

**DES SOLUTIONS ÉCONOMES EN ÉNERGIE ET FAVORABLES À
L'ENVIRONNEMENT POUR L'ENTRETIEN ROUTIER**
*ENERGIE- EN MILIEUVRIENDELIJKE OPLOSSINGEN VOOR HET
WEGENONDERHOUD*

PHILIPPE POILANE

Ingénieur assistance technique, Eurovia, Délégation Centre-Ouest

BRUNO TAILLIS

Ingénieur assistance technique, Eurovia, Délégation Sud-Ouest

FREDERIC DELFOSSE

Chargé d'affaires, Centre de Recherches Eurovia

BERNARD ECKMANN

Ingénieur, Direction Technique, Eurovia

Résumé / Samenvatting

La contribution présente une palette de produits qui non seulement possèdent une forte valeur ajoutée vis-à-vis des impératifs de développement durable mais répondent aussi parfaitement aux exigences techniques spécifiques à l'entretien routier. Une première gamme de produits, destinée aux chaussées à faible trafic, est constituée par des enrobés incorporant un liant fluxé avec une huile d'origine végétale. Sans émissions dans l'environnement, ils sont d'une grande flexibilité d'emploi (couches de roulement, de reprofilage, réparations localisées, application différée dans le temps), et se caractérisent par de faibles températures de fabrication et de mise en oeuvre (de 120°C à 40°C). Les techniques à l'émulsion prennent le relais pour des trafics plus importants. Des progrès constants dans la formulation des émulsions, ainsi que dans la maîtrise de l'enrobage et de la maniabilité vont sans doute donner un nouvel élan à ces techniques (bétons bitumineux pour couches de roulement, graves-émulsion « enrichies »).

De bijdrage stelt een aantal producten voor die niet alleen een grote toegevoegde waarde hebben m.b.t. de eisen van de duurzame ontwikkeling maar ook uitstekend aan de specifieke technische eisen van het wegenonderhoud voldoen. Een eerste reeks van producten, bestemd voor wegen met gering verkeer, bestaat uit bitumineuze mengsels vervaardigd met vloeibitumen uit plantaardige oliën. Niet alleen veroorzaken ze geen schadelijke emissies voor het milieu maar ze bieden ook een groot aantal toepassingsmogelijkheden (dek- en herprofileerlaag, lokale reparaties, uitgesteld aanbrengen) en worden gekenmerkt door lage mengsel- en aanbrengings-temperaturen (van 120°C t/m 40°C). Bij zwaarder verkeer worden eerder bitumenemulsiemengels gebruikt. De voortdurende ontwikkelingen in de formulering van emulsies, het beheersen van de omhulling van het mineraal aggregaat en de hanteerbaarheid zullen zonder twijfel een nieuwe impuls aan deze producten geven (asfaltbeton voor dekwegen, "verrijkte" grindzand/bitumenemulsiemengels).

Introduction

Dans le domaine routier, le recours à des techniques économes en énergie et favorables à l'environnement est souvent freiné par des craintes vis-à-vis de leur performance. L'entretien du réseau routier secondaire représente cependant un volume de travaux considérable pouvant tout à fait se satisfaire de produits alternatifs aux enrobés à chaud traditionnels. Dans ce domaine, notre contribution illustre tout d'abord les possibilités offertes par des enrobés tièdes à base de fluxants végétaux. Pour répondre aux impératifs énergétiques et environnementaux, c'est pourtant aux technologies basées sur l'émulsion qu'ont été consacrés les efforts les plus soutenus. L'utilisation de l'émulsion a longtemps été cantonnée aux graves-émulsion. Ces matériaux, à teneur relativement faible en bitume, sont le plus souvent réservés au reprofilage et doivent être revêtus par une couche de roulement appropriée. Les couches de roulement exigent des teneurs en liant plus élevées et posent de ce fait un tout autre défi. Il faut en effet réussir un parfait enrobage tout en assurant la maniabilité nécessaire à la mise en œuvre et au compactage. Nous allons montrer que les progrès significatifs que nous avons pu réaliser dans ce domaine nous permettent maintenant d'envisager de véritables alternatives aux enrobés à chaud traditionnels.

