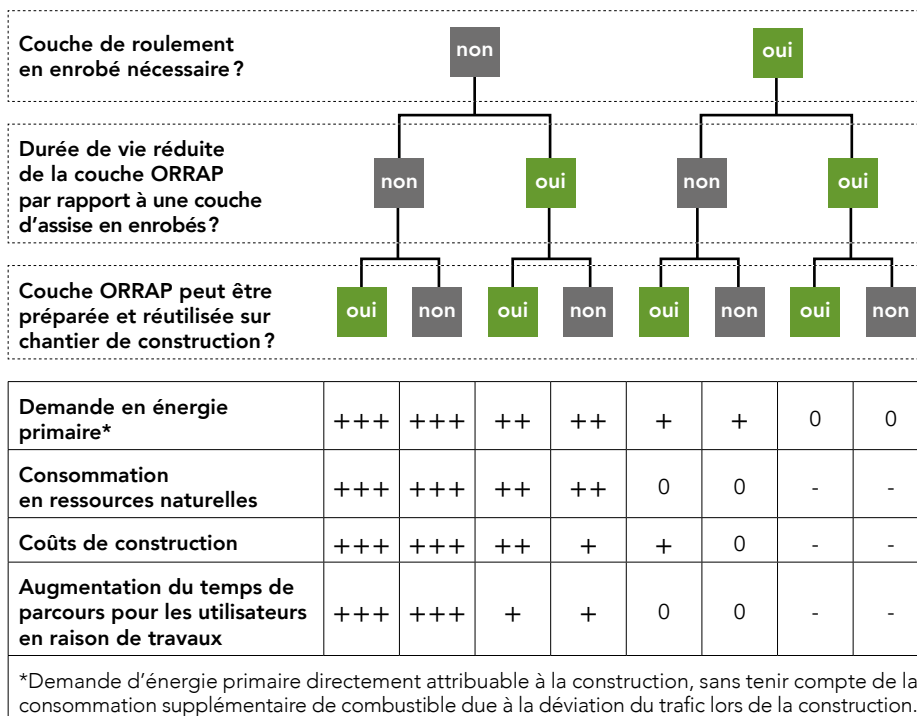


Figure 10 / Comparaison de la durabilité de la méthode ORRAP avec l'utilisation d'une chaussée en enrobé à chaud

7. REMERCIEMENTS

Le projet a réuni plusieurs partenaires de cofinancement: INSA Strasbourg (partenaire principal), le Cerema, l'Université de Karlsruhe (HsKA), Haute école spécialisée du nord-ouest de la Suisse (FHNW), le Laboratoire fédéral suisse pour la science et la technologie des matériaux (EMPA) et Tiefbauamt - Canton de Bâle-Land. Douze partenaires associés font partie du consortium: Institut fédéral de recherche sur les autoroutes (BAST), Institut allemand de l'asphalte (DAI), Colas Est, Labinfra (Groupe hydro-géotechnique), Société alsacienne de recyclage des matériaux (SARM), Südwest Asphalt GmbH & Co, Ziegler AG - Bauunternehmung, Département du Haut-Rhin (CD68), Département du Bas-Rhin (CD67), Association régionale du Rhin supérieur moyen, Ville de Karlsruhe et Comté de Karlsruhe.

Doté d'un budget total de 1,48 million d'euros, ORRAP est cofinancé par le programme Interreg V Rhin Supérieur à hauteur de 436201 euros par le Feder (Fonds européen de développement régional). Dans le cadre de la nouvelle politique régionale suisse (NPR), le projet est également soutenu par la Confédération suisse, le canton d'Argovie et le canton de Bâle-Campagne.

Le projet ORRAP a débuté en novembre 2016 et aurait dû se terminer en octobre 2019. En raison des exigences de l'expérimentation en cours et des impacts de la crise sanitaire liée à la Covid-19, sa durée a été prolongée jusqu'en décembre 2020.

