

# Étude expérimentale et analyse structurelle de bétons poreux pour couches de roulement de chaussées en béton de ciment



## RÉSUMÉ

Cet article présente une étude expérimentale de bétons de ciment poreux utilisables en couche de roulement de chaussées en béton, réalisée dans le cadre du projet Brite-Euram BE-3415. Les conclusions de l'étude expérimentale sont les suivantes :

➤ pour la même granulométrie des gros granulats, la résistance et la porosité augmentent quand la taille maximale des fines diminue. On a aussi constaté qu'il existe un rapport inverse proportionnel entre la résistance et la porosité ;  
➤ pour les bétons poreux présentant une teneur en vides de 25 %, on peut obtenir une résistance maximale à la compression simple de l'ordre de 18 MPa et une résistance à la traction par fendage de l'ordre de 2 MPa. Si l'on ajoute un polymère, on peut augmenter la résistance à la traction par flexion jusqu'à environ 4 MPa. Le module dynamique d'élasticité est de l'ordre de 20 000 à 25 000 MPa.

**MOTS CLÉS :** 32-52 - Béton hydraulique - Chaussée rigide - Porosité - Couche de roulement - Résistance (matér.) - Compression - Essai - Granulat - Granulométrie (granularité) - Polymère - Durabilité.

## Alejandro JOSA

Docteur-ingénieur des Ponts et Chaussées  
Département de Géotechnique et de cartographie  
École supérieure d'ingénieurs des Ponts et Chaussées  
Université polytechnique de Catalogne

## Carlos JOFRÉ

Ingénieur des Ponts et Chaussées  
Directeur technique  
Institut espagnol du ciment et de ses applications, Madrid

## Antonio AGUADO

Docteur-ingénieur des Ponts et Chaussées  
Département de Technique de la construction  
École supérieure d'ingénieurs des Ponts et Chaussées  
Université polytechnique de Catalogne

## Eberhard EICKSCHEN

Chimiste  
Institut de recherche de l'industrie allemande du ciment  
Düsseldorf, Allemagne

## Erik ONSTENK

Ingénieur civil  
Institut des matériaux et de la recherche  
sur l'environnement, Pays-Bas

L'augmentation continue du trafic en Europe au cours des dernières décennies a généré des niveaux de bruit routier et un accroissement du nombre d'accidents qui, dans de nombreux cas, ne sont plus considérés comme acceptables. Cela a suscité un intérêt particulier pour le développement de types de chaussées permettant de réduire le bruit provoqué par la circulation et d'augmenter la sécurité. Dans ce contexte, l'utilisation de couches de roulement poreuses apparaît comme une solution attrayante car celles-ci ont pour effet d'absorber le bruit, et d'éviter que l'eau reste à la surface de la chaussée. Ainsi améliorent-elles l'adhérence et donc la sécurité.

Dans le passé, les bétons poreux ont été utilisés sur des chaussées routières essentiellement pour leurs propriétés de drainage, dues à leurs grandes porosité et perméabilité. Ils ont donc été employés pour les bandes d'arrêt d'urgence afin d'améliorer le drainage et éviter des phénomènes de pompage de fines sur les chaussées en béton. Ils ont également été utilisés en couche de fondation et en couche de base de routes et d'aéroports. Dans ces cas-là, le béton poreux fait partie de la structure, et il faut tenir compte des caractéristiques de drainage du matériau ainsi que de ses propriétés mécaniques (résistance, fatigue). La porosité du béton de ciment ayant des effets contraires sur sa perméabilité et sur sa résistance (la perméabilité et les propriétés drainantes augmentent avec la porosité et les résistances diminuent), il faut parvenir à un compromis entre ces deux paramètres. Parmi les applications les plus récentes des bétons poreux, citons leur utilisation comme couche de roulement de chaussées rigides, qui se trouve actuellement dans une première phase d'étude et d'expérimentation. Les bétons poreux ont ici pour effet, comme les enrobés drainants, de réduire le bruit du trafic, et d'évacuer rapidement l'eau en évitant les projections d'eau par les véhicules.

C'est pourquoi, depuis quelques années, un gros effort de recherche est effectué, tant en laboratoire que sur des tronçons expérimentaux, pour tenter d'optimiser les propriétés des bétons poreux utilisables en couche de roulement et d'établir les formulations les plus appropriées. La France, les Pays-Bas, l'Allemagne et l'Espagne réalisent notamment ce genre d'études.

Nous avons énoncé précédemment qu'un des critères de base de conception d'un béton poreux est la conjonction d'une bonne perméabilité et d'une résistance aux sollicitations de types mécanique et environnemental appropriées à l'objectif fixé. En ce qui concerne le béton poreux pour bandes d'arrêt d'urgence ou couches de base, ce compromis peut être atteint avec un dosage en ciment relativement faible ne dépassant pas  $200 \text{ kg/m}^3$ . En revanche, lorsque le béton poreux est employé pour la couche de roulement et est soumis directement à l'action des pneumatiques des véhicules, les caractéristiques mécaniques, y compris la résistance à l'arrachement des granulats, deviennent particulièrement critiques, et il est plus difficile de trouver un compromis alliant la perméabilité à la résistance. Il faut donc utiliser des teneurs en ciment élevées ou bien des quantités réduites de ciment avec des additifs déterminés (en général des polymères ou de la fumée de silice), qui améliorent la résistance du béton sans en réduire la porosité. Ces additifs augmentent le coût de la chaussée. Il est donc recommandé d'optimiser (de réduire autant que possible) l'épaisseur de béton poreux utilisé.

Cela conduit à des sections composées d'une couche supérieure poreuse mince (5-8 cm) et d'une couche inférieure dense adhérant durablement l'une sur l'autre, pour assurer un bon comportement global de la chaussée. Ces épaisseurs sont en général appropriées aux fréquences de bruit prédominantes sur routes interurbaines. En revanche, en zone urbaine, il vaut mieux opter pour de plus grandes épaisseurs ou même des couches complètes en béton poreux, pour assurer une meilleure absorption sonore. Par ailleurs, dans le cas de renforcements ou de resurfaçage d'ouvrages en service qui ne peuvent donc pas être fermés longtemps à la circulation (par exemple, axes urbains importants), il faut tenir compte d'une autre condition : la nécessité d'obtenir une résistance relativement élevée au jeune âge. Enfin, pour des routes situées sous des climats rudes, avec des hivers rigoureux, le matériau doit présenter une bonne résistance aux phénomènes de gel-dégel ou aux sels de dé verglaçage, et, dans certains pays, aux pneus cloutés.

Suivant les deux critères mentionnés ci-dessus pour obtenir une résistance mécanique semblable à celle des bétons denses employés pour les chaussées, des teneurs en ciment élevées ( $400 \text{ kg/m}^3$  ou plus, avec un pourcentage de fumée de silice de 8 %) ont été utilisées pour les ouvrages français récents. Cependant, signalons qu'il s'agissait de structures construites à Paris, et que ces chaussées en béton poreux devaient être ouvertes à la circulation des autobus et des automobiles dans un délai inférieur à 72 heures.