1. Enrobés à emploi différé pour chaussées souples à faible trafic

En 2005, l'entreprise a été sollicitée pour offrir des solutions d'entretien en enrobés pour les îles bretonnes. L'enrobé devant être fabriqué sur le continent et amené à destination par bateau, il fallait trouver un produit permettant un emploi différé dans le temps. Le délai de maniabilité nécessaire (environ 12 heures), a été obtenu grâce à l'utilisation d'une huile végétale plastifiante. Fabriqué à une température de 120°C dans un poste d'enrobage à chaud, l'enrobé a pu être appliqué jusqu'à une température minimale de 60°C. Ce produit ayant donné entière satisfaction, c'est tout naturellement que nous avons été amenés à développer une gamme complète répondant aux exigences spécifiques de l'entretien des voiries sous faible trafic.

2.1 Développement

L'entretien des chaussées souples à faible trafic se caractérise par des besoins multiples qui vont de la réparation localisée (nids de poule) à la réfection complète de la couche de roulement en passant par le simple reprofilage d'une chaussée déformée. Les quantités de matériaux ainsi mises en jeu sont très variables, ce qui explique l'intérêt des gestionnaires de ces réseaux pour des matériaux pouvant être stockées, et ce d'autant plus longtemps que les quantités à mettre en œuvre par opération sont faibles. Destinés à des chaussées souvent déformées et dégradées, les matériaux recherchés doivent également faire preuve de « souplesse ». L'utilisation d'un fluxant apparaît alors comme une voie naturelle pour satisfaire à cette double exigence. En fonction de la nature de l'entretien à réaliser (couche

de roulement, reprofilage, réparation ponctuelle) et du trafic attendu, la teneur en fluxant (et donc la stockabilité du matériau) ne peut cependant dépasser une certaine limite. Les considérations relatives à l'hygiène et la sécurité des travailleurs ainsi qu'à l'impact sur l'environnement nous ont également orientés vers des fluxants d'origine exclusivement végétale. L'optimisation de la nature et de la teneur en fluxant végétal, conjuguée à une adaptation des compositions granulaires, a permis de mettre au point une gamme complète d'enrobés d'entretien (VIASELF® Fv) répondant aux différents besoins :

- en couche de roulement, à emploi pouvant être différé jusqu'à 12 heures
- pour travaux de reprofilage, à emploi pouvant être différé jusqu'à 72 heures
- pour réparations ponctuelles, à emploi pouvant être différé jusqu'à 2 mois (stockage en tas) ou jusqu'à 1 an (conditionnement en sacs)

L'huile végétale a été sélectionnée en fonction de son pouvoir fluxant et de sa capacité à s'oxyder après mise en œuvre. La cinétique de montée en cohésion est en effet conditionnée par cette oxydation qui contribue à la rigidification du liant fluxé (alors que dans le cas de l'utilisation d'un fluxant volatil elle s'obtient par l'évaporation de celui-ci). Elle peut être accélérée par l'ajout d'un catalyseur (siccatif).

2.2 Couches de roulement - VIASELF® C Fv

Les enrobés d'entretien pour couches de roulement sont formulés comme des enrobés classiques pour couches de roulement de granularité 0/10. Avec un module de richesse de 3.7 à 3.9, leur teneur en liant se situe aux alentours de 5.5 %. Le liant utilisé est généralement un bitume pur de grade 70/100 avec une teneur en huile végétale allant de 8% à 10%, ce qui autorise des délais de mise en œuvre allant de 12h à 24h. L'incorporation d'un « siccatif » est nécessaire pour assurer une montée en cohésion au jeune âge suffisante. Ces enrobés peuvent être fabriqués dans des postes à chaud classiques à une température allant de 90°C à 120°C. L'application se fait au finisseur à des températures allant de 40°C à 100°C. Les épaisseurs de mise en œuvre sont de 4 à 5cm (80 à 100 kg/m²) avec application préalable d'une couche d'accrochage. Le compactage se fait avec des moyens identiques à ceux employés pour les enrobés à chaud.

Le domaine d'application privilégié concerne des routes à faible trafic (classes T5/T4 – maximum de 50 poids lourds en moyenne journalière annuelle), présentant le plus souvent une surface déformée et dégradée (faïençage). Le premier enrobé de ce type a été appliqué en octobre 2005 à Landévant dans le Morbihan (56). Les mesures effectuées sur des carottes prélevées à 8 mois et à 5 ans sont présentées dans le tableau 1. Elles montrent que les performances à 5 ans restent très proches de celles au jeune âge, ce qui tend à démontrer que le produit garde toute sa souplesse dans le temps. Ce résultat corrobore le bon comportement observé dans la pratique, à savoir l'absence de toute fissuration même sur des chaussées insuffisamment structurées et déformables.

