

ENROBÉS A MODULE ÉLEVÉ AU CHILI

Ángel Menéndez Quirós
Centro Desarrollo Investigación, Bitumix-Probisa, (Eurovia) Chili

RÉSUMÉ

Les enrobés constituent les couches de chaussée qui ont la majeure incidence dans le comportement des routes, rues et plateformes industrielles. Un enrobé est un matériau complexe qui peut être utilisé comme couche de roulement, comme couche de liaison et comme grave bitume pour assise, pour supporter les charges exercées par le trafic. Les EME augmentent la capacité de résister de l'ensemble des couches bitumineuses et ainsi leur tenue dans le temps. Il existe donc ainsi une grande variété d'enrobés en fonction de leur cas d'application et des sollicitations exercées. C'est dans ce contexte que sont en train d'être développés au Chili des enrobés Anti Ornièrant et Anti Poinçonnement de Module Elevé pour répondre aux nouvelles exigences du marché. Pour développer ces enrobés de dernière génération, en fonction des propriétés recherchées, des nouvelles méthodes d'études d'enrobés se sont générés en France par le LCPC (Laboratoire des Ponts et Chaussées) et le programme SHRP (Strategic Highway Research Program) des Etats Unis. Au Chili Eurovia, à travers sa filiale Bitumix, a développé la méthode MCDC (Metodo Combinado de Diseño y Comportamiento). Le concept, né en France, consiste à multiplier par plus de deux le module de rigidité. Avec ces caractéristiques et leur comportement supérieur, les EME doivent être utilisés en considérant à chaque fois le cas particulier du projet. Une structure d'autoroute est en effet différente d'une aire de stockage de conteneurs d'un port maritime. De la même façon les niveaux de service seront différents dans un cas ou dans un autre; l'un privilégiant les conditions de sécurité à vitesse élevée sans apparition de fissures, et l'autre considérant la résistance au poinçonnement aux charges statiques ponctuelles et aux braquages brusques des grues. Dans le premier cas il est nécessaire de réaliser une couche de roulement très mince pour son rôle fonctionnel et de protection aux agressions du climat pendant que dans le second cas l'on nécessite une couche de roulement qui résiste au poinçonnement. Selon le problème à résoudre, on utilisera des bitumes modifiés ou spéciaux avec différents types de polymères ou additifs. Le principe fondamental est de concevoir un enrobé très dense avec une teneur en liant forte et une viscosité très élevée. Leur mise en oeuvre reste la même que pour les enrobés traditionnels, seul changent les températures de fabrication et de mise en oeuvre.

L'exposition présentera ces enrobés avec la méthode d'étude utilisée. On montrera quelques chantiers réalisés au Chili.

1. HISTORIQUE

Les Enrobés à Module Élevé ont été développés en France au début des années 80, pour éviter les phénomènes de fissuration provoqués par les couches de base en matériaux hydrauliques des structures semi rigides, tout en conservant les mêmes capacités structurales. Ce type d'enrobé se caractérise par un module de rigidité élevé, ceci en utilisant un bitume très dur spécial, et par sa résistance à la fatigue supérieure à celle d'un enrobé classique. Depuis son développement, ce nouveau type d'enrobés a été appliqué avec succès comme couche structurelle de chaussées neuves et comme renforcement en cas d'insuffisance de capacité structurelle de chaussées existantes.

Actuellement il existe les enrobés à module élevé pour assise (EME) et le béton bitumineux à module élevé pour couche de roulement (BBME). Devant leur diffusion très rapide, ils ont été normalisés par les normes NFP 98-140 d'octobre 1992 pour les EME et NFP 98-141 de novembre 1993 pour les BBME. Ils ont été intégrés par le SETRA dans le Manuel de "Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées" de décembre 1994 et confirmés dans de "Catalogue des Structures Types de Chaussées neuves" de 1998 du SETRA. Avant cela, ils ont été adoptés dans le "Manuel de Conception des Chaussées d'Autoroutes" de Scetouroute en 1994. Plus de 10 millions de tonne ont été mis en oeuvre en France et les quantités commencent à être représentatives notamment en Espagne et en Allemagne.

2. CARRACTERISTIQUES MECANQUES DES EME et BBME

L'importance de la méthode d'étude d'un enrobé est déterminante. Dans beaucoup de pays c'est la méthode Marshall qui prédomine encore. De cette façon l'on peut pas différencier les enrobés par leur Module, paramètre essentiel pour pouvoir dimensionner les chaussées et de pouvoir comparer les différents types d'enrobés entre eux. Il en va de même pour le comportement à l'orniérage, la résistance à la tenue à l'eau et la résistance à la fatigue.

Pour pouvoir développer cette nouvelle génération d'enrobé au Chili il a fallu tout d'abord adapter une méthode d'étude propre à la réalité du pays en fonction des équipements déjà existants dans les différents laboratoires de l'administration, des universités et des entreprises.

Bitumix, filiale chilienne d'Eurovia a mis au point la méthode MCDC, Metodo Combinado de Diseño y Comportamiento. Ce développement c'est fait dans le cadre d'un projet d'innovation financé en partie par l'Etat Chilien à travers d'un projet Innova Corfo. Cette méthode d'étude des enrobés est inspirée de la méthode normalisée en France par le LCPC. L'idée étant de conserver la "philosophie" mais avec des équipements différents et moins onéreux que ceux utilisés en France. On définit ainsi les critères suivants:

- Dosification: étude Marshall et PCG
- Orniérage et comportement à l'eau: Orniéreur Hambourg à 50°C à l'eau
- Module de rigidité et fatigue: Presse NU 14 de NAT

3. NORMALISATION

En Europe les normes concernant les enrobés inclues les EME et BBME, celles-ci sont donc applicables à l'ensemble de la communauté européenne. Chaque pays, sur la base de ces normes doit un document d'application de ces normes en indiquant ses préférences comme par exemple type d'essai, type d'enrobés etc...Il en est pas de même dès que l'on quitte cette communauté.

Au Chili le déficit est donc double. Aller vers une normalisation nouvelle des enrobés pour tenir comptes de ces critères qui ne sont pas encore considérés et aller vers une normalisation des essais nouveaux relatifs à la méthode proposée.