À titre comparatif, le tableau I indique les dosages et quelques résultats concernant les résistances et les perméabilités des bétons poreux employés sur différentes chaussées françaises, sur des bandes d'arrêt d'urgence et des couches de base, et sur des couches de roulement de voies à trafic léger et d'axes urbains. Comme on peut le voir, le dosage de  $400 \text{ kg/m}^3$  de ciment a permis d'obtenir une résistance à la traction par flexion au bout de 28 jours égale à 4 MPa, c'est-à-dire la résistance d'un BP-40, que l'on admet en Espagne même pour des routes à trafic très lourd.

Les Pays-Bas, l'Allemagne et l'Espagne ont réalisé une étude conjointe sur les propriétés des bétons poreux, dans le cadre du projet de recherche Brite-Euram BE-3415, intitulé *Optimization of the surface characteristics of concrete roads in accordance with environmental acceptance and traffic safety*, qui a bénéficié du financement de la Commission européenne. Les essais en laboratoire et les analyses structurelles de cette étude ont été réalisés par l'Institut espagnol du ciment et de ses applications (IECA), l'Intron (Institut des matériaux et de la recherche sur l'environnement, Pays-Bas), l'Université polytechnique de Catalogne,

TABLEAU I  
Caractéristiques des bétons poreux utilisés dans certains ouvrages français

Caractéristiques du béton poreux	TYPE DE CHANTIER				
	Bande d'arrêt d'urgence	Couche de base	Couche de roulement		
			Trafic léger		Trafic lourd
	Autoroute A1 (1977)	Aéroport Charles de Gaulle (1980)	Parking Bordeaux (1979)	Route CD 44 Marseille (1987)	Av. de la Porte de Vitry, Paris (a) (1992)
<b>Dosage par m<sup>3</sup> :</b> Ciment (kg) Sable (kg) Gros granulats (kg) Eau (l)	150 300 1 350(c) 70-100	200 300 1 350(d) 85	150 300 700 70	200 200 1 700 85	400(b) 120 1 360 100
<b>Résistance à la compression (MPa) :</b> au bout de 3 j au bout de 28 j	- 8	- 7	- 9,5	- 22,5	16 -
<b>Résistance à la flexion (MPa) :</b> au bout de 28 j	-	2,5(e)	-	2,27	4
<b>Porosité (%)</b>	15	22	23	17	21
<b>Perméabilité (l/m<sup>2</sup>/s)</b>	-	19	5,5	-	0,89 m/s

(a) On l'a classé dans la catégorie de trafic lourd, car il y avait un arrêt de bus avec manœuvres de braquage, démarrages, freinages, etc.  
 (b) Avec addition de 8 % de fumée de silice.  
 (c) Mélange à parts égales de granulats 5/20 et 20/40 mm.  
 (d) Granulat 6/20 mm.  
 (e) Estimée à partir de la résistance à la traction indirecte.

et l'Institut de recherche de l'industrie allemande du ciment (VDZ). Les autres partenaires de ce projet sont la société Hochtief, l'Université technique de Berlin et la BASt, en Allemagne, Dragados et Geocisa, en Espagne, ainsi que CUR et Cobeton, aux Pays-Bas. Comme on peut le voir, il s'agit aussi bien d'instituts de recherche que d'entreprises de construction, ces dernières étant spécifiquement chargées de la réalisation des tronçons expérimentaux prévus dans le projet. Celui-ci comprenait d'autres thèmes, comme l'analyse des mécanismes de production du bruit et la mesure de ce dernier, l'étude des textures des bétons denses, la recherche de traitements de surface pour réduire le bruit généré par la circulation, ainsi que l'évaluation et la rédaction d'un code de bonne conduite et de directives d'application.

Cet article présente une partie des résultats du programme d'essai en laboratoire réalisé sur des bétons poreux, ainsi qu'une analyse des contraintes s'exerçant dans une chaussée en béton composée d'une couche supérieure en béton poreux et d'une sous-couche inférieure en béton dense. Les conditions générales suivantes ont été préalablement fixées : propriétés de réduction du bruit et de drainage semblables à celles des bétons poreux utilisés pour des couches de roulement de chaussées ; résistance mécanique et caractéristiques de surface appropriées (par exemple, caractéristiques d'adhérence ou uni de surface) ; durabilité suffisante

(bonne adhérence entre les couches en béton poreux et en béton dense, résistance aux cycles de gel-dégel et comportement à la fatigue suffisants, etc.) ; construction réalisable avec des techniques actuellement disponibles ; et coût compétitif par rapport à des matériaux concurrents, incluant la construction ainsi que l'entretien.

## Programme d'essai en laboratoire

L'objectif principal du programme d'essai en laboratoire était de déterminer les formulations de béton poreux appropriées par rapport aux conditions mentionnées dans le paragraphe précédent, et d'étudier le comportement de ces bétons. Comme on a estimé qu'il était particulièrement important que la fabrication et la mise en œuvre de ces bétons soient possibles dans la pratique, on a décidé de réaliser trois études parallèles, c'est-à-dire une dans chacun des pays participant au projet, et adaptée respectivement aux conditions locales (taille des granulats disponibles, types de granulats et ciments habituels, etc.).

Lors de ces essais, on a choisi d'utiliser des pourcentages modérés de ciment et d'incorporer des polymères afin d'améliorer la résistance mécanique ainsi que la durabilité aux phénomènes de gel-dégel ou de corrosion due aux sels de déverglaçage.

Neuf polymères différents ont été employés pour l'ensemble des essais : quatre acryliques purs, deux styrène/butadiènes, un acrylique/styrène, un butylacrylique/styrole et une résine époxydique émulsionnée. Une partie de l'étude a consisté à évaluer l'influence de ces polymères sur certaines caractéristiques des bétons poreux. On a résumé cette influence sur une échelle allant de 1 (la meilleure) à 5 (la pire). Les valeurs estimées dans chaque cas sont indiquées dans le tableau II.

Comme on peut le voir, des polymères d'une même famille (acryliques purs) peuvent avoir une influence légèrement différente sur certaines caractéristiques.

L'optimisation initiale des formulations impliquait l'étude des aspects suivants :

- maniabilité, résistance à la compression, à la traction par flexion et à la traction par fendage ;
- vides communicants ;
- perméabilité ;
- résistance aux cycles de gel-dégel ;
- caractéristiques d'adhérence.

Après avoir déterminé un dosage optimal pour chaque pays, on a étudié les aspects suivants :

- évolution de la résistance dans le temps ;
- résistance à la traction directe ;
- module d'élasticité ;
- comportement à la fatigue ;
- propriétés d'absorption du bruit ;
- structure de la matrice du béton ;
- perméabilité et effet du colmatage sur celle-ci ;
- effet des sels de dé verglaçage ;
- adhérence entre béton poreux et béton dense ;
- résistance aux rayons ultraviolets (uniquement sur des mélanges avec polymères) ;
- effet de l'humidité (uniquement sur des mélanges avec polymères).