8. BIBLIOGRAPHIE

1. Jacobson, T., *Återvinning av krossad asphalt som bär- och förstärkningslager. Del 2 – Erfarenheter från fältstudier*, VTI notat 32-2002, 2003.
2. Jacobson, T., *Återvinning av tjärasfalt och krossad asfaltbeläggning vid motorvägsbygget på E4, Markaryd*, VTI notat 9-2007, 2007.
3. Jacobson, T., & Waldemarson, A., *Återvinning av asfaltgranulat vid motorvägsbygget på E4, Markaryd- Uppföljningar åren 2005-2010*, VTI notat 25-2010, 2011.
4. Traffic class:
 - France : norme NF P 98-086.
 - Germany: „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO)“. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Infrastrukturmanagement“, FGSV 499, Ausgabe 2012.
 - Switzerland: „SN 640430 Walzasphalt Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten“ « Enrobés bitumineux compactés Conception, exécution et exigences relatives aux couches en place », Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS, 2014.
5. Authorized thresholds in road construction:
 - France : « Guide d’acceptabilité environnementale des matériaux alternatifs issus du BTP » “Guide for the environmental acceptability of alternative materials from the construction industry”, IDRRIM, France.
 - Germany: „Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 16/2015. Betreff: Regelungen zur Verwertung von Straßenausbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen in Bundesfernstraßen“, Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2015.
 - „Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat – TL AG-StB“. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Asphaltbauweisen“, FGSV 749, Ausgabe 2009.
 - Switzerland: „Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA)“, version 01.01.2019. www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/20141858
« Ordonnance sur la limitation et l’élimination des déchets. (Ordonnance sur les déchets, OLED) », version 01/01/2019. www.admin.ch/opc/fr/classified-compilation/20141858/index.html
6. Afnor « Mélanges avec ou sans liant hydraulique – Partie 7: essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique », norme française NF EN 13286-7, juillet 2004.
7. Gaillard, L., *Comportement thermo-hydro-mécanique des agrégats d’enrobés compactés non saturés*, thèse de l’Université de Strasbourg, INSA Strasbourg, soutenue publiquement le 15/11/2019.
8. Gaillard, L., Chazallon, C., Hornych, P., Quezada, J. C., & Raab, C., “Thermo-hydro-mechanical behaviour of cold reclaimed asphalt aggregates without binder addition. Road Materials and Pavement Design, 20 (sup1: EATA Granada)”, S49-S63, 2019.
9. Raab, C., Partl, M. N., & Bensa, C., “100% recycling of low-temp asphalt for minor roads – lab compaction and traffic simulation”. In M. Pasetto, M. N. Partl, & G. Tebaldi (Eds.), *Lecture notes in civil engineering*, Vol. 48. Proceedings of the 5th International symposium on asphalt pavements and environment (APE), Padua (pp. 235-245), 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29779-4_23
10. Raab C., Partl Manfred, “Laboratory Evaluation and Construction of Fully Recycled Low-Temperature Asphalt for Low-Volume Roads”, *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, Article ID 4904056, 12 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/4904056>
11. Hugo, F., Epps, A., *Significant findings from accelerated pavement testing*, NCHRP, Synthesis 325, Washington, TRB 2004.
12. « Rapport final du projet ORRAP » www.orrapp.org
www.hs-karlsruhe.de/ivi/forschungsprojekte/orrapp
www.cerema.fr/orrapp

ANNEXE 1. ESSAIS SUR SITES D'EXPÉRIMENTATION

TABLEAU DE SUIVI – CHANTIER FRANCE

| Solutions | GNT 15 cm (témoin) | ORRAP 12 cm | ORRAP 15 cm |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Localisation | Sermersheim, Bas-Rhin (67), RD 129, France | | |
| Nombre de PL/jour | 70 | | |
| Longueur de sections | 200 mètres | 200 mètres | 200 mètres |
| Largeur de voie | 4,50 mètres | | |
| Structure existante | 60 à 100 mm d'EB sur hérisson (6 carottes)/profil rasant | | |
| Rechargement | GNT 15 cm (témoin) | ORRAP 12 cm | ORRAP 15 cm |
| Couche de roulement | Enduit superficiel MSG 6,3/10 | | |
| Travaux complémentaires | Élargissement à 5,50 mètres avec GNT | | |
| Teneur en HAP du stock (16HAP) | Sans objet | 103 Mg/kg de M.S. | |
| MVA sèche à l'OPM | 2,197 Mg/m ³ | 1,956 Mg/m ³ | |
| Teneur en eau à l'OPM | 7,2 % | 7,2 % | |
| MVA sèche chantier (gammadensimètre par rétrodiffusion) | 2,089 Mg/m ³ | 1,883 Mg/m ³ | 1,837 Mg/m ³ |
| Teneur en eau sur chantier | 7,0 % | 9,2 % | |
| Granulométrie non désenrobé* | <p>Le graphique illustre la granulométrie non désenrobée. L'axe des ordonnées représente le pourcentage de passant cumulé (de 0 à 100), et l'axe des abscisses représente l'ouverture en mm (échelle logarithmique de 0,01 à 10). Trois courbes sont tracées : Stock France (bleu), AE RD129 (orange) et GNT-D129 (vert). Les courbes AE RD129 et GNT-D129 sont très proches, indiquant une granulométrie similaire, tandis que la courbe Stock France est légèrement plus fine.</p> | | |
| Granulométrie désenrobé* | <p>Le graphique illustre la granulométrie désenrobée. L'axe des ordonnées représente le pourcentage de passant cumulé (de 0 à 100), et l'axe des abscisses représente l'ouverture en mm (échelle logarithmique de 0,01 à 10). Trois courbes sont tracées : Stock France (bleu), AE RD129 (orange) et GNT-D129 (vert). Les courbes AE RD129 et GNT-D129 sont très proches, indiquant une granulométrie similaire, tandis que la courbe Stock France est légèrement plus fine.</p> | | |
| Teneur en liant | Sans objet | 5,27 % | |
| Module caractéristique | 222 MPA** | 425 MPA | |
| Valeurs de déflexion après mise en œuvre | 70 ^{1/100e} mm | 81 ^{1/100e} mm | 77 ^{1/100e} mm |
| Valeurs de déflexion après 1 an | 53 ^{1/100e} mm | 70 ^{1/100e} mm | 68 ^{1/100e} mm |
| *Stock Bêta : agrégats d'enrobés étudiés en laboratoire pour l'ensemble du projet ORRAP. **Obtenu sur GNT recomposée en laboratoire. | | | |

TABLEAU DE SUIVI – CHANTIER SUISSE

| | |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| Solutions | ORRAP 10 cm |
| Localisation | Wahlen, Canton de Bâle-Campagne, Suisse |
| Longueur de sections | 380 mètres |
| Largeur de voie | 5,50 mètres |
| Structure existante | 200 mm d'EB |
| Fraisage | ORRAP 10 cm |
| Couche de roulement | Béton bitumineux mince 4 cm |
| Travaux complémentaires | Élargissement à 6,00 mètres avec EB |
| Granulométrie non désenrobé* | |
| Granulométrie désenrobé* | |
| Teneur en liant | 4,67 % |
| Module caractéristique | 372 MPA |

*Stock Bêta : agrégats d'enrobés étudiés en laboratoire pour l'ensemble du projet ORRAP.