4. ÉTAT DE L'AVANCEMENT DES ÉTUDES DE LABORATOIRE

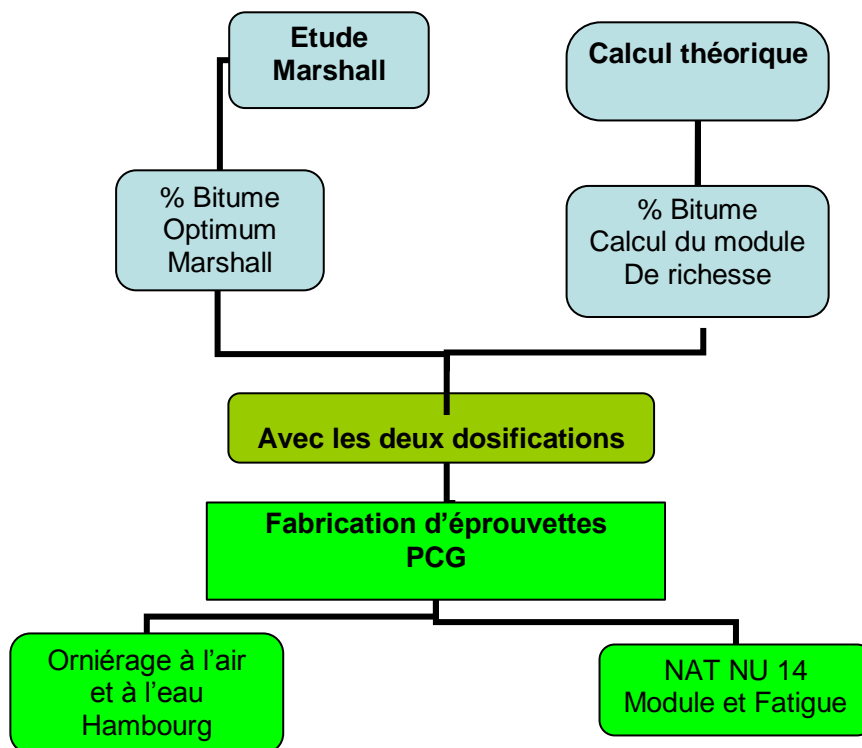
Ces enrobés à module élevé ne sont pas encore normalisés ainsi que les essais essentiels à caractériser ces enrobés comme le module de rigidité, l'orniérage, la

résistance à l'agression de l'eau et la fatigue. Avec le développement de la méthode d'essai MCDC nous avons entrepris des études de différents types d'EME et BBME avec différentes provenances de granulats. Nous allons nous attacher ici aux études d'EME faites à partir de Matériaux de la région de Santiago, capitale du Chili.

4.1 Principe de la méthode d'étude MCDC, première version:

Lors du projet Innova Corfo concernant uniquement le développement de la méthode d'essais le cheminement était le suivant:

Schéma d'étude:



Détermination de la formulation et de la teneur en liant:

- ⇒ Essai Marshall selon la norme chilienne (MC Volume 8, 8.302.47)
- ⇒ Calcul de la teneur en liant avec le module de richesse.

Fabrication des éprouvettes PCG :

À partir des 2 teneurs en liant déterminées à partir du module de richesse (système français) et de la dosification Marshall.

Orniérage avec équipement Hambourg:

- ⇒ à l'air à 60° C à partir des éprouvettes PCG
- ⇒ à l'eau à 50° C à partir des éprouvettes PCG

Module de Rigidité avec l'équipement Nu 14:

- ⇒ à 10° C, 15° C et 20° C

Fatigue en traction diamétrale avec l'équipement Nu 14:

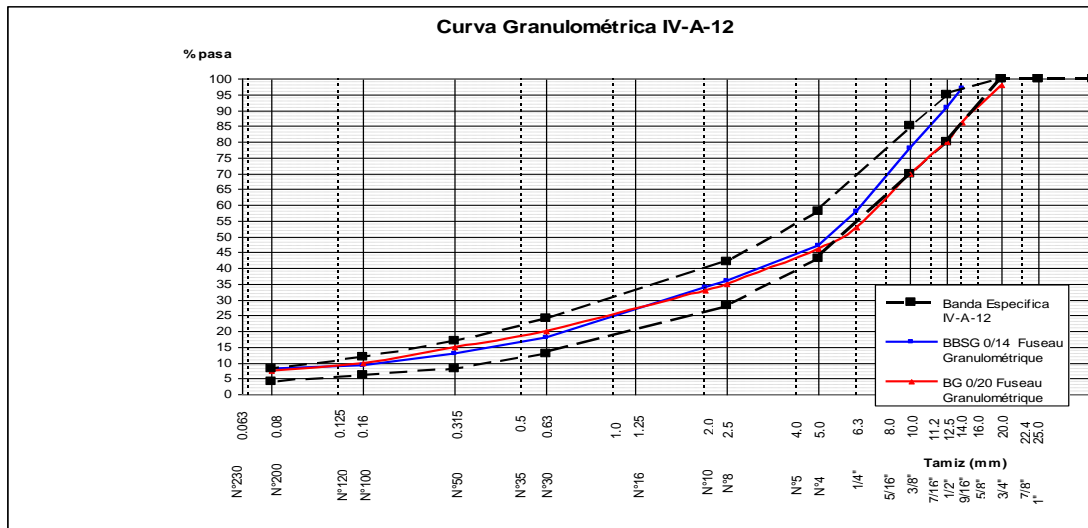
- ⇒ => à 10° C, 15° C et 20° C

Choix du bitume et fuseau de référence :

Plusieurs fuseaux et quatre types de bitume ont été utilisés pour le projet Corfo.

Pour l'exposé qui nous intéresse nous allons sélectionner un bitume de base 50/70 et d'un bitume 20/30.

Le fuseau chilien est « una Banda IV A-12 » qui est le fuseau le plus utilisé, particulièrement pour les trafics lourds. De plus, il a l'avantage de permettre d'englober un BBME, pour couche de roulement ou un EME pour couche d'assise.