Pour la fabrication du béton poreux, on a utilisé un malaxeur à axe vertical, avec un temps de malaxage de 1,5 min après incorporation de tous les matériaux. Le compactage des éprouvettes (cubiques, cylindriques ou prismatiques, selon le cas) a été réalisé par vibration (table vibrante en Allemagne et aux Pays-Bas, et marteau vibrant en Espagne). On a effectué la cure des mélanges sans polymère le premier jour dans un moule à 20 °C. On a ensuite procédé à leur stockage pendant 6 j à 20 °C dans un milieu saturé d'eau, et plus tard, à 20 °C et 65 % d'humidité relative (Allemagne et Pays-Bas). En Espagne, on a maintenu les mélanges le premier jour dans un moule à 20 °C, puis on les a stockés à 20 °C et 95 % d'humidité relative. Quant aux mélanges avec polymères, une cure a été faite le premier jour dans un moule à 20 °C pour éviter leur dessiccation, puis on les a stockés à 20 °C et 65 % d'humidité relative (Allemagne et Pays-Bas) ou à 20 °C et 50 % d'humidité relative (Espagne). Les différents dosages utilisés comprenaient de 1 400 à 1 500 kg de gros granulats, de 75 à 175 kg de fines, de 200 à 350 kg de ciment et de 50 à 100 l d'eau. Pour obtenir une porosité du béton suffisamment élevée, on a utilisé une courbe granulométrique discontinue. On a employé aussi bien des granulats calcaires que des granulats siliceux. Cependant, ces derniers ont été uniquement utilisés comme gros granulats afin d'assurer une résistance suffisante au polissage superficiel sous l'effet du trafic qui agit directement sur cette fraction, et non sur les fines, comme pour les bétons denses.

Le tableau III donne quelques informations sur les bétons testés en Espagne. Il présente les résultats des essais de résistance à l'arrachement

TABLEAU II  
Influence de quelques polymères sur les propriétés des bétons poreux

Clé	Nature du polymère	Effet sur la maniabilité	Effet sur l'adhérence granulat-mortier	Résistance aux rayons ultraviolets	Sensibilité à la température	Prix
A	Butylacrylique/styrole	2	1		3	1
B	Acrylique pur	2	2		3	2
C	Acrylique pur					
D	Epoxy émulsionné	1	4	4	1	5
E	Acrylique pur	2	1		3	1
F	Styrène/butadiène					
G	Acrylique/styrène	1	1	4	4	1
H	Acrylique pur	1	1	1	5	1
I	Styrène/butadiène	1	1	1	2	1

**TABLEAU III**  
**Caractéristiques de quelques bétons poreux testés en Espagne**  
**(Projet Brite/Euram BE-3415)**

Caractéristiques du béton poreux	Type de polymère					
	Sans polymère	Acrylique pur 1	Acrylique pur 2	Acrylique styrène	Epoxy émulsifiable	Styrène/butadiène
<b>Dosage par m<sup>3</sup> :</b>						
Ciment V-35 (kg)	325	250	250	250	250	250
Sable 0/5 mm (kg)	175	150	150	150	150	150
Gros granulat 5/12 mm (kg)	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400
Eau (l)	110	25	80	80	80	80
Polymère solide (kg)	-	80	25	25	25	25
<b>Résistance à la compression (MPa) au bout de 28 j</b>	114	14,7	9,7	7,4	15,4	17,2
<b>Résistance à la traction indirecte (MPa) au bout de 28 j</b>	1,8	2,2	2	1,1	1,9	2,4
<b>Densité sèche (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1 900	1 890	1 770	1 850	1 900	1 950
<b>Porosité (%)</b>	24	21	30	20	18	13
<b>Perméabilité (cm/s)</b>	1,01	1,12	2,50	0,79	0,66	0,63
<b>Perte à l'essai « cantabro » (%)</b>	24,8	19,2	29,2	80,3	24,4	20,5

effectués au moyen de l'essai « cantabro\* », utilisé habituellement sur les enrobés drainants. Des pertes inférieures à 30 % sont considérées comme admissibles pour ces matériaux. Pour les bétons poreux, on n'a pas encore pu établir avec précision une valeur limite.

La maniabilité du béton a été déterminée à l'aide de l'essai de compactage de Walz (ISO 4111). Cet essai consiste à mesurer l'affaissement d'une masse de béton contenue dans un récipient prismatique dont les dimensions intérieures sont de 200 mm × 200 mm × 400 mm, et soumise au compactage par table vibrante ou toute autre méthode. Si  $s$  est l'affaissement moyen, en mm, de la face supérieure du béton une fois compacté, le facteur de compactage  $v$  est défini par la formule :

$$v = \frac{400}{400-s}$$

Compte tenu des expériences hollandaises antérieures, une valeur initiale d'affaissement de

1,2 ± 0,02 mm a été fixée. Cette valeur offre une bonne maniabilité pour le répandage du béton avec des machines à coffrages glissants. Cependant, il faut employer une valeur supérieure si le répandage est effectué, par exemple, avec des finisseurs. Selon l'étude réalisée, la maniabilité du béton évolue plus rapidement quand on utilise des polymères. Cela signifie que le temps disponible pour le transport et le répandage du béton est plus court qu'avec des dosages sans polymère, en particulier à des températures et des proportions de polymères élevées. Le type de polymère employé est également important, comme le montrent les résultats du tableau III.

### **Influence de la granulométrie des granulats**

La figure 1 montre l'effet de la taille des granulats sur la résistance à la compression du béton (on a obtenu des résultats similaires pour la résistance à la traction par fendage). Dans le cas

\* L'essai connu comme « cantabro » a été mis au point en Espagne pour l'étude des enrobés drainants. Il s'agit plus précisément de soumettre, une par une, des éprouvettes Marshall à l'effet de 300 rotations dans un tambour Los Angeles, sans intervention des boulets traditionnels, à une température bien définie (25 °C). L'abrasion, exprimée par une perte de masse en pourcentage, est portée sur un graphique en fonction de la teneur en liant. La perte par usure diminue lorsque la teneur en liant augmente et la courbe présente une pente qui se réduit à partir d'un certain pourcentage de bitume qui semble correspondre au minimum assurant une cohésion suffisante de l'enrobé. Cet essai fait l'objet de la norme NLT - 352/86 (normes du CEDEX, Centre d'études et d'expérimentation des travaux publics). Dans ces essais, pour déterminer la cohésion des bétons poreux, on a suivi la même méthode, mais en utilisant des éprouvettes cylindriques de 15 cm de diamètre et 10 cm de hauteur à la place des éprouvettes Marshall.