	Valeurs à 8 mois	Valeurs à 5 ans
% vides moyen (gammadensimètre)	6.4	7.8
Module à 15°C-10Hz (compression diam.) - MPa	3929	4102

Tableau 1 : propriétés mesurées sur carottes

A ce jour, plus de 10 000 tonnes d'enrobés à emploi différé de ce type ont été produites et réalisées, principalement dans l'ouest de la France. Quelques exemples de réalisation dans le Morbihan (56), le Calvados (14), le Finistère (29) et la Doubs (25) sont listés ci-dessous :

- RD30 – Rue du chemin neuf à Sauzon (Belle-Ile-en-mer – 56) en 2006
- Cour de l'école primaire de Locmaria (Belle-Ile-en-mer – 56) en 2007
- Lotissement Le Plateau à Bangor (Belle-Ile-en-mer – 56) en 2009
- Voiries communales de l'Île aux Moines (56) en 2010
- Voirie communale et urbaines à Camors (56) en 2010
- Voiries urbaines et communales à Argences et St Ouen-du-Mesnil-Oger (14) en 2010
- Voiries communales à St-Allouestre (56), Ouessant (29) et Gilley (25) en 2011



Photos 1&2 : Réfection de la voirie communale à Gilley (25)

Après 6 ans d'expérience, la technique a constamment illustré :

- sa facilité de mise en œuvre, que ce soit avec des moyens mécaniques ou manuels,
- son large champ d'application : voiries secondaires, urbaines, parkings, ...
- son aptitude à restaurer, de façon durable, le revêtement de chaussées souples déformées et dégradées

Il est néanmoins utile de rappeler qu'il s'agit d'un enrobé destiné à l'entretien de chaussées souples sous trafic faible et pour lesquels l'expérience acquise concerne des climats ne présentant pas de chaleurs excessives. Toute utilisation allant au-delà de ce périmètre devra donc se faire avec prudence !

2.3 Travaux de reprofilage - VIASELF® R Fv

L'utilisation d'un bitume fluxé à l'huile végétale s'applique également avec succès pour des opérations de reprofilage. Il s'agit alors généralement d'un béton bitumineux 0/6 (module de richesse de 3.9 à 4.1) dont le liant (bitume 70/100 ou 160/220) incorpore jusqu'à 14% d'huile végétale avec, à nouveau, l'ajout d'un siccatif. Ces enrobés, fabriqués à une température de 90°C à 110°C, peuvent être stockés et appliqués dans un délai allant jusqu'à 72h. L'application se fait à des températures allant de 40°C à 80°C avec un mini finisseur ou FIR (Finisseur d'Intervention Rapide – voir photo 3) avec compactage au cylindre. Les dosages vont de 0 à 150 kg/m² (0 à 6cm), une couche d'accrochage n'étant pas nécessaire. Là encore, les trafics admissibles sont bien entendus faibles (moins de 50 poids lourds en moyenne journalière annuelle).



Photos 3 : Reprofilage au FIR

En 2010, dans la Mayenne (53) l'entreprise a ainsi mis en œuvre près de 3000 tonnes d'enrobés de ce type pour des travaux de reprofilage de rives sur routes départementales (RD235 à Evron, RD153 à Cossé-le-Vivien, ...).

2.4 Réparations - VIASELF® S Fv

Traditionnellement, les petites réparations localisées (rebouchage de nids de poule) se font à l'aide d'enrobés dits « stockables », le plus souvent réalisés à partir de bitumes fortement fluxés. Ces enrobés, stockés en tas, peuvent être utilisés sur des périodes allant de plusieurs semaines à quelques mois. Les fluxants végétaux, dont le point d'éclair est supérieur à 160°C, présentent dans ce cas un intérêt majeur compte-tenu des problèmes de sécurité posés par le stockage à chaud de liants incorporant un fort pourcentage de fluxants volatils dont le point d'éclair est souvent largement inférieur à 100°C. La nécessité de pouvoir stocker le matériau foisonné sur une longue durée interdit cependant le recours à un catalyseur de durcissement. Pour assurer un minimum de cohésion après mise en œuvre, il faut alors adapter la granulométrie du matériau. C'est ainsi que nous avons pu mettre au point des formules de type béton bitumineux 0/4 et 0/6 ouvert (passant à 2mm compris entre 18 et 22%, module de richesse de 3.9 à 4.1) sur base de bitume 70/100 à environ 20% de