Lors du premier projet Innova Corfo :

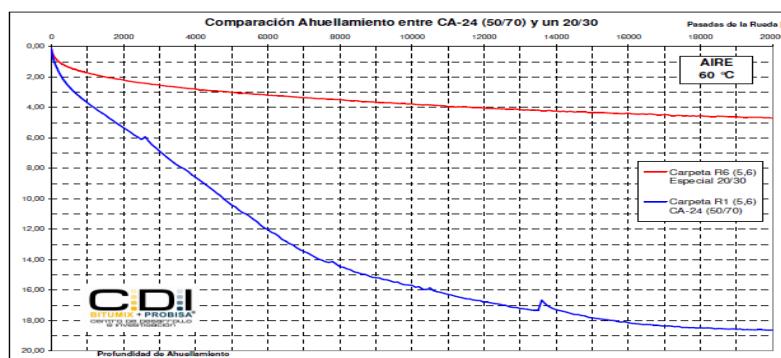
| | | | Provenance granulat | Type de trafic | Pénétration | Type de bitume | Fuseau |
|---|------------|-----------|---------------------|----------------|--------------|----------------|---------|
| 1 | Roulement1 | R1 | Puente Verde | Lourd | 50/70 | CA 24 | IV-A-12 |
| 2 | Roulement6 | R6 | Puente Verde | Lourd | 20/30 | Spécial | IV-A-12 |

Détermination de la formulation et de la teneur en liant:

| | | Etude Marshall | | PCG MCDC | | |
|----------|----|----------------|------------------------------|------------------------|------------|------------------------------|
| | | % Bitume | Densité (Kg/m ³) | Module de Richesse (K) | % Bitume | Densité (Kg/m ³) |
| Rodadura | R1 | 5,6 | 2.341 | 3,23 | 5,3 | 2.337 |
| Rodadura | R6 | 5,6 | 2.344 | 3,20 | 5,3 | 2.333 |

Orniérage avec équipement Hambourg: => A 60° C à l'air:

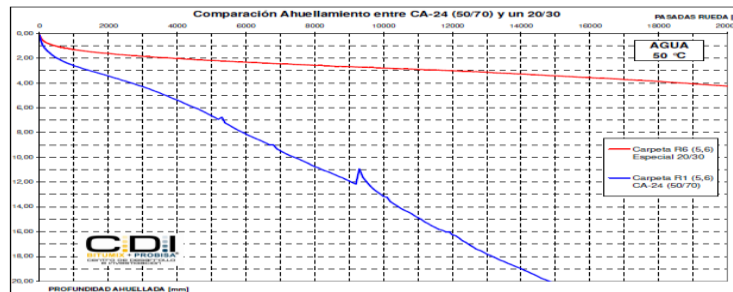
| | % Bitume | Densité | Epaisseur | Orniérage à 10.000 passes | Orniérage à 20.000 passes |
|----|------------|---------|-----------|---------------------------|---------------------------|
| R1 | 5,6 | 2.341 | 50,8 mm | 15,7 mm | 36,7% |
| R6 | 5,6 | 2.344 | 59,4 mm | 3,8 mm | 7,9% |



Dans les deux cas l'essai arrive à son terme. Le gain de résistance à l'orniérage avec un liant 20/30 est très significatif.

⇒ à 50° C à l'eau :

| | % Bitume | Densité | Epaisseur | Orniérage à 10.000 passes | | Orniérage à 20.000 passes | |
|----|------------|---------|-----------|---------------------------|--------|---------------------------|------|
| R1 | 5,6 | 2.341 | 61 mm | 13.2 mm | 22.6 % | Non atteint | - |
| R6 | 5,6 | 2.344 | 60 mm | 2,8 mm | 4,7% | 4,3 | 7,1% |



Avec le bitume 50/70 l'essai n'arrive pas à son terme. Ceci est dû à un phénomène de Striping manifeste.

Avec le bitume 20/30 l'essai arrive à son terme avec une valeur du même ordre (d'ailleurs meilleure) que lorsque l'on fait l'essai à l'air.

Module de Rigidité (Mpa) avec l'équipement Nu 14:

| | Densité | 10° C | 15° C | 20° C |
|----|---------|--------|--------|-------|
| R1 | 2.341 | 11.806 | 7.386 | 4.255 |
| R6 | 2.344 | 16.658 | 12.711 | 9.167 |

La valeur du module se multiplie par un facteur de 2 à une température voisine des 18° C. Le BBSG se transforme en BBME.

Fatigue en traction diamétrale avec l'équipement Nu 14:

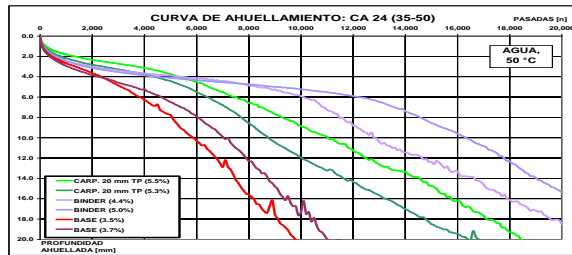
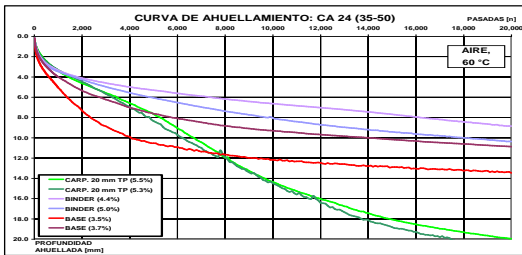
| FATIGUE a 15°C (N° d'impulsions) avec équipement NAT éprouvette de Ø = 150 mm | | | | | | |
|---|---------|----------------|---------|---------|---------|---------|
| | Densité | Effort horiz. | 300 KPa | 400 KPa | 600 KPa | 800 KPa |
| R1 | 2.341 | N ° de Charges | - | - | 16.864 | - |
| R6 | 2.344 | N ° de Charges | - | - | - | 23.336 |

Cette méthode de mesure de fatigue en « compression diamétrale » ne permet que de mesurer un nombre de répétition de charges en fonction d'un effort vertical qui change en fonction de la dureté du liant. La détermination d'une loi de fatigue permettant de calculer un ϵ_6 utilisable pour une vérification de calcul Alizé n'est donc, a priori, pas possible. Nous pouvons cependant constater qu'il faut appliquer un effort plus important quand le bitume est plus dur et que l'enrobé résiste dans ce cas là à plus de répétitions.