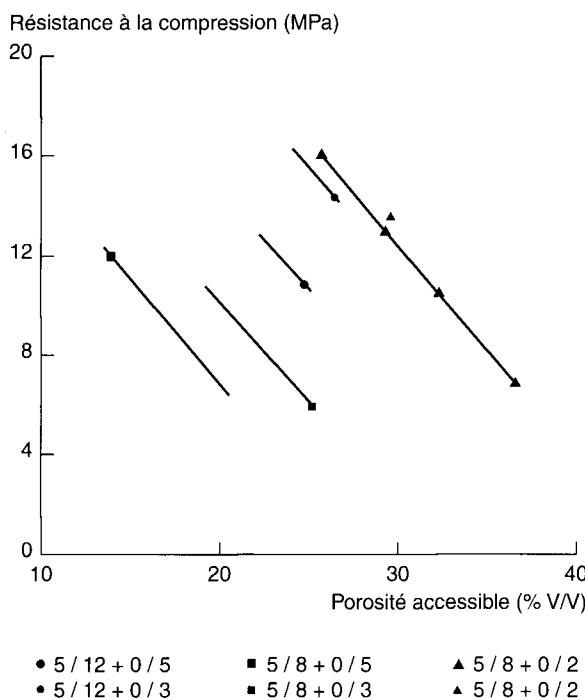


Fig. 1 - Rapport entre la résistance à la compression simple et la porosité pour différentes granulométries des granulats (dosages sans polymère).

des mélanges avec des granulats 5/8 et 0/2 mm (symbolisés par des triangles sur la figure), un rapport à peu près linéaire entre la porosité et la résistance à la compression (ligne continue) a été obtenu dans le domaine de variation de la porosité exploré. Ce rapport linéaire est également applicable aux résultats obtenus avec d'autres tailles de granulats (lignes discontinues). Cette figure montre clairement comment l'augmentation de la porosité entraîne une réduction de la résistance. Il faut donc arriver à un compromis entre ces différentes variables, si l'on spécifie des valeurs minimales de classes granulaires comme conditions préalables.

Pour étudier l'influence de la granulométrie des granulats, il convient de différencier en particulier les résultats correspondant aux gros granulats des résultats correspondant aux éléments fins. Pour le granulat 5/12 comme pour le 5/8, la résistance et la porosité augmentent quand la taille maximale des éléments fins diminue (0/2, 0/3 et 0/5 ; d'une manière plus sensible dans le cas du 5/8). Cela peut s'expliquer dans la mesure où plus la courbe granulométrique résultante est discontinue (par exemple 0/2+5/8 par rapport à 0/5+5/8), plus la stabilité de la structure du squelette minéral augmente (nombre plus élevé de contacts de grosses particules à porosité égale) et vice-versa. Dans le cas de courbes discontinues, on peut compacter l'échantillon plus énergiquement tout en maintenant une porosité élevée. En revanche, dans le cas de courbes continues, un compactage plus énergique ferme la structure et réduit encore la porosité. Quant aux éléments

fins, la résistance et la porosité augmentent avec la taille maximale du gros granulat. Cette tendance est semblable à celle que l'on constate dans les bétons traditionnels.

En résumé, nous pouvons confirmer la tendance à la réduction de la résistance due à l'augmentation de la porosité. Nous pouvons également en conclure que l'on obtient de meilleurs rapports résistance-porosité avec des granularités discontinues ainsi qu'en augmentant le calibre des gros granulats.

## Influence des additifs

Nous avons dit plus haut qu'un des moyens pour augmenter la résistance des bétons poreux utilisés pour les couches de roulement de chaussées consiste à employer des additifs. Dans le cadre du programme expérimental réalisé, on a étudié l'effet sur ces matériaux de plusieurs types de polymères, de fumée de silice et de quatre types de superplastifiants. En ce qui concerne les polymères, on a d'abord choisi neuf types différents pour analyser leur influence sur les résistances, puis on a sélectionné le plus approprié. Toutes les formulations utilisées étaient identiques, avec 10 % de polymère (solides) par rapport au poids du ciment, à l'exception du type spécifique utilisé. On a étudié la résistance à la compression simple, à la traction par flexion et à la traction par fendage. La figure 2 montre les résultats obtenus (porosité et résistance) avec ces différents mélanges dans le cas des essais de compression simple. Il est difficile d'interpréter correctement l'effet de chaque polymère sur le matériau à partir de cette figure, si l'on ne tient pas compte de la variation de la résistance avec la porosité pour les différentes classes de granulat employées (fig. 1). C'est pourquoi on trouve également sur la figure le rapport linéaire, défini dans le paragraphe précédent, entre résistance et porosité (lignes discontinues). On peut en déduire qu'on obtient les meilleures valeurs de résistance avec les polymères A (butylacrylique/styrole), C (acrylique pur), E (acrylique pur), F (styrène/butadiène) et H (acrylique pur), et les moins bonnes avec le polymère G (acrylique/styrène). Les polymères B (acrylique pur), D (époxy émulsionné) et I (styrène/butadiène) donnent des résultats moyens.

En outre, on a étudié l'influence du pourcentage de polymères sur les résistances à la compression et à la traction indirecte, en utilisant le polymère E (acrylique pur). La figure 3 montre les résultats de résistance à la compression. On peut en déduire que le pourcentage de polymères influence peu la résistance à la compression (la conclusion est semblable en ce qui concerne la résistance à la traction indirecte). Par conséquent, l'ajout de polymère augmente la résistance à la

### Influence des additifs sur la résistance à la compression simple

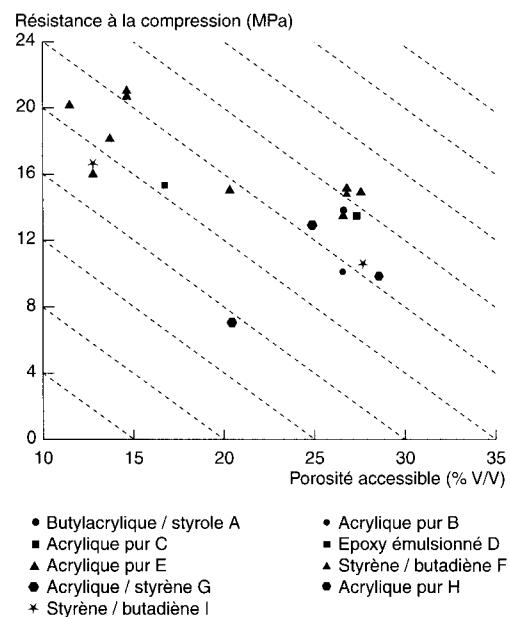


Fig. 2 - Différents types de polymères.