ANNEXE 2. ÉVALUATION DE LA DURABILITÉ

Pour l'évaluation de la durabilité, la méthode ORRAP est considérée comme un substitut à une couche d'assise en enrobé ou à une couche d'assise en GNT.

Les méthodes de construction suivantes sont donc variées (voir tableau 1) :


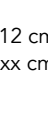






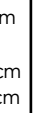









- méthode ORRAP: couche ORRAP sur chaussée existante sans (MO1, MO2) ou avec couche de roulement en enrobés (MO3, MO4);
- structure bitumineuse épaisse: couche d'assise et de roulement en enrobés, sur couche de forme granulaire, épaisseur de la couche d'assise: 8 cm (MC1) ou 11 cm (MC2);
- structure souple: GNT sur une chaussée existante sans (GNT1, GNT2) ou avec une couche de roulement en enrobés (GNT3, GNT4).

Comme il n'est pas possible à ce jour de se prononcer de manière fiable sur la durée de vie de la méthode ORRAP en raison de l'absence de résultats à long terme, la durée de vie de la couche ORRAP et, le cas échéant, de la couche de roulement en enrobés, n'est pas connue. Une variation de la durée de vie comparative est effectuée avec une couche granulaire non liée. Les durées de vie suivantes sont prises en compte :

- scénario pessimiste: 10 ans pour la couche ORRAP, sans (MO1) et avec couche de roulement en enrobés (MO3) et GNT sans (GNT1) et avec couche de roulement en enrobés (GNT3);
- scénario optimiste: 30 ans pour la couche ORRAP, sans (MO2) et avec couche de roulement en enrobés (MO4) et GNT sans (GNT2) et avec couche de roulement en enrobés (GNT4). Il est retenu une durée de vie de 15 ans pour la couche de roulement en enrobés; les dommages supposés causés à la couche ORRAP ou à la couche GNT ne se produiront que plus tard en raison de la durée de vie plus longue de la structure.

Le cycle de vie partiel est défini comme 30 ans, les calculs prenant en compte les travaux de construction de l'année 0 et de l'année 30.

Tableau 5 / Structures examinées

| | Méthode ORRAP (MO) | | | | Méthode conventionnelle (MC) | | Graves non traitées (GNT) | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | MO1 | MO2 | MO3 | MO4 | MC1 | MC2 | GNT1 | GNT2 | GNT3 | GNT4 |
| Hypothèse de durée de vie en années |  12 cm xx cm |  12 cm xx cm |  4 cm 12 cm xx cm |  4 cm 12 cm xx cm |  4 cm 8 cm xx cm |  4 cm 11 cm xx cm |  12 cm xx cm |  12 cm xx cm |  4 cm 12 cm xx cm |  4 cm 12 cm xx cm |
| Couche de roulement  | - | - | 10 a | 15 a | 15 a | 15 a | - | - | 10 a | 15 a |
| Couche ORRAP  | 10 a | 30 a | 10 a | 30 a | - | - | - | - | - | - |
| Couche bitumineuse  | - | - | - | - | 30 a | 30 a | - | - | - | - |
| GNT  | - | - | - | - | - | - | 10 a | 30 a | 10 a | 30 a |
| Chaussée existante  | | | | | | | | | | |
| Sol support  | | | | | | | | | | |
| Enduit  | | | | | | | | | | |
| Émulsion de bitume  | | | | | | | | | | |

Les limites du système, qui servent de base à l'évaluation des différentes structures, comprennent les modules suivants :

- extraction de matières premières ;
- transports ;
- production ;
- mise en œuvre.

Tous les résultats suivants sont déterminés par m² de surface de route, mais les valeurs des tailles de lot typiques pour les mesures d'entretien sont utilisées comme base de calcul.

La méthodologie de calcul et les variables d'entrée sont documentées en détail dans le rapport de recherche du projet ORRAP.

/// APPROCHE ENVIRONNEMENTALE

// CONSOMMATION EN ÉNERGIE PRIMAIRE

Lors de la détermination de la consommation en énergie, trois évaluations sont effectuées :

Figure 11 : comparaison de la consommation en énergie uniquement pour l'entretien avec la préparation du matériau ORRAP dans une installation de mélange :

Le processus prépondérant pour la consommation en énergie est la production d'enrobés à chaud (voir MC1 et MC2). Pour les variantes MO3, MO4, GNT3 et GNT4, un mélange en enrobés est nécessaire en couche de roulement :

- la consommation en énergie pour l'extraction des granulats et du liant est très faible pour la couche ORRAP (voir MO1 et MO2). Les variantes MO3 et MO4 nécessitent des granulats et un liant pour la couche de roulement en enrobés, pour laquelle la consommation en énergie est semblable aux variantes MC1 et MC2 ;
- une économie de consommation en énergie de plus de 75 % peut être réalisée malgré la durée de vie réduite pour MO1 (10 ans) par rapport à MC1. Avec une durée de vie plus importante (MO2), la consommation en énergie peut être réduite de manière significative ;
- la raison de la différence de consommation en énergie de facteur 3 entre MO1 et MO3 se trouve dans la couche de roulement en enrobés qui doit être renouvelée tous les 10 ans. L'augmentation de la consommation en énergie de GNT1 par rapport à MO1, par exemple, est due à l'extraction des matières premières.