Remarques sur l'essai d'orniérage Hambourg :

Cet équipement permet de faire les essais à l'eau (système allemand) et à l'air en faisant varier les températures. Il permet surtout de mettre en évidence le phénomène du Striping

qui marque la séparation entre le bitume et le granulat sous l'action de l'agressivité de l'eau et de la température. Il permet ainsi d'éviter de réaliser l'essai Duriez ou ITSr. Les autres essais réalisés lors du projet Innova Corfo ainsi que ceux fait pour d'autres études au Chili font apparaître un problème généralisé à l'ensemble du pays. Ceci est du essentiellement à la nature très siliceuse des agrégats dans cette partie du monde. Nous avons donc choisi que la méthode à l'eau dans notre méthode MCDC. Les deux cadres ci-dessous, faits sur les mêmes enrobés permettent de visualiser clairement le phénomène.

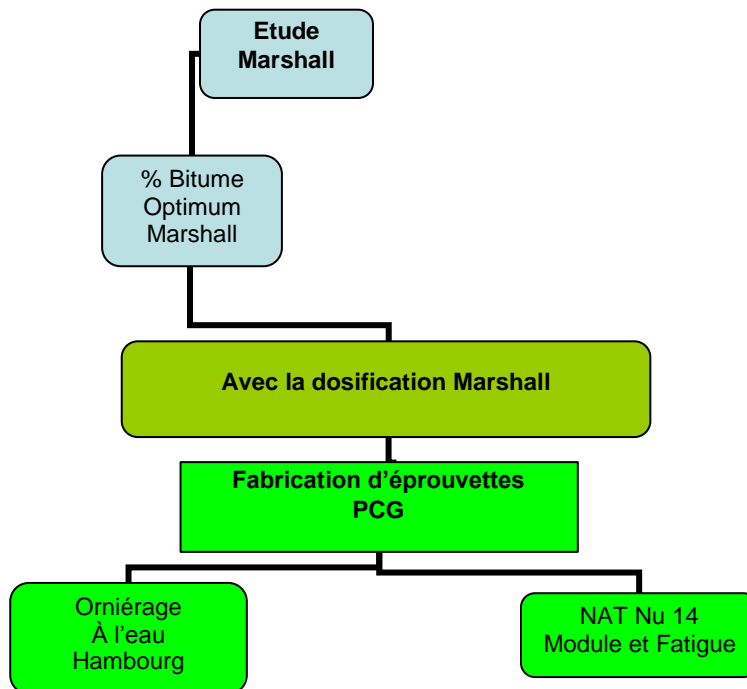


4.2 Principe la méthode d'étude MCDC, deuxième version:

Lors du deuxième projet Innova Corfo avec ICHAS :

Une fois la méthode d'étude déterminée, un deuxième projet Innova Corfo a été entrepris avec le concours de l'Institut Chilien de l'Asphalte ICHAS.

Pour ce deuxième projet qui s'oriente cette fois ci vers une nouvelle normalisation des enrobés au Chili il a été retenu le schéma suivant :



Détermination de la formulation et de la teneur en liant:

⇒ Essai Marshall selon la norme chilienne (MC Volume 8, 8.302.47)

Fabrication des éprouvettes PCG avec la teneur en liant Marshall :

Orniérage avec équipement Hambourg: à l'eau a 50° C à partir des éprouvettes PCG

Module de Rigidité avec l'équipement Nu 14: à 10° C, 15° C et 20° C

Fatigue en traction diamétrale avec l'équipement Nu 14: à 10° C, 15° C et 20° C

Observation:

- ⇒ Seul la teneur en liant Marshall a été retenue. En effet l'abandon de cette méthode parait encore trop prématuré au Chili et de plus les différences de dosifications observées, lors du premier projet, ne sont pas très significatives entre le Marshall et le module de richesse par rapport au concept actuel des enrobés actuellement utilisés.

Choix du bitume et fuseau de référence :

Comme pour la première partie, plusieurs fuseaux et cinq types de bitume ont été utilisés pour le projet Corfo Ichas. Pour l'exposé qui nous intéresse nous allons sélectionner un bitume de base 35/50 et d'un bitume 10/20, en faisant varier le % de liant dans ce cas précis. Le fuseau chilien utilisé est « una Banda IV A-12 » qui est le fuseau le plus utilisé, particulièrement pour les trafics lourds. Nous pouvons ainsi comparer une grave bitume avec un EME.

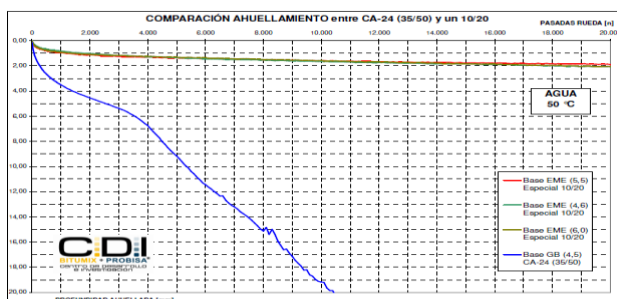
| | | Provenance granulat | Type de trafic | Pénétration | Type de bitume | Fuseau |
|---|--------------|---------------------|----------------|--------------|----------------|---------|
| 3 | Grave Bitume | Puente Verde | Lourd | 35/50 | CA 24 | IV-A-12 |
| 4 | EME | Puente Verde | Lourd | 10/20 | Spécial | IV-A-12 |
| 5 | EME | Puente Verde | Lourd | 10/20 | Spécial | IV-A-12 |
| 6 | EME | Puente Verde | Lourd | 10/20 | Spécial | IV-A-12 |

Détermination de la formulation et de la teneur en liant:

| | | Etude Marshall | |
|---|--------------|----------------|------------------------------|
| | | % Bitume | Densité (Kg/m ³) |
| 3 | Grave Bitume | 4,5 | 2.300 |
| 4 | EME | 4,6 | 2.313 |
| 5 | EME | 5,5 | 2.361 |
| 6 | EME | 6,0 | 2.375 |