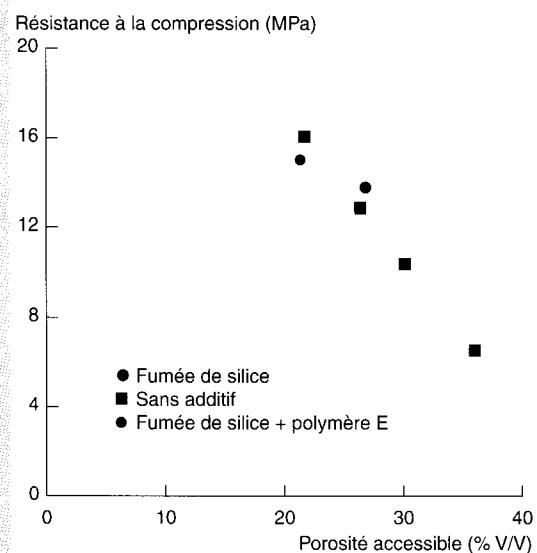


Fig. 4 - Ajout de fumée de silice (granulats 0/2 et 5/8).

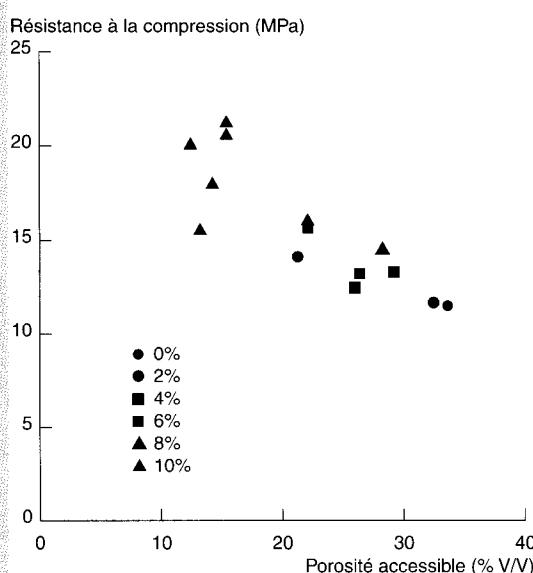


Fig. 3 - Pourcentage de polymère (polymère acrylique pur E - granulats 0/5 et 5/12).

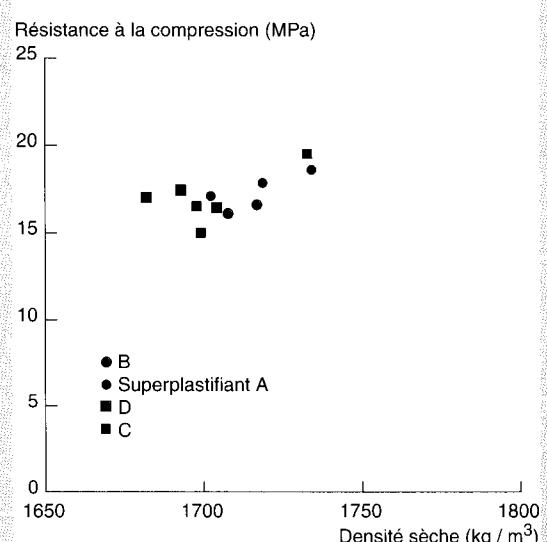


Fig. 5 - Utilisation de différents types de superplastifiants (polymère acrylique pur E - granulats 0/1 et 4/8).

traction par flexion du béton, mais n'améliore pas sensiblement les résistances à la compression et à la traction par fendage.

Enfin, on a testé deux mélanges pour étudier l'effet de l'addition de fumée de silice. L'un ne contenait que de la fumée de silice, tandis que l'autre contenait également 10 % de polymère (solides) par rapport au poids du ciment. La figure 4 présente les résistances à la compression simple obtenues dans ce cas. Comme on peut le constater, la fumée de silice n'a pas d'effet important. Il en est de même pour les résistances à la traction par flexion et à la traction indirecte.

Il faut également considérer que l'ajout de polymère réduit la quantité d'eau nécessaire pour remplir les conditions relatives à la maniabilité du béton. Si l'on utilise 10 % de polymère (solides) par rapport au poids du ciment, la réduction d'eau est suffisante. Mais si l'on emploie uniquement 5 %, il faut ajouter de l'eau, avec les effets négatifs que cela implique sur la résistance et la durabilité. Il faut alors ajouter des plastifiants pour réduire aussi la quantité d'eau.

Dans le programme expérimental réalisé, on a étudié l'effet de l'addition de superplastifiants sur les résistances. Pour cela, on a utilisé quatre types différents de superplastifiants dans un mélange avec 5 % de polymères (solides) de type E (acrylique pur). La figure 5 montre les résultats des résistances à la compression simple obtenues dans ce cas, par rapport à la densité sèche des échantillons (on a atteint des résultats analogues pour les résistances à la traction par flexion). Sur cette figure, on peut constater que le type de superplastifiant utilisé n'a pas d'influence importante sur les résistances obtenues.

## Propriétés hydrauliques et mécaniques

Dans ce paragraphe, nous résumons les principaux paramètres hydrauliques et mécaniques déterminés durant le programme expérimental. Une perméabilité d'environ 0,01 m/s a été obtenue pour une porosité de 25 % (fig. 6). On peut constater que la perméabilité est tout particulièrement conditionnée par la granulométrie des éléments fins utilisés (0/2, 0/3, 0/5) et non par celle des gros granulats (5/8, 5/12). Cela peut être dû à l'augmentation de la distance entre gros granulats quand les fines n'entrent pas dans les pores créés par les premiers. Cela produit des pores d'une plus grande continuité. La quantité de mortier a également une influence importante sur la perméabilité.

Les résultats de quelques expériences préliminaires aux Pays-Bas révèlent qu'il faut une porosité d'eau moins 25 % pour obtenir la même réduction du bruit qu'avec des matériaux poreux concurrents. Par ailleurs, au vu des résultats présentés ci-dessus, on peut constater que porosité et résistance sont directement liées. Selon les résultats expérimentaux obtenus, les résistances maximales à la compression simple, à la traction par flexion et à la traction par fendage que l'on peut obtenir avec une porosité de 25 % sont, respectivement, de 18 MPa, de 4 MPa et de 2 MPa environ. Suivant les structures adoptées dans chaque cas, il faudra utiliser une proportion différente de polymère (10 %, 5 %, 0 %). À ce sujet, il convient de rappeler qu'il est indispensable d'optimiser les ajouts de polymères, qui augmentent sensiblement le coût de production du béton.

Fig. 6 - Rapport entre la porosité et la perméabilité pour différentes granulométries des granulats.