Figure 12 : comparaison de la consommation en énergie pour l'entretien avec le traitement du matériau ORRAP dans une centrale et considération supplémentaire de la consommation en énergie liée au trafic de déviation (longueur de la déviation : 10 km, 2 jours de neutralisation pour chaque couche d'assise ou renouvellement de la couche de roulement ; 4 jours de blocage pour la structure entière ; 400 voitures et 40 PL par jour) :

- la consommation en énergie doit être prise en compte dans toutes les phases de mise en œuvre.

Cependant, elle est généralement inférieure à la consommation en énergie utile pour la production ou le transport de matériaux ;

- la consommation en énergie peut être particulièrement importante dans le cas de cycles de renouvellement courts et de revêtements en enrobés (voir MO3 et GNT3).
Si aucune couche de roulement en enrobés n'est nécessaire et qu'une durée de vie de 30 ans est obtenue avec la méthode ORRAP, son influence est nettement plus faible.

Figure 13 : comparaison de la consommation en énergie pour les mesures de maintenance et considération supplémentaire de la consommation en énergie du trafic de déviation avec l'hypothèse supplémentaire que le matériel pour la méthode ORRAP doit seulement être livré sur le chantier avant la première installation. À chaque renouvellement, la couche ORRAP existante est re-traitée en place, ce qui évite le transport de matériaux :

- cette hypothèse donne aux structures ORRAP un avantage plus important que les structures bitumineuses épaisses en termes de consommation en énergie, car les transports sont la principale source de consommation en énergie pour la construction de la couche ORRAP ;
- la différence de consommation d'énergie pour les structures ORRAP par rapport à une GNT augmente en raison du transport réduit des matériaux ORRAP.

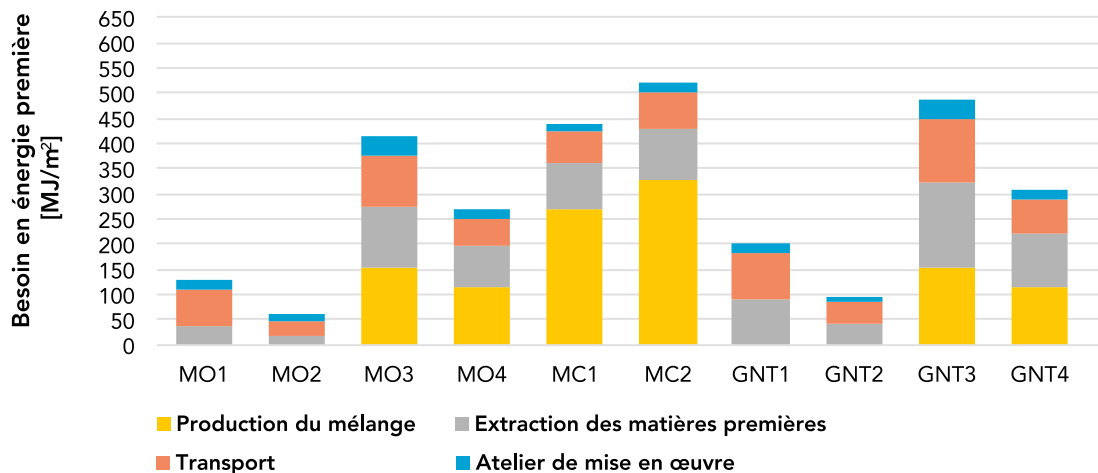


Figure 11 / Consommation en énergie pour la construction des structures définies dans le tableau 5

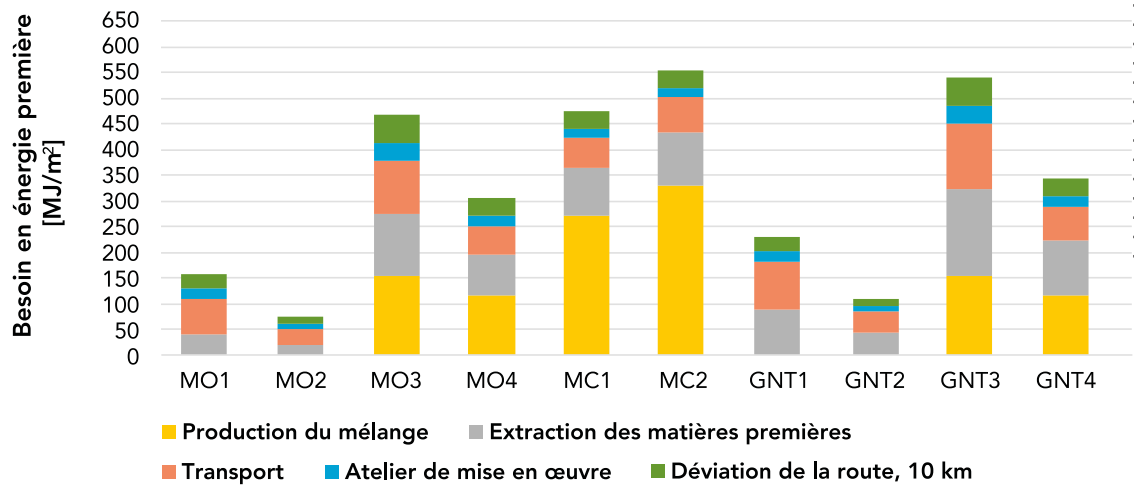


Figure 12 / Consommation en énergie pour la construction des structures définies dans le tableau 5 et consommation en énergie liée à la déviation du trafic pendant les travaux