Orniérage avec équipement Hambourg: à 50° C à l'eau :

| | % Bitume | Densité | Epaisseur | Orniérage à 10.000 passes | | Orniérage à 20.000 passes | |
|---|------------|---------|-----------|---------------------------|-------|---------------------------|------|
| 3 | 4,5 | 2.300 | 60,8 mm | 19,2 mm | 31,6% | non atteint | - |
| 4 | 4,6 | 2.313 | 62,2 mm | 1,7 mm | 2,7% | 2,1 mm | 3,3% |
| 5 | 5,5 | 2.361 | 60,9 mm | 1,6 mm | 2,6% | 1,9 mm | 3,1% |
| 6 | 6,0 | 2.375 | 61,1 mm | 1,6 mm | 2,6% | 2,1 mm | 3,4% |



Avec le bitume 35/50 l'essai n'arrive pas à son terme. Ceci est du à un phénomène de Striping manifeste. Avec le bitume 10/20 l'essai arrive à son terme avec des résultats remarquables. C'est la confirmation des résultats trouvés en comparant les liants 50/70 et 20/30. Avec les liants 10/20 et 20/30 le phénomène de stripping disparaît. Ceci est du au process particulier que nous utilisons (non évoqué dans cette étude). La variation du % du liant 10/20 n'influe pas sur les résultats d'ornièrage.

Module de Rigidité avec l'équipement Nu 14:

| | | Densité | 10° C | 15° C | 20° C |
|---|--------------|---------|--------|--------|--------|
| 3 | Grave Bitume | 2.300 | 12.021 | 8.104 | 4.908 |
| 4 | EME | 2.313 | 16.286 | 12.706 | 10.040 |
| 5 | EME | 2.361 | 15.564 | 12.045 | 9.062 |
| 6 | EME | 2.375 | 16.799 | 12.144 | 8.813 |

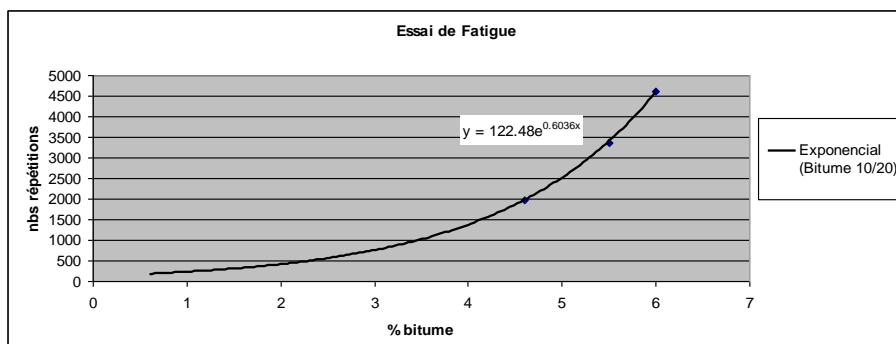
La valeur du module se multiplie par un facteur de 1.5 à une température voisine des 15° C. La grave bitume se transforme en EME. La variation du % du liant 10/20 n'influe pas sur les résultats de module.

Fatigue en traction diamétrale avec l'équipement Nu 14:

| FATIGUE a 15°C (N° d'impulsions) avec équipement NAT éprouvette de Ø = 150 mm | | | | | |
|--|----------|-------------------|----------------|---------|----------|
| | % bitume | Effort horizontal | Type de bitume | 800 KPa | 1000 KPa |
| 3 | 4.5 | N ° de charges | 35/50 | 1.354 | - |
| 6 | 6.0 | N ° de charges | 10/20 | - | 26.118 |

La différence, très importante, de nombre de répétitions admissibles est due au type de bitume ainsi qu'à la teneur en liant.

| FATIGUE a 20°C (N° d'impulsions) avec équipement NAT éprouvette de Ø = 150 mm | | | | | |
|--|---------|-------------------|----------------|-------------|----------|
| | Densité | Effort horizontal | % bitume 10/20 | 800 KPa | 1000 KPa |
| 3 | 2.300 | N ° de charges | - | Non réalisé | - |
| 4 | 2.313 | N ° de charges | 4.6 | - | 1.974 |
| 5 | 2.361 | N ° de charges | 5.5 | - | 3.355 |
| 6 | 2.375 | N ° de charges | 6.0 | - | 4.608 |



L'influence du pourcentage de bitume dans l'enrobé est évidente.

Plus la teneur en bitume augmente de façon exponentielle plus (pour la même charge), plus l'enrobé admet de répétitions de charges.

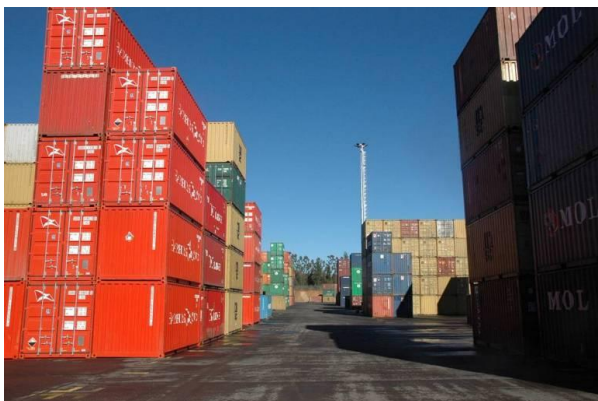
4.3 Conclusions après ces deux projets Innova Corfo:

- ⇒ Le fuseau chilien IV A-12 permet de proposer, du point de vu de la composition granulaire, des BBME et EME.
- ⇒ Ceux-ci peuvent être formulés avec l'étude Marshall et vérifiés avec l'étude PCG.
- ⇒ Il n'est pas indispensable de réaliser une étude Duriez grâce à l'utilisation de l'équipement Hambourg pour l'orniérage a l'eau. Cet essai est très discriminant et met très bien en valeur l'efficacité du liant spécial utilisé pour obtenir les enrobés a module élevés.
- ⇒ Le phénomène du Striping est très prononcé avec les granulats très siliceux existants au Chili quand on utilise un bitume conventionnel CA 24.
- ⇒ Les valeurs à l'orniérage sont excellentes quelles se fassent a l'air à 60° C ou à l'eau à 50° C.
- ⇒ Les valeurs de module de rigidité mesurées avec le Nu 14 sont très comparables aux valeurs mesurées en France.
- ⇒ L'équipement Nu 14 ne permet pas de mesurer la fatigue de façon certaine et comparable avec le système français ainsi que d'établir la valeur ϵ_6 nécessaire pour la vérification des structures avec un système mécaniciste comme Alysé.
- ⇒ Cet essai permet cependant établir clairement des différences entre les types d'enrobés en considérant le nombre de répétitions de charge.
- ⇒ Il est possible de proposer des enrobés à module élevé au Chili pour cela il est nécessaire de proposer des normes nouvelles aussi bien pour les essais s'y rattachant que pour les enrobés. Ceci est actuellement en cours.
- ⇒ Les études de laboratoire demandent maintenant d'être validées par des chantiers réels.