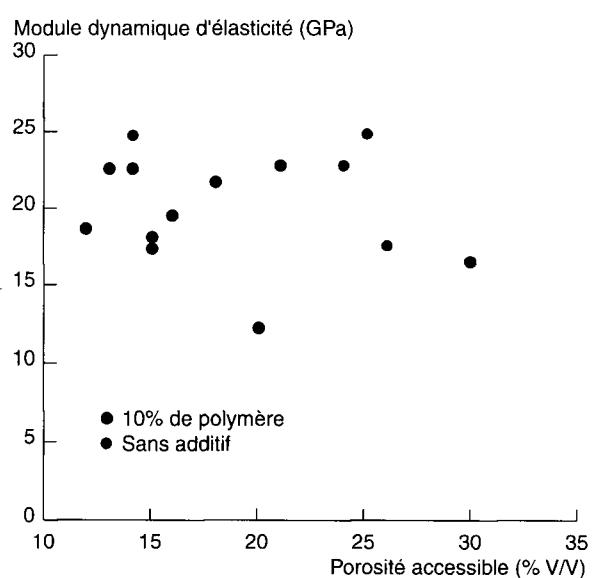
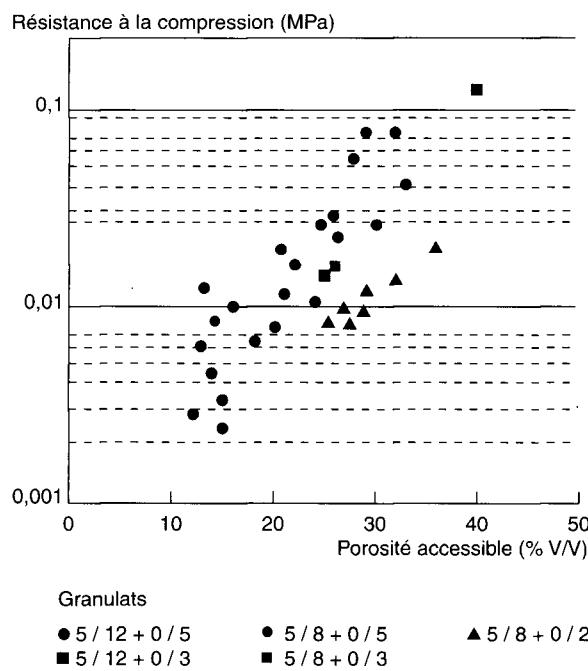


Fig. 7 - Effet du polymère sur le module dynamique d'élasticité (polymère type E - granulats 0/5 et 5/12).

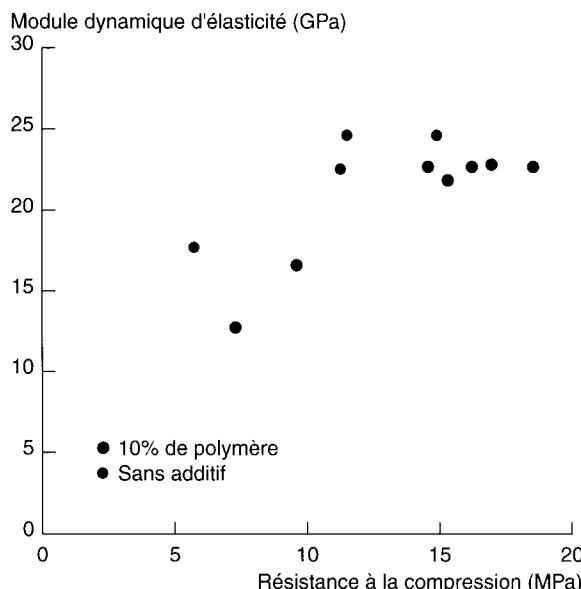


Fig. 8 - Effet du polymère et de la résistance à la compression simple sur le module dynamique d'élasticité (polymère acrylique pur E - granulats 0/5 et 5/12).

On a mesuré le module d'élasticité dynamique du béton poreux par ultrasons, en adoptant pour le calcul un coefficient de Poisson de 0,20. Les figures 7 et 8 montrent respectivement l'influence de la porosité et de la résistance à la compression sur le module d'élasticité dynamique. Selon ces résultats, l'ajout de polymère réduit le module d'élasticité. Pour une porosité de 25 %, ce module est de l'ordre de 20 à 25 GPa.

## Durabilité

On a étudié la durabilité du béton poreux au travers de la résistance aux cycles de gel-dégel ; l'usure de surface et la résistance à l'arrachement des granulats (impacts mécaniques) et la résistance aux cycles d'humidification et de séchage. Les cycles de gel-dégel ont une grande influence sur la dégradation des chaussées dans les pays au climat froid, en particulier quand on y utilise des sels de dé verglaçage. Dans ce cas, le béton poreux situé dans la couche de roulement de la chaussée est soumis aux conditions les plus critiques. On a utilisé plusieurs types de polymère pour déterminer celui donnant les meilleurs résultats de durabilité.

Aux Pays-Bas, les échantillons à tester ont été prélevés sur des éprouvettes cubiques, de 14 j sous forme de témoins cylindriques de 10 cm de diamètre, dont on a scié les faces supérieure et inférieure. On a ensuite stocké les éprouvettes à 20 °C et 65 % d'humidité relative. 28 j après leur fabrication, les éprouvettes ont été nettoyées et débarrassées de toutes les particules qui ont pu s'en détacher. En Allemagne, des éprouvettes

cubiques de 10 cm d'arête ont été fabriquées puis stockées à 20 °C et 56 % d'humidité relative ; les essais ont été conduits 28 j après fabrication. Avant de les soumettre aux cycles de gel-dégel, on a placé les éprouvettes dans une solution d'eau avec 3 % de chlorure de sodium pendant 24 h, puis retiré de l'eau pendant une demi-heure pour assurer leur essorage.

Chaque cycle de gel-dégel était composé des phases suivantes :

- congélation à - 20 °C pendant 16 h et 95 % d'humidité relative ;
- dégel à 20 °C pendant 7,5 h dans l'eau avec 3 % de chlorure de sodium ;
- essorage pendant une demi-heure.

On a déterminé la perte de poids des éprouvettes tous les dix cycles de gel-dégel en recueillant les particules libres qui ont été séchées et pesées. Cinq éprouvettes ont été testées pour chaque formulation. On n'a pu déterminer la résistance à la compression finale des éprouvettes en raison de leur dégradation notable pendant l'essai.

Le tableau IV indique, pour différents types de polymères et pour deux mélanges différents (5 % et 10 %), le nombre de cycles nécessaire pour obtenir une perte de poids de 10 %. Ce tableau permet de comparer l'effet de chacun des polymères testés et de leur dosage. Les résultats montrent qu'en général la résistance aux cycles de gel-dégel augmente avec la teneur en polymère. Par ailleurs, le type de polymère est fondamental. Selon les résultats du tableau IV, les polymères A (butylacrylique/styrole), C (acrylique pur), E (acrylique pur) et F (styrène/butadiène) permettent un meilleur comportement du béton poreux que les polymères B (acrylique pur) ou I (styrène/butadiène).