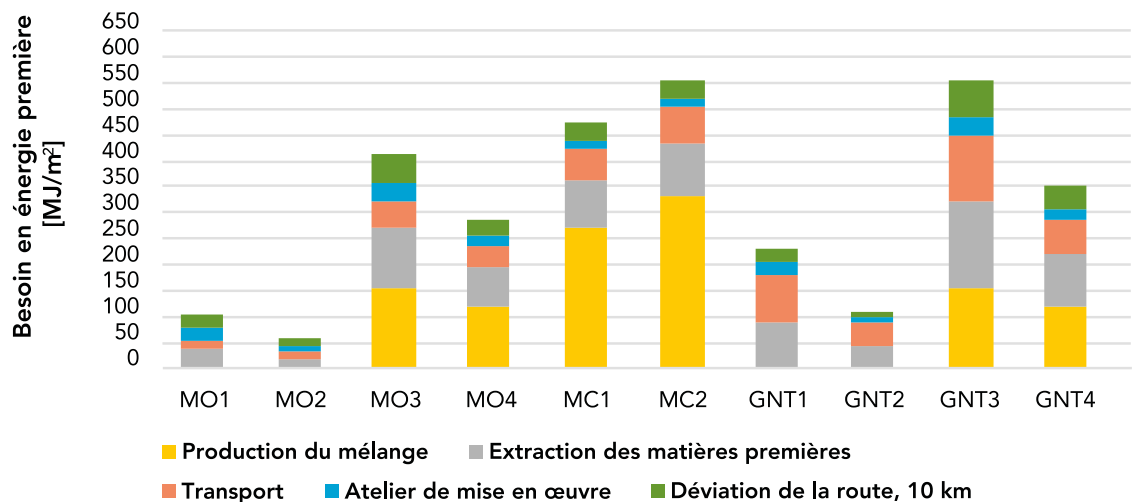


Figure 13 / Consommation en énergie pour la construction des structures définies dans le tableau 5 et consommation en énergie liée à la déviation du trafic pendant les travaux; sans transport (retraitement en place) du matériau ORRAP pendant les phases de renouvellement avec retraitement en place

// CONSOMMATION EN RESSOURCES NATURELLES

La figure 14 indique, pour chaque scénario, la quantité de matériaux mis en œuvre et déconstruits. Une distinction est faite entre les matériaux de construction primaires et secondaires. Les matériaux de construction primaires sont généralement des ressources naturelles qui sont utilisées sans traitement en dehors de leur extraction. Dans la présente étude, les matériaux de construction primaires considérés sont le bitume et les granulats naturels utilisés en premier lieu. Les matériaux secondaires, en revanche, sont des matériaux réutilisés. Dans cette étude, il s'agit des agrégats d'enrobés (AE). La réutilisation des AE permet d'économiser les ressources naturelles et de réduire l'augmentation des stocks. En partant de l'hypothèse que les matériaux de construction primaires sont toujours utilisés pour construire les

couches de GNT, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- le facteur décisif pour une évaluation positive est une faible demande en matériaux de construction primaires. Dans ce contexte, tous les scénarios ORRAP sont systématiquement positifs par rapport aux scénarios GNT. Les scénarios MO1, MO2 et MO4 sont également positifs par rapport aux scénarios MC1 et MC2 en raison de la demande plus faible de matériaux de construction primaires ;
- en raison de la couche de roulement en enrobés combinée à une durée de vie réduite, plus de matériaux de construction primaires sont nécessaires pour MO3 que pour MC1 et MC2 ; l'avantage de la forte demande en matériaux de construction secondaires d'MO3 perd du poids ;
- l'utilisation d'AE est plus importante avec la méthode ORRAP qu'avec la structure bitumineuse épaisse. Toutefois, cela ne conduit à une réduction des stocks de matériaux AE existants que lorsque la couche ORRAP est produite pour la première fois, car le matériau nécessaire peut être réutilisé lors du renouvellement de la couche ORRAP. Étant donné qu'aucun matériau de recyclage n'est utilisé pour la couche en GNT dans les hypothèses retenues, l'utilisation d'agrégats d'enrobés dans la méthode ORRAP est positive par rapport à la mise en œuvre avec une couche GNT.

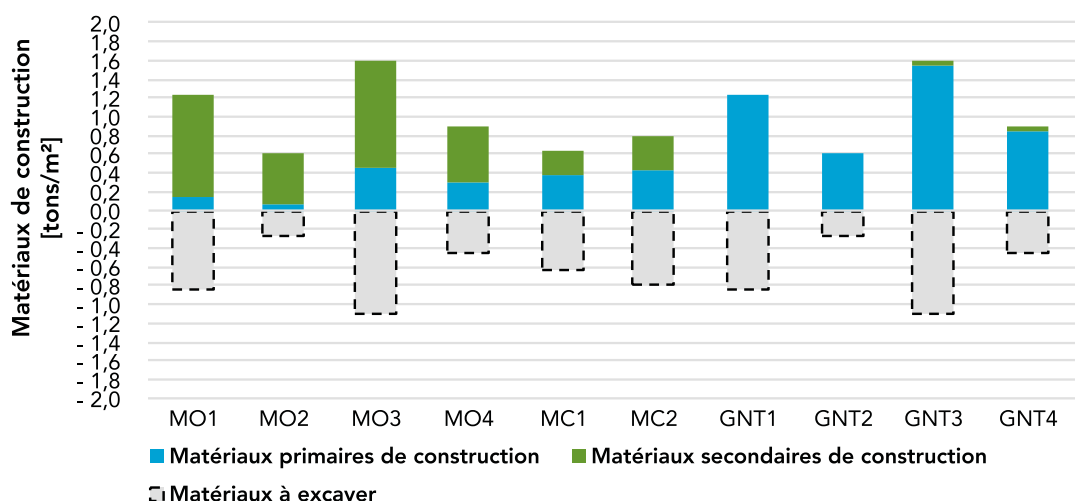


Figure 14 / Quantités de matériaux à mettre en œuvre et à déconstruire pour les structures définies dans le tableau 5