5. EXPÉRIENCES CHILIENNES

5.1 Couche de roulement en Enrobés à Module Élevé Anti Poinçonnement:

Deux chantiers de BBME Anti Poinçonnement ont été réalisés sur des plateformes de stockages de conteneurs. Dans les deux cas augmenter la valeur de module de l'enrobé n'était pas l'objectif final. Le but est d'obtenir une résistance au poinçonnement du par les efforts exercés, par le poids de cinq conteneurs superposés, et transmis à la couche de roulement par les pieds du premier conteneur. Pour cela il a fallu formuler un BBME avec le liant 10/20 spécial nécessaire pour obtenir un enrobé à module élevé. Une méthode spécifique à été adaptée pour mesurer, ou plutôt comparer, la résistance à un effort statique très ponctuel.



Le premier chantier de 80000 m² a été réalisé fin 2006 à Curauma près de Valparaiso et le second de 60000 m² à San Fernando près de Santiago en avril 2007.

ÉTUDE SPÉCIFIQUE DE LA RÉSISTANCE AU POINÇONNEMENT

Il n'existe pas de norme chilienne pour mesurer la résistance au poinçonnement statique d'un enrobé. Nous avons donc mis au point une méthode d'essai spécifique en utilisant une presse Marshall ou CBR.

Principe de la méthode

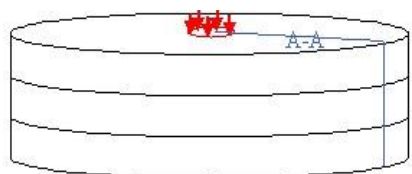
On applique une pression verticale sur des éprouvettes Marshall d'enrobé (cela peut se faire aussi avec des éprouvettes PCG) à une vitesse de 1.27 mm/min avec un piston de 30 ou 50 mm de diamètre (comme pour un CBR).

Quand il y a rupture c'est-à-dire quand la force appliquée chute, on note cet effort pour calculer la pression à ce moment là. On note aussi le temps écoulé entre le début de l'essai et la rupture puis on mesure au pied à coulisse la profondeur du poinçonnement.

La pression exercée n'est pas statique comme avec la méthode d'essai du CEBTP. Le poinçonnement constaté n'est donc pas directement interprétable en valeur absolue.

Cet essai permet cependant de comparer les mêmes enrobés en utilisant des bitumes différents. Il est très discriminant et permet de s'orienter vers la meilleure solution.

Choix du diamètre du piston :



En fonction du diamètre et de la hauteur de l'éprouvette mesurée et la diffusion de charge se faisant à 45°, la rupture de l'éprouvette peut être affectée car celle-ci n'est pas confinée. La comparaison en fonction du type d'éprouvette et de piston est donc nécessaire.

Etude comparative de résistance au poinçonnement en fonction du type de bitume

Trois types de bitume ont été testés :

| | Bitume SBS 60/80 | CA 24 50/70 | Bitume spécial 10/20 |
|--------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| Penetración 25° C | 75 | 60 | 14 |
| TBA (°C) | 69 | 50 | 70 |

Pression et Poinçonnement sur éprouvette Marshall avec piston de 3 et 5 mm

| | | | |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| Liant : | Bitume SBS 60/80 | CA 24 50/70 | Bitume spécial 10/20 |
| Pressión (Mpa) avec piston de 5 cm. | 10.5 | 12 | 18 |
| Poinçonnement (mm) | 2.3 | 2.6 | 1.5 |
| Presión (Mpa) avec piston de 3 cm. | 10.5 | 11 | 26 |
| Poinçonnement (mm) | 3 | 2.6 | 1.9 |

- ⇒ On constate que la pression ne varie pas en fonction du type de piston mais quelle varie beaucoup en fonction du type de bitume pour les bitumes de classe 50/70 et 60/80 modifié au SBS ou pas.
- ⇒ Avec le liant spécial 10/20 la pression nécessaire est plus forte avec le piston de 3 mm avec un facteur de 2.
- ⇒ La profondeur de poinçonnement est toujours moins importante avec l'EME au 10/20 qu'avec les autres liant (de l'ordre de 40 à 60%).

Pression et Poinçonnement sur éprouvette PCG avec piston de 3 mm

| | | | |
|--------------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| Liant: | Bitume SBS 60/80 | CA 24 50/70 | Bitume spécial 10/20 |
| Pression (Mpa) | 29 | 30 | 49 |
| Poinçonnement (mm) | 3.4 | 3.1 | 1.6 |

- ⇒ La pression nécessaire pour la rupture se multiplie avec un facteur supérieur à 2 quelque soit le type de bitume.
- ⇒ La profondeur de poinçonnement est plus de 2 fois inférieure avec un EME au bitume 10/20 que celle d'un enrobé au bitume classique ou polymère (SBS).(de l'ordre de 90 à 110%).

La résistance au poinçonnement statique est donc toujours très supérieure avec le EME ou BBME.

Les résultats obtenus sur chantier ont confirmé ces essais de laboratoire à la plus grande satisfaction des utilisateurs de ces aires de stockage de containers.

5.2 Couches structurantes en EME pour réhabilitation ou chaussées neuves :

Les autoroutes concessionnées chiliennes commencent à présenter des problèmes structurels importants. Ceci est du essentiellement à l'augmentation de trafic poids lourd plus rapide prévu mais aussi à d'autres causes comme le phénomène de Striping déjà mentionné plus avant. Des orniérages, des glaçages et des fissures de fatigue se constatent essentiellement sur les secteurs les plus canalisés. Il en va de même pour les couloirs de bus des voies urbaines de la ville de Santiago. Les EME sont une excellente solution pour la réparation de ces chaussées surtout quand elles sont réalisées sur une voie uniquement. On augmente ainsi la capacité structurelle d'une voie en conservant le même niveau fini tout en éliminant des autres symptômes signalés précédemment.