Outre la procédure d'essai type décrite ci-dessus (congélation dans l'air et décongélation sous l'eau), on a réalisé des essais sur des éprouvettes de béton poreux en maintenant 1 cm de leur partie inférieure immergée dans une solution d'eau avec

TABLEAU IV  
Résistance aux cycles de gel-dégel

Polymère	Nombre de cycles pour 10 % de perte de poids	
	5 % de polymère (matière solide)	10 % de polymère (matière solide)
Butylacrylique/styrole A	41	54
Acrylique pur B	-(a)	33
Acrylique pur C	36	54
Acrylique pur E	50	60
Styrène/butadiène F	42	47
Styrène/butadiène I	39	26
(a) Non mesuré		

3 % de chlorure de sodium. Cette procédure a été utilisée pour tenter d'adapter l'essai aux conditions de la pratique car, en situation réelle, la zone inférieure de la couche de roulement poreuse peut être saturée pendant une certaine période de temps après la pluie. Dans ces conditions, sous des climats froids avec des températures inférieures à zéro la nuit, et supérieures à zéro le jour, la couche de roulement en béton poreux, saturée sur une certaine épaisseur, est soumise à des cycles de gel-dégel journaliers qui pourront la dégrader sensiblement. Cette procédure de détermination conduit à 10 % de perte de poids plus rapidement que la précédente, ce qui la rend donc plus sévère. Selon les résultats obtenus, le polymère E (acrylique pur) offre une plus grande résistance aux cycles de gel-dégel que les polymères C (acrylique pur) ou F (styrène/butadiène). Par ailleurs, l'incorporation de fumée de silice améliore cette résistance.

Pour évaluer la résistance du béton poreux à l'arrachement des particules de granulat (par la résistance à des impacts mécaniques), on a eu recours à l'essai « cantabro ». La figure 9 présente les résultats obtenus sur plusieurs éprouvettes de béton poreux soumises à cet essai pendant 300 cycles. L'interprétation des résultats pour ce matériau n'a pas encore été assez étudiée, mais elle apporte une estimation qualitative de la cohésion des particules de granulat dans le béton et de la résistance à l'arrachement, suffisante pour effectuer une comparaison entre différents mélanges. En particulier, une bonne corrélation entre la perte de poids des éprouvettes et leur résistance à la compression simple initiale a été obtenue. Dans le cas des enrobés poreux, on fixe, pour des raisons pratiques, une valeur limite à 30 % de perte de poids, mais cette limite n'a pas été vérifiée pour les bétons poreux. Selon les résultats présentés sur la figure 9, ce critère serait, pour les enrobés poreux, respecté pour une résistance à la compression simple de l'ordre de 10 MPa. Par ailleurs, on peut constater sur cette figure que l'ajout de polymères n'a pas d'effet important sur la perte de poids obtenue.

Étant donné que les polymères, et donc le béton poreux, peuvent se dégrader quand ils sont soumis à des cycles d'humidification et de séchage, plusieurs essais ont été réalisés pour étudier ce phénomène. Pour cela, on a soumis plusieurs éprouvettes prismatiques de béton poreux à des cycles consistant à les stocker dans l'eau pendant 2 j, puis à les sécher dans une atmosphère à 20 °C et 65 % d'humidité relative pendant 12 j. Après un nombre donné de cycles, on a déterminé la résistance à la traction par flexion de trois éprouvettes et on l'a comparée avec celle des trois éprouvettes de référence stockées en permanence à 20 °C et 65 % d'humidité relative. Aucune variation de la résistance des éprouvettes n'a été observée après cinq cycles de ce type.

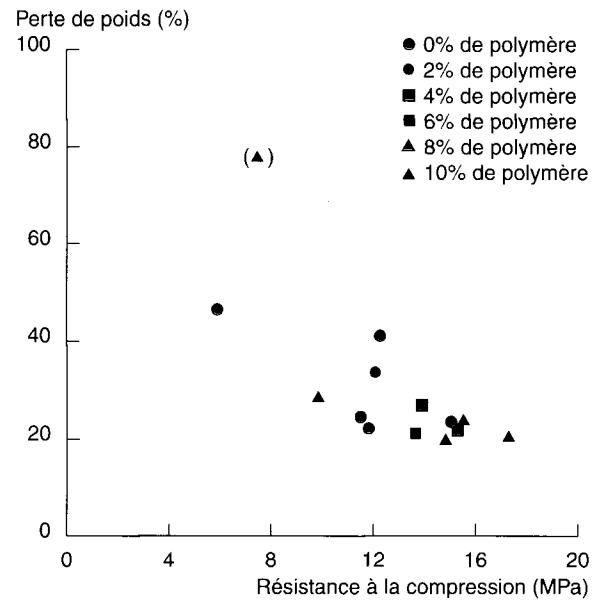


Fig. 9 - Effet de la proportion de polymère sur la perte de poids dans l'essai « cantabro » au bout de 300 cycles (polymère acrylique pur E - granulats 0/5 et 5/12).

## Analyse structurelle

L'analyse structurelle que nous décrivons dans ce paragraphe a été réalisée dans le but d'évaluer la contribution d'une couche de roulement en béton poreux à la portance de la chaussée d'un tronçon expérimental construit sur l'axe dit « axe de la couleuvre » (*eje del Culebro*), partie intégrante de la future route express M-50 qui fait le tour de Madrid. Ce tronçon a été réalisé dans le cadre du projet Brite-Euram déjà mentionné.

La section structurelle projetée initialement était composée de 8 cm de matériau bitumineux, de 22 cm de béton compacté au rouleau et de 20 cm de sol traité au ciment. Supposant une adhérence totale entre la couche en matériau bitumineux et celle en béton compacté au rouleau, cette dernière, soumise aux contraintes induites par le trafic, se trouve alors dans la situation la plus défavorable. Comme nous l'avons dit dans les paragraphes précédents, des polymères ont été incorporés dans les bétons poreux utilisés pour les couches de roulement étudiées dans ce projet, afin d'améliorer leur résistance, ce qui par ailleurs augmentait sensiblement leur coût. C'est pourquoi, quand il a été question de remplacer la section d'origine et d'y mettre en place une couche de roulement en béton poreux, on a jugé nécessaire d'en réduire l'épaisseur autant que possible. La structure de chaussée proposée comportait donc une épaisseur minimale de béton poreux compatible avec le procédé de construction (5 cm), et une épaisseur maximale de béton poreux compacté au rouleau pouvant être correctement compacté en place (25 cm). Ainsi, la section structurelle finalement adoptée était constituée de 5 cm de béton poreux, de 25 cm de béton compacté au rouleau et de 20 cm de sol traité au ciment.