/// APPROCHE ÉCONOMIQUE

Les chiffres suivants comparent les coûts de construction, calculés selon la méthode de la valeur en capital, sur une période de 30 ans, sur la base des prix unitaires allemands. Tous les coûts d'entretien futurs ont été ajustés jusqu'en 2019 en se basant sur l'hypothèse d'un taux d'actualisation de 3 % par an. Les coûts d'utilisation et les coûts de tiers attribuables aux mesures ne sont pas inclus. Lors de la détermination des coûts, deux évaluations sont effectuées :

Figure 15 : comparaison des coûts avec la préparation du matériau ORRAP dans une centrale :

- les principaux coûts sont imputables aux matériaux de construction. Les coûts supplémentaires des matériaux entre, par exemple, MO1 et MO3 doivent être imputés à la couche de roulement en enrobés ;

- par rapport aux structures en GNT, les structures ORRAP ne présentent que des avantages financiers mineurs ;
- les coûts totaux les plus bas peuvent être atteints avec MO2. Cela est dû en partie à la suppression de la couche de roulement en enrobés et à la longue durée de vie de 30 ans. Par rapport aux structures MC1 et MC2, des économies importantes peuvent être réalisées avec les structures MO2 ;
- la courte durée de vie de 10 ans et l'existence d'une couche de roulement en enrobés entraînent une augmentation significative des coûts pour MO3 par rapport au MC1 et MC2.

Figure 16 : comparaison du coût avec l'hypothèse que le matériau pour la méthode ORRAP ne doit être livré sur le chantier qu'à la première utilisation et peut être réutilisé en place lors du renouvellement de la couche ORRAP ; ceci réduit le transport de matériaux :

- la réduction des transports de matériau ORRAP entraîne une réduction des coûts, en particulier pour MO1 et MO3. Ceci est lié aux remplacements fréquents résultant des faibles durées de vie retenues ;
- la différence de coûts pour la structure ORRAP par rapport à une GNT augmente en raison de la réduction des transports de matériaux ORRAP, en particulier pour MO1 et MO3.

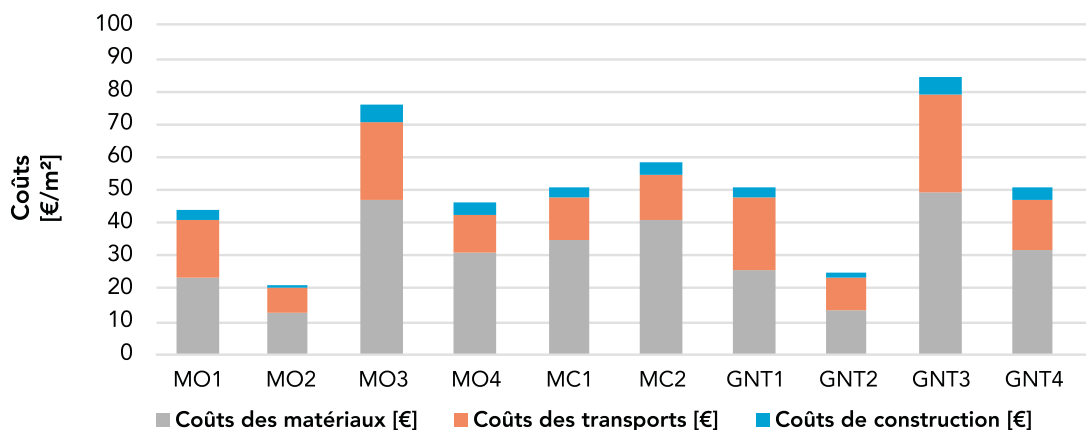


Figure 15 / Coûts de construction des structures définies dans le tableau 5, sur la base des prix unitaires allemands

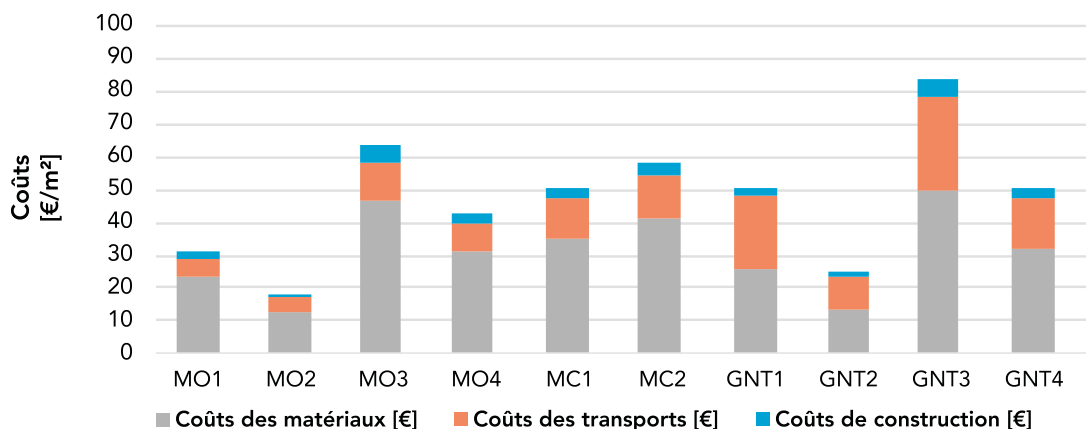


Figure 16 / Coûts de construction des structures définies dans le tableau 5, sans transport du matériau ORRAP pendant les phases de renouvellement, sur la base des prix unitaires allemands

// ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE SUISSE

L'étude suisse était basée sur :

- l'expérience suisse en matière de constitution des couches routières ;
- l'inventaire suisse des routes nationales dans Ecoinvent ;
- la structure de la section expérimentale réalisée en Suisse en 2018 ;
- les données énergétiques du projet de recherche suisse Planet.

Le scénario suisse ORRAP est donc similaire au scénario allemand MO4-MC1 (**tableau 6**). Le scénario suisse, contrairement au scénario allemand, réduit l'épaisseur de la couche d'assise, pour tenir compte de la capacité portante plus importante de la couche ORRAP.

Tableau 6 / Examen des structures pour l'évaluation suisse

| | Suisse | | Allemagne | |
|---------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| | ORRAP | Référence | MO4 | MC1 |
| Couches considérées (cm) | Couche de roulement 4, ORRAP 10, couche de forme 35 | Couche de roulement 4, couche d'assise 6, couche de forme 45 | Couche de roulement 4, ORRAP 12, pas de couche de forme considérée | Couche de roulement 4, couche d'assise 8, pas de couche de forme considérée |
| Cycle de vie (années) | SC 15, BC 40, SB 100 | SC 15, BC 40, SB 100 | SC 15, BC 30 | SC 15, BC 30 |

Les influences environnementales ont été analysées en utilisant la méthode d'agrégation de la rareté environnementale, qui est basée sur la politique environnementale suisse. En outre, les émissions de gaz à effet de serre ont été calculées à titre de comparaison avec l'Allemagne.

Points d'impact environnemental par mètre et par an

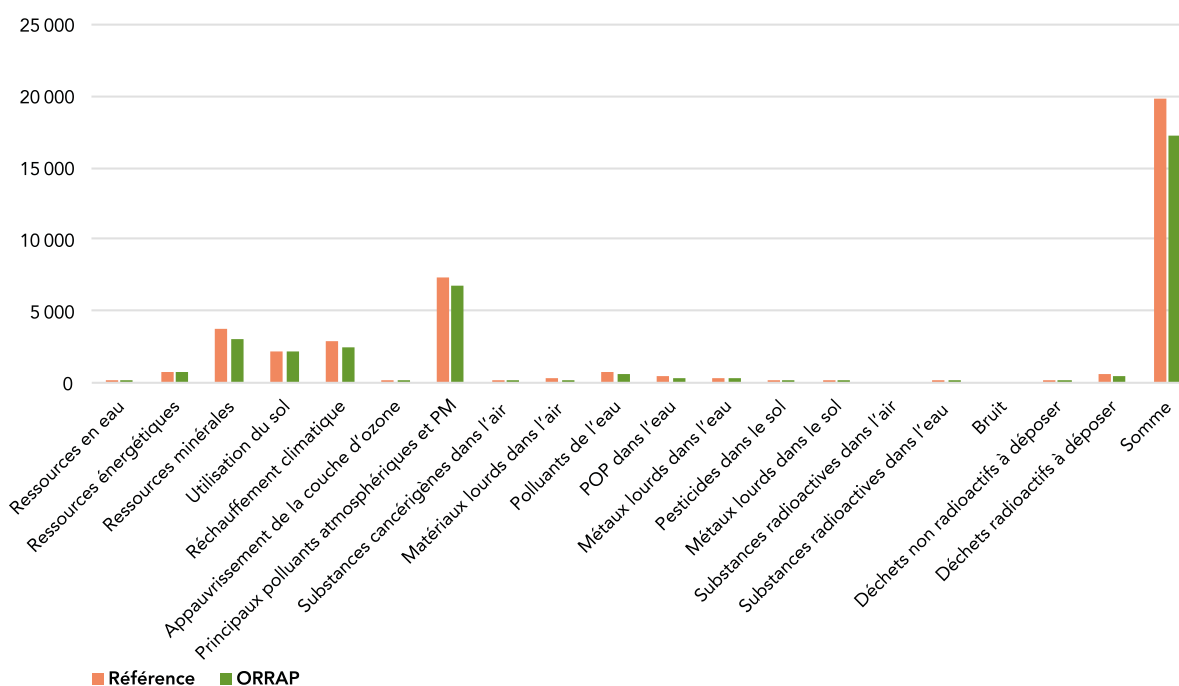


Figure 17 / Comparaison de la rareté environnementale d'ORRAP et d'une méthode de référence

La rareté environnementale d'ORRAP est de 2500 points inférieure à la référence, soit environ 12 %. Le potentiel de réchauffement climatique d'ORRAP est inférieur de 17 % à la référence. Cela peut être comparé à la différence d'énergie primaire entre MO4 allemand et MC2 qui est d'environ 45 % (figure 12).

L'inventaire et le calcul peuvent influencer non seulement les résultats relatifs entre les scénarios ORRAP et de référence, mais aussi les résultats absolus. Les résultats absolus du potentiel de réchauffement climatique pour une couche de surface de 3 cm, une couche de base de 5 cm et une couche de base de 45 cm montrent une grande différence entre les résultats du FHNW et de la HsKa (facteur 2,4). La différence entre les résultats de la couche de surface de HsKa et du projet suisse Planet est beaucoup plus faible (facteur 1,2).