La classe de trafic sur ces autoroutes et couloirs de bus sont assimilables dans leur ensemble à un T1 et la classe de plateforme serait une PF2. Si l'on se reporte au manuel de conception des chaussées d'autoroutes de Scetauroute nous pourrions proposer une structure du type :

Pour une durée de vie de calcul de 15 à 20 ans : Structure souple avec EME.

| Autoroute | | Couloir de Bus |
|-------------------------------------|----|---------------------------------|
| 2.5 BBTM 10 EME 11 EME PF2 | ou | 5 BBME 8 EME 9 EME PF2 |

=> Les structures actuelles utilisées au Chili sont constituées en général de :
Pour une durée de vie de calcul de 20 ans.

| | |
|--|--------------------|
| 5 a 6 BBSG roulement 6 a 7 BBSG liaison 6 a 7 GB très grenue | 17 a 22 cm de noir |
| 20 base en GNT | 20 cm de blanc |

- ⇒ Ces structures vont de T2+ à T1-/+ (manuel Scetauroute)
- ⇒ Ce type de structure souple est considérée dans ce manuel jusqu'à un trafic maximum de T1+ cad 750 PL/jour. Pour une PF2 la structure este de :

| | |
|---------------------------------------|---------------------|
| 7 BBSG roulement 16 GB très grenue | 23 cm total de noir |
| 25 base en GNT | 25 cm de blanc |

Pour cette catégorie de trafic on voit que ces structures sont comparables. Dans les faits les interventions d'entretien lourds sont nécessaires bien souvent entre la cinquième et dixième année ce qui confirme bien le manque de pouvoir structurant des enrobés utilisés dus aux problèmes évoqués auparavant. Les différences de qualité de GNT, du point de vue granulaire et mise en ouvre peuvent être aussi à l'origine de défaillances structurelles.

PREMIER CHANTIER EXPÉRIMENTAL D'EME SRUCTURANTS AU CHILI

Pour confirmer ces études en laboratoire Bitumix a réalisé un premier chantier d'EME dans ses installations industrielles de Maipu, près de Santiago, Il s'agit de la voix d'accès aux installations de concassage et de fabrication d'enrobé. Près de 200000 tonnes d'enrobé et autant de matériaux brut pour concasser. Cela équivaut environ de 80 à 100 PL jour. L'objectif est de substituer une couche de roulement de 5 cm de BBSG fissuré en peau de crocodile par le passage de camions après 5 ans de circulation par dans un premier cas 7 cm d'EME (laissés en couche de roulement) et dans le second par deux couches de 7 cm chacune d'EME. En dessous toute la structure est en GNT.

Formulation de l'EME

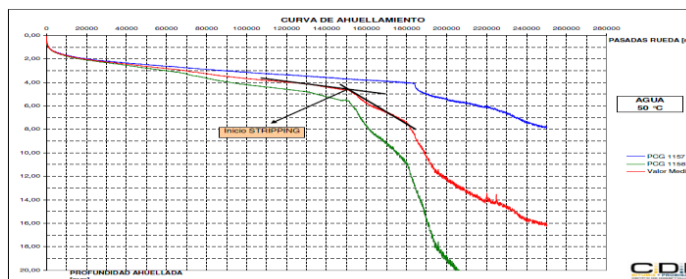
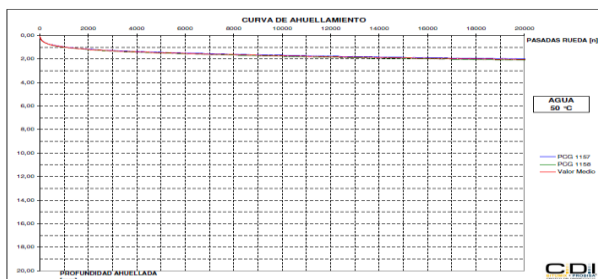
Les granulats du poste de Maipu ont été utilisés. La formulation est la suivante :

| | |
|----------------|------|
| 10/16 concassé | 17% |
| 5/11 concassé | 27% |
| 0/4 concassé | 56% |
| Liant 10/20 RI | 5.5% |

Une étude MCDC complète, sauf la fatigue, a été réalisée. Le tableau ci-dessous résume les principales valeurs obtenues. On remarque que le Module de rigidité est très proche de la valeur demandée en France pour un EME et serait conforme pour un BBME, cela en utilisant deux méthode d'essais très différentes. Les performances à l'orniérage sont excellentes. En effet l'essai s'arrête normalement à 20000 passes (ou 10000 cycles). On constate une profondeur d'ornière de 2 mm pour une épaisseur de plaque de 6 cm. Le stripping commence à 150000 passes ou 75000 cycles. Du point de vue de l'étude PCG on se place dans la norme pour EME mais nous somme hors norme pour un BBME du point de vue français.

| | | | Spécifications : | |
|--|--------------------|--------------|------------------|--------------------------------|
| | | | Chili | France |
| Etude Marshall | Stabilité (N) | 12250 | >9000 (BBSG) | |
| | Densité % vides | 2.363 5.1 | >8000 (Binder) | |
| Module Richesse Filler/bitume | | 3.37 1.45 | | > 3.4 (classe 2) |
| Etude PCG | C 10 | 9.3 | | > 11 (BBME) |
| | C 80 | 2.2 | | 4 – 9 (BBME) |
| | C 100 | 1.4 | | < 6 (EME) |
| | C 120 | 0.8 | | |
| Orniérage 50° eau (profondeur mm à passes) | 20000 | 2 | | < 8 (60000 passes, 60° air) |
| | 100000 | 3.5 | | |
| | 150000 stripping | 4.5 | | |
| Module Rigidité 15° C (Mpa) | | 13300 | | > 14000 EME > 12000 BBME |

Courbe de l'essai Hambourg à 50° C à l'eau :



Réalisation, vérification et auscultation :

La réalisation s'est déroulée avec de bonnes conditions météo et les contrôles de fabrication de l'EME et de compactage avec le troxler sont conformes aux exigences.