fluxant végétal. Ces enrobés sont fabriqués à faible température (40°C à 100°C), ce qui est possible dans une centrale continue en profitant d'un tube chaud (brûleur coupé). Sous abri, ils peuvent être stockés jusqu'à 2 mois. Après mise en œuvre manuelle, ils sont damés à la main ou à la plaque vibrante. Depuis 2005, l'entreprise produit de 15 000 à 20 000 tonnes par an d'enrobés stockables de ce type, principalement dans l'ouest et le sud-est de la France.



Photo 4 : Réparations localisées



Photo 5 : remplissage de tranchée

Il est également important de mentionner ici deux applications particulièrement prisées :

- Une formule 0/14 utilisée pour le remblaiement des tranchées (photo 5), très facile de mise en œuvre et permettant une remise en circulation immédiate.
- Le conditionnement en sac de l'enrobé de finition (0/4), qui permet une conservation jusqu'à 1 an et utilisé notamment pour le petit entretien, les raccords, rebouchages de trous de carottage,

2.5 Impact environnemental

L'utilisation d'un fluxant d'origine végétale et l'abaissement très significatif des températures de mise en œuvre donnent à la gamme des VIASELF[®] Fv, de part l'utilisation de ressources renouvelables, la diminution des émissions de GES (gaz à effet de serre) et la réduction de la consommation énergétique, une haute valeur environnementale. Pour l'illustrer, nous pouvons nous appuyer sur les données calculées pour un enrobé de type C mis en œuvre sur 3cm d'épaisseur et qui, dans la pratique, s'est révélé équivalent en performance à la « solution de base ». Les hypothèses du calcul sont résumées ci-après :

- Solution de base : béton bitumineux fabriqué à 150°C à 5.5% de bitume 70/100, sur une épaisseur minimale de 5 cm.
- Solution alternative : enrobé fluxé de type C fabriqué à 100°C à 5.5% de bitume fluxé à 8% de fluxant végétal, sur une épaisseur minimale de 3cm.

Les deux enrobés sont supposés être fabriqués et livrés à partir du même poste d'enrobage. Les phases prises en compte dans ce calcul sont l'extraction des matières premières, les transports en amont et en aval du site de fabrication, la fabrication et la mise en œuvre. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 2 qui met en évidence les gains, de l'ordre de 45%, relatifs à l'épuisement des ressources non renouvelables, la consommation énergétique et les émissions ainsi que la diminution de la consommation en granulats.

Indicateur environnemental	Gain (%)
Epuisement des ressources (ADP) (kg equ. Sb)	44
Consommation en granulats	38
Consommation des ressources énergétiques	45
Emission de GES (kg CO2 equ.)	44

Tableau 2 : Indicateurs environnementaux caractéristiques

3 Bétons bitumineux à l'émulsion : la progression obstinée de l' ECOLVIA®

Si les enrobés à emploi différé décrits précédemment offrent un excellent bilan énergétique et environnemental pour l'entretien des réseaux de faible trafic, d'autres approches sont nécessaires dans le cas des routes plus fortement sollicitées. Toujours dans l'optique d'une minimisation des coûts énergétiques et de l'impact environnemental, la voie naturelle devient alors celle du recours à l'émulsion de bitume. En France, la technique la plus ancienne et la plus éprouvée est celle de la grave-émulsion. Il s'agit d'un enrobé 0/10 ou 0/14 de granulométrie continue formulée à partir d'émulsions cationiques à rupture lente. La teneur en bitume résiduel varie d'un minimum de 3.8% (graves-émulsion de type S pour des couches de base) à près de 4.5% (graves-émulsion de type R pour le reprofilage qui sont les plus largement utilisées). Lors de l'enrobage (malaxeur à double arbre horizontal), l'émulsion rompt préférentiellement sur les fines et le sable, formant ainsi un mastic servant de ciment aux gravillons qui, eux, ne sont que partiellement enrobés.