// ÉVALUATION DES COÛTS EN SUISSE

Le coût moyen des couches ORRAP et de la structure de référence ont été fournis par le canton d'Argovie. Dans l'hypothèse du cycle de vie ci-dessus, le coût de la mise en œuvre de la structure ORRAP devrait être légèrement plus élevé (jusqu'à 20 %) en raison de l'épaisseur plus importante et donc du coût plus élevé de la couche de base de l'ORRAP par rapport à une couche de base régulière. Cette différence ne peut être compensée par une réduction de l'épaisseur de la couche de base, car celle-ci a une durée de vie élevée et est moins coûteuse.

ANNEXE 3. CONSULTATION

/// ÉLÉMENTS POUR LA CONSULTATION DES ENTREPRISES

En préambule, l'utilisation du produit ORRAP est soumise à une acceptation environnementale et sanitaire. L'utilisation d'un tel produit ne peut être envisagée en cas de présence d'amiante, de concentration trop élevée de HAP ou même d'hydrocarbures (voir tableau 2).

/// DOSSIER DE CONSULTATION DES OPÉRATEURS ÉCONOMIQUES (DCOE)

Le DCOE peut favoriser l'utilisation de la technique ORRAP par rapport à une GNT classique. Dans ce cas, elle doit utiliser les mêmes exigences techniques et d'utilisation que pour une GNT.

Les différences entre les deux produits, principalement en ce qui concerne les constituants et leurs caractérisations, peuvent être traitées soit spécifiquement dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP) comme solution de base, soit dans le règlement de consultation (RC) avec une variante autorisée s'ouvrant sur les matériaux constitutifs de la GNT.

Le choix du matériel de mise en œuvre est laissé à l'appréciation de l'entreprise chargée de l'exécution des travaux, en fonction de son équipement et de son savoir-faire. Dans le cadre de cette étude, les deux types de matériels ont été évalués (niveleuse et finisseur) sans qu'une différence ait été constatée dans la difficulté d'application.

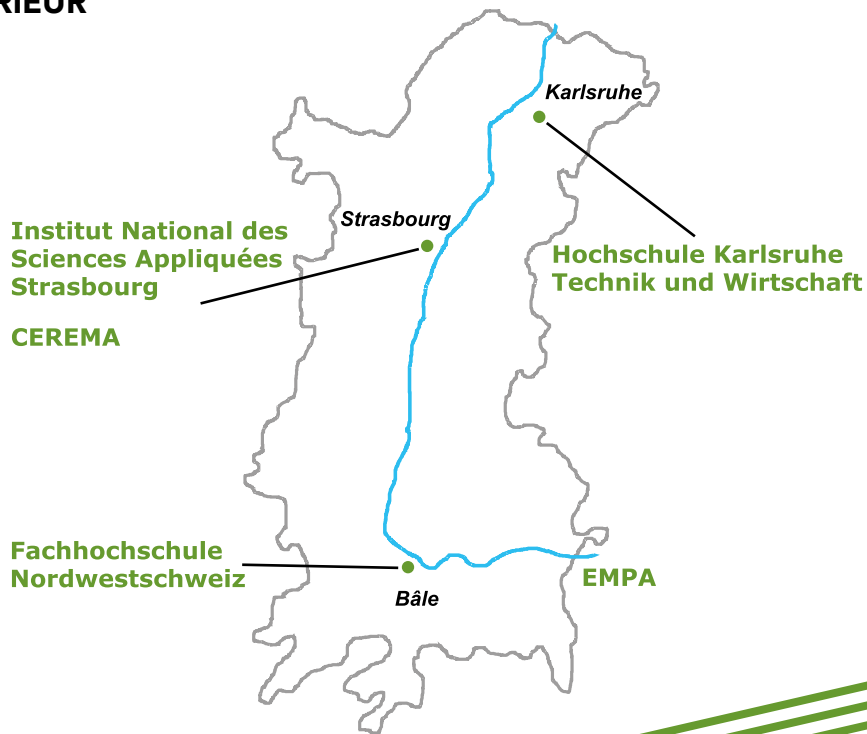
Si nécessaire, les contrôles de qualité peuvent être adaptés en fonction de la nature et des enjeux du chantier.

Une adaptation des cahiers des clauses administratives particulières (CCAP) peut également être envisagée afin de régler d'éventuels litiges en cas de défauts constatés.

Il est conseillé de prévoir dans le détail estimatif (DE) et le bordereau de prix unitaires (BPU) un prix spécifique pour la construction d'une couche de roulement en enrobé. Cette ligne, qui est facultative si le matériau sur le chantier n'évolue pas, permet de se dispenser de tout prix nouveau en cas de besoin.



LE RHIN SUPÉRIEUR



CONTACT

Coordinateur scientifique
Cyrille CHAZALLON
cyrille.chazallon@insa-strasbourg.fr
www.orrapp.org



Dépasser les frontières :
 projet après projet
 Der Oberrhein wächst zusammen,
 mit jedem Projekt.



Fonds européen de développement
 régional (FEDER)
 Europäischer Fonds für regionale
 Entwicklung (EFRE)



Schweizerische Eidgenossenschaft
 Confédération suisse
 Confederazione Svizzera
 Confederaziun svizra

Swiss Confederation



KANTON AARGAU



Partenaires co-financiers



Partenaires associés