Des mesures de plaque ont été faites pour déterminer le module de déformation Ev2 sur la GNT après le rabotage des enrobés existants afin de vérifier si le support était prêt à recevoir un EME et d'évaluer le type de plateforme support.

| N° | EV2 (Mpa) | Classification PF _i |
|----|-----------|--------------------------------|
| 1 | 141 | PF ₃ |
| 2 | 82 | PF ₂ |
| 3 | 94 | PF ₂ |
| 4 | 173 | PF ₃ |

Un suivi de déflexions avec la poutre Benkelman a été réalisé et continuera dans le temps, cela pendant une durée de trois ans. Ces mesures sont réalisées sur l'axe de la voie tous les dix mètres. Il faut indiquer que le nombre de mesures est faible mais cela indique une tendance.

| Epaisseur : | 14 cm | | | | | | | 7 cm | | | | | | |
|---------------------|-------|----|----|----|----|-----------|-----------|------|----|----|----|-----------|-----------|--|
| Position (ml) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | Moy : | Dc : | 60 | 70 | 80 | 90 | Moy : | Dc : | |
| Enrobés existants : | 29 | 62 | 50 | 62 | 86 | 58 | 99 | 81 | 72 | 78 | 50 | 70 | 98 | |
| sur EME à 7 jours | 35 | 34 | 52 | 23 | 45 | 38 | 60 | 86 | 60 | 63 | 64 | 68 | 92 | |
| sur EME à 4 mois | 39 | 37 | 24 | 34 | 34 | 34 | 45 | 59 | 62 | 68 | 35 | 56 | 85 | |

Après maturation complète de l'enrobé (4 mois) nous obtenons :

Gain pour 14 cm EME : 24 %/100 de la déflexion moyenne

Gain pour 7 cm EME : 14 %/100 de la déflexion moyenne

L'importance de l'épaisseur d'enrobé est incontestable. Il est difficile d'évaluer l'influence due à l'utilisation de l'EME. Une expérimentation plus complète serait nécessaire en faisant le même procédé avec un enrobé classique. Toutefois nous continuons d'observer l'évolution des déflexions notamment pour voir si l'influence été / hivers est significative dans ce contexte. Cependant si nous nous référons aux classes de déflexions définies par le LCPC dans son catalogue de structure pour les renforcements de chaussées (rappeler ci après) nous constatons :

- ⇒ Que nous étions en C3 sur l'ancienne chaussée.
- ⇒ Que nous restons en C3 avec 7 cm d'EME.
- ⇒ Que nous passons en C2 avec 14 cm d'EME après 7 jours.
- ⇒ Que nous passons en C1 avec 14 cm d'EME après maturation.

| Dc | 0-50 | 50-75 | 75-100 | 100-150 | 150-200 | 200-300 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| C _i | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | C ₅ | C ₆ |

Classes C_i : les classes de déflexion caractéristique Dc (moy. + 2 déviations standard).

Macro texture et Friction :

Nous avons vu qu'il est possible d'utiliser le même fuseau pour une couche de roulement ou une grave bitume. Ce fait nous permet ici d'être en EME ou BBME. Nous avons donc mesuré les hauteurs au sable (Hsv) pour la macro texture et la friction avec le pendule britannique (CRD). Nous obtenons :

| Distance (m) | Hsv (mm) | Friction (CDR) |
|---------------------|----------|----------------|
| 10 | 0.50 | 0.60 |
| 30 | 0.51 | 0.64 |
| 80 | 0.47 | 0.76 |
| Spécif. Chilienne : | > 0.5 | > 0.6 |

Cela nous confirme, quand utilisant un bitume 20/30 au lieu de 10/20 nous pouvons proposer ce type de formulation en couche de roulement.

Carrotages de conformité :

Des carottes ont été réalisées pour vérifier la densité, refaire les essais à l'orniéreur Hamburg et mesurer le coefficient de perméabilité.

Les compacités en place varient entre 97 et 101 % de la référence Marshall.

| EME | % Bitume | Densité | Epaisseur | Orniérage à 20.000 passes | | Striping | |
|---------|--------------|---------|-----------|---------------------------|-------|----------|---------------|
| Carotte | 5,6 % | 2,376 | 120 mm | 3,7 mm | 3.0 % | 6 mm | 240000 passes |
| Carotte | 5.6 % | 2.376 | 60 mm | 3.2 mm | 5.4 % | | |
| Etude | 5,5 % | 2.384 | 60 mm | 2.0 mm | 3.4% | 4.5 mm | 150000 passes |

Ces résultats sont supérieurs à ceux obtenus lors de l'étude en laboratoire. !!!!

Mesures de perméabilité :

| N° Carotte | 6 | 8 |
|---------------------|---------|---------|
| Epaisseur | 14.76 | 14.80 |
| Densité | 2.375 | 2.373 |
| % Comp. | 100.5 | 100.4 |
| Perméabilité (cm/s) | 2.4E-05 | 3.6E-05 |

Avec un coefficient de perméabilité k de l'ordre de 10⁻⁵ l'EME est un enrobé peu perméable. Ceci contribue à sa très bonne résistance à l'agression de l'eau.

6. VISION POUR LE FUTUR « IMMEDIAT »

Le Chili est un pays en plein développement économique. Ces dernières années le pouvoir d'achat des chiliens a considérablement augmenté entraînant ainsi un accroissement du parc de véhicules personnel mais aussi du parc de véhicules de transport public et transport des marchandises. Les infrastructures, notamment les réseaux routiers et urbains, sont sollicités par des flux véhiculaires plus importants en nombre et en poids et aussi avec des types d'agressivité envers les couches de roulement plus contraignant comme c'est le cas tout particulièrement en ville avec les bus articulés avec trois essieux.

Les structures de chaussée existantes sont soit en béton soit flexibles. Dans le cas de celle-ci le concept des enrobés actuels ne correspond plus aux exigences réelles ni du point de vue sollicitations mécaniques exercées ni du point de vue niveau de service réclamés actuellement par les administrations, publiques ou concessionnées, mais aussi par les usagés.

Les enrobés à module élevé utilisés en structure et en roulement sont une réponse technique efficace pour répondre aux problèmes de réhabilitations qui s'accroissent mais aussi pour concurrencer les chaussées en béton encore très amplement réalisées même en entretien.