3.1 La problématique des enrobés à l'émulsion pour couches de roulement

Pour être utilisable en couche de roulement, un matériau doit être parfaitement enrobé, ce qui suppose des teneurs en bitume résiduel nettement plus importantes (de l'ordre de 5.5%) que dans le cas des graves-émulsion. Nous sommes alors confrontés à un problème technique majeur car il est souvent extrêmement difficile, sur la seule base de la formulation de l'émulsion, d'obtenir un enrobage parfait (notamment des gravillons) tout en maintenant une maniabilité suffisante pour le transport et la mise en œuvre. Une émulsion qui rompt trop rapidement lors de l'enrobage conduit à la formation de « boulettes » et à un enrobage

imparfait des gravillons. L'enrobage reste également imparfait lorsque la rupture est trop lente avec de plus une perte d'émulsion lors du transport. Le processus de rupture et de coalescence qui lui succède ne doit pas non plus être trop avancé lors de la fabrication car celui conduit à une montée en cohésion trop rapide, empêchant une mise en œuvre et un compactage corrects.

3.2 Le développement des bétons bitumineux à l'émulsion

Très tôt, l'entreprise s'est impliquée dans la recherche visant à mettre au point des méthodes de formulation et d'évaluation adaptées aux spécificités des enrobés à l'émulsion. Comme évoqué plus haut, il faut en effet pouvoir apprécier l'aptitude à l'enrobage, la maniabilité ainsi que la montée en cohésion du matériau. La participation au projet européen OPTEL^(ref.1), puis aux actions de recherche et de suivi dans le cadre de l'USIRF (Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française) et du partenariat USIRF/IFSTTAR^(ref.2) nous a ainsi permis d'acquérir et de valider un certain nombre d'outils qui se sont révélés être des auxiliaires précieux pour la mise au point de nos produits.

Pour importants qu'ils soient, les outils de laboratoire ne permettent cependant pas d'appréhender l'ensemble des critères qui conditionnent la performance in-situ d'un béton bitumineux à l'émulsion. Dans la pratique, en effet, ce qui importe en premier lieu, c'est l'aspect et la tenue au jeune âge. Un aspect « gris » et des rejets de gravillons, même s'ils n'affectent pas la pérennité de l'enrobé, sont perçus très négativement par le maître d'ouvrage. La solution « de facilité » consiste alors à favoriser l'enrobage et, surtout, la maniabilité et l'aptitude au compactage en ayant recours à un bitume fluxé. Le taux de fluxage souvent important (au-delà de 10%) permet alors de belles réalisations, bien adaptées, de par leur souplesse, à la réhabilitation de chaussées dégradées. Ces solutions, qui offrent également un certain délai de mise en œuvre, restent cependant limitées aux trafics faibles (moins de 50 poids lourds en moyenne journalière annuelle). Nous appliquons actuellement près de 50 000 tonnes par an d'enrobés de ce type, essentiellement dans le Sud-Ouest de la France.

S'interdire l'utilisation de fluxants et accéder ainsi à l'entretien de voiries sous des trafics nettement plus importants a été l'ambition originelle de l'entreprise. Malgré quelques succès, cette technique a cependant rapidement montré ses limites. Comme évoqué plus haut, le bon compromis entre qualité d'enrobage et maniabilité est en effet très difficile à trouver et ne s'est révélé être possible qu'avec un nombre limité de granulats. Pour se donner les bases d'un véritable développement pour des trafics plus élevés, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il nous fallait repenser notre approche, ce que nous avons fait selon les deux lignes directrices suivantes :

- Optimiser la qualité de l'enrobage en travaillant sur les paramètres opératoires à la centrale d'enrobage. Même en optimisant la formulation de l'émulsion, une opération

d'enrobage « simple », ne donne en effet que rarement un résultat acceptable. Les centrales d'enrobage actuelles offrent maintenant de multiples possibilités, telles que la dissociation des fractions granulaires (deux bandes d'alimentation distinctes pour le sable et les gravillons) ainsi que la possibilité d'introduire l'émulsion (voire 2 émulsions différentes) en différents points tout au long de l'arbre de malaxage. Il devient alors possible de véritablement « piloter » le processus d'enrobage et d'obtenir de bons résultats avec une palette beaucoup plus large de granulats, même « difficiles ». Cela implique bien sûr, pour chaque type de granulat, de compléter les études de formulation au laboratoire par une étape de mise au point du processus d'enrobage à la centrale de fabrication.



Photo 6 : centrale d'enrobage à l'émulsion

- S'autoriser le recours à un fluxant, mais en quantité limitée ($\leq 5\%$ par rapport au bitume résiduel) et seulement en tant qu'agent de maniabilité. Il s'agit simplement de donner le « coup de pouce » permettant à un mélange bien enrobé d'être mis en œuvre et compacté aisément en évitant un ramollissement excessif du liant. La quantité relativement faible de fluxant permet en outre d'envisager une montée en cohésion suffisamment rapide, même avec un fluxant d'origine végétale. Ainsi formulé avec un fluxant d'origine renouvelable et non volatil, cet enrobé de dernière génération retrouve alors l'intégralité des atouts environnementaux des techniques à l'émulsion.

Nous travaillons selon cette approche depuis deux ans par une série de chantiers expérimentaux réalisés dans le Sud-Ouest et l'Ouest de la France et qui doivent nous permettre d'évaluer le potentiel de ce nouveau type d'enrobés en fonction des granulats et des outils d'enrobage disponibles. S'il est encore trop tôt pour en tirer des conclusions définitives, les premiers résultats sont très encourageants. L'enrobé présente un bel aspect, sans aucun rejet au jeune âge. Les teneurs en vides mesurées sur carottes se situent généralement entre 10% et 15%, ce qui est très satisfaisant pour des bétons bitumineux à froid alors que les premières mesures de module au jeune âge (quelques mois) donnent des valeurs au moins deux fois plus élevées que celles obtenues avec les enrobés fluxés de première génération. Le produit a parfaitement répondu à nos attentes pour ce qui est de la maniabilité et de la mise en œuvre. La maîtrise de l'uni demande néanmoins, comme pour tout enrobé à l'émulsion, une certaine pratique de la part des équipes d'application (réglages des finisseurs et atelier de compactage) pour prendre en compte le caractère plus « frottant » (par rapport aux enrobés à chaud) du matériau.



Enrobés à l'émulsion ECOLVIA® de dernière génération

Photo 7 : Plateforme de Plestan (22) – 07/12

Photo 8 : St-Sylvestre sur Lot (47) – 09/12

4 Conclusion

Les exigences nouvelles imposées par la recherche d'un développement durable peuvent paraître rédhibitoires dans un contexte économique de plus en plus difficile pour l'entretien routier. A condition de diversifier nos produits en les adaptant aux mieux aux exigences spécifiques de chaque type d'entretien, il est cependant possible de trouver des solutions répondant à ces nouveaux impératifs tout en restant techniquement satisfaisantes. Les enrobés à emploi différé à base de fluxant végétal en sont un bel exemple, d'autant plus intéressant que leur développement est facile à partir des équipements existants. Les enrobés à l'émulsion pour couches de roulement, qui visent des performances plus élevées, sont plus exigeants vis-à-vis des matériaux et matériels d'enrobage. Les résultats obtenus récemment nous laissent maintenant envisager une généralisation (applicabilité à un grand nombre de granulats) réelle de la technique (à condition bien entendu que l'outil industriel soit disponible) sur des routes supportant un trafic allant jusqu'à la classe T2 (jusqu'à 300 poids lourds en moyenne journalière annuelle). Toujours dans l'idée d'une adéquation des produits aux performances strictement requises, nous pouvons également citer les approches consistant à étendre le champ d'application des grave-émulsions en augmentant leur teneur en liant. Bénéficiant elles aussi d'une meilleure maîtrise des procédés d'enrobage, ces « grave-émulsions enrichies » sont sans doute promises à un bel avenir.

(Ref. 1) J.J. Potti, D. Lesueur, B. Eckmann – Vers une méthode rationnelle de formulation des enrobés à froid : les apports du projet OPTTEL – Revue générale des routes et des aéroports (RGRA) n° 805, avril 2002.

(Ref. 2) Enrobés à l'émulsion : vers une méthode complète de formulation - Emulsified asphalt mixes : towards a complete design method - Revue générale des routes et des aéroports (RGRA) n° 887-889-890, 2010-2011 (N° special – special issue).