Une fois définies les deux sections structurelles, envisagées en alternative, l'objectif de l'étude était de vérifier que les contraintes induites par les charges de trafic sur la couche la plus critique, c'est-à-dire celle en béton compacté, était semblable dans les deux cas. Par ailleurs, pour évaluer l'équivalence structurelle de la couche de roulement en béton poreux par rapport à une autre en matériau bitumineux, on a analysé les contraintes produites par les mêmes charges sur la section composée de 8 cm de matériau bitumineux, de 25 cm de béton compacté et de 20 cm de sol traité au ciment ; la seule différence entre la section adoptée sur le tronçon de l'axe de la couleuvre et cette dernière était donc la substitution des 8 cm d'enrobé par 5 cm de béton poreux. Pour cela, on a utilisé un logiciel faisant appel à un modèle multicouche élastique. Comme chacun sait, les modèles multicouches sont fondés sur l'hypothèse que les différentes couches de la chaussée sont indéfinies horizontalement. Avec ce type de modèles, il n'est donc pas possible d'estimer les contraintes et les déformations près des joints ou des coins de dalles. En revanche, on peut évaluer celles qui se produisent dans la partie centrale des dalles. Si ces forces et ces déformations s'exerçant au centre des dalles sont semblables sur deux sections structurelles de chaussée différentes, et si les espacements de joints (ou des fissures) sont similaires, on peut raisonnablement supposer que les contraintes et les déformations au niveau des joints ou des coins des dalles seront également semblables dans les deux cas.

Dans l'analyse multicouche réalisée, les valeurs suivantes ont été adoptées pour les paramètres élastiques des matériaux (respectivement, pour chaque cas, module d'élasticité et coefficient de Poisson) :

- matériau bitumineux, 6 000 MPa et 0,35 ;
- béton compacté au rouleau, 30 000 MPa et 0,2 ;
- sol traité au ciment, 7 000 MPa et 0,2 ;
- couche de forme, 100 MPa et 0,4.

En ce qui concerne le béton poreux, les résultats expérimentaux présentés ci-dessus et, en particulier,

les résultats d'essais du matériau qui allait être utilisé sur le chantier, obtenus à l'Université polytechnique de Catalogne, ont donné, pour le module d'élasticité, une plage de variation comprise entre 17 200 et 25 100 MPa, dans l'hypothèse d'un coefficient de Poisson de 0,2 ; et une marge de variation entre 14 200 et 20 700 MPa, dans l'hypothèse d'un coefficient de Poisson de 0,3. Dans les deux cas, on a écarté quelques résultats très faibles. Finalement, pour ce matériau, les couples de valeurs suivants (respectivement pour chaque cas, module d'élasticité et coefficient de Poisson) :

- a) 17 500 MPa et 0,2 ;
- b) 25 000 MPa et 0,2 ;
- c) 15 000 MPa et 0,3 ;
- d) 20 000 MPa et 0,3 ;

ont été sélectionnés.

Pour la nature du contact entre couches, on a adopté comme hypothèse une adhérence parfaite entre la couche en matériau bitumineux et celle en béton compacté au rouleau, entre cette dernière et celle en béton poreux, et entre celle de sol traité au ciment et la couche de forme. Quant au contact entre la couche en béton compacté au rouleau et celle de sol traité au ciment, le calcul est fait sous les deux hypothèses d'une adhérence parfaite et d'une adhérence nulle, et la moyenne des valeurs obtenues avec ces deux hypothèses a été adoptée.

Dans tous les cas, on a considéré que les chaussées étaient sollicitées par deux roues jumelées, chacune d'elles ayant une empreinte circulaire de 12,5 cm de rayon. On est parti de l'hypothèse selon laquelle les centres de ces empreintes étaient séparés de 37,5 cm et que la pression de gonflage des pneumatiques était égale à 0,662 MPa. Ces valeurs équivalent à une charge totale de 65 000 N, c'est-à-dire la moitié de la charge maximale par essieu simple de 13 t autorisée par la législation espagnole. Le tableau V permet de comparer les valeurs maximales des tractions obtenues dans chaque cas dans la couche en béton compacté au rouleau.

TABLEAU V  
Tractions maximales dans la couche en béton compacté (MPa)

Type de structure	Contact béton compacté/sol traité au ciment		Valeur moyenne (interface collée-non collée)	% moindre valeur
	Collé	Non collé		
Section 125 : 8 cm MB + 22 cm BC + 20 cm SC	0'418	0'987	0'703	111
Section 025 : 8 cm MB + 25 cm BC + 20 cm SC	0'397	0'867	0'632	100
Section axe couleuvre : 5 cm BP + 25 cm BC + 20 cm SC Paramètres élastiques du béton poreux : E = 17500 v = 0,2 E = 25000 v = 0,2 E = 15000 v = 0,3 E = 20000 v = 0,3	0'415 0'407 0'412 0'407	0'888 0'853 0'888 0'861	0'652 0'634 0'650 0'634	103 100 102 100
MB = Matériau bitumineux ; BP = Béton poreux ; BC = Béton compacté ; SC = Sol traité au ciment				

De ces résultats, on peut tirer les conclusions suivantes :

- la structure de chaussée adoptée sur le tronçon expérimental de l'axe de la couleuvre a une portance supérieure à celle proposée initialement, puisque les contraintes exercées sur la couche la plus critique sont sensiblement réduites ;
- en ce qui concerne également la portance, une épaisseur de 5 cm de béton poreux peut être considérée comme équivalente à une épaisseur à 8 cm de matériau bitumineux.

## Résumé et conclusions

Nous avons présenté dans cet article une étude expérimentale de bétons poreux pour la couche de roulement de chaussées en béton, ainsi que l'analyse d'une section possédant ce type de couche de roulement.

L'étude expérimentale a donné les conclusions suivantes.

- ◆ La maniabilité des bétons poreux modifiés au polymère diminue davantage pendant la première heure suivant le malaxage que celle des bétons sans polymère. Cette diminution dépend du type et de la teneur en polymère ainsi que de la température.
  - ◆ Pour la même granulométrie des gros granulats, la résistance et la porosité augmentent quand la taille maximale des éléments fins diminue. Par ailleurs, on a constaté qu'il existe un rapport inversement proportionnel entre la résistance et la porosité.
  - ◆ Le type de polymère influe sur la résistance du béton poreux. L'ajout de polymère augmente la résistance à la traction par flexion et n'affecte pas sensiblement la résistance à la compression simple. En ce qui concerne le module dynamique d'élasticité, il diminue quand on incorpore un polymère. La résistance aux cycles de gel-dégel est sensiblement influencée par le type de polymère utilisé, et il faut ajouter au moins 5 % de polymère (solides) par rapport au poids du ciment pour obtenir un comportement acceptable. En outre, l'ajout de polymères ne semble pas améliorer la résistance à l'arrachement (impacts mécaniques). Enfin, l'ajout de fumée de silice n'a pas d'effet important sur la résistance du béton poreux, bien qu'elle améliore sa résistance aux cycles de gel-dégel.
  - ◆ Pour les bétons poreux présentant une teneur en vides de 25 %, on peut obtenir une résistance maximale à la compression simple de l'ordre de 18 MPa et une résistance à la traction par fendage de l'ordre de 2 MPa. Si l'on ajoute un polymère, on peut augmenter la résistance à la traction par flexion jusqu'à environ 4 MPa. Le module dynamique d'élasticité est de l'ordre de 20 000 à 25 000 MPa.
  - ◆ La perméabilité du béton poreux est affectée, entre autres, par la granulométrie des éléments fins.
- En ce qui concerne l'analyse structurelle réalisée, on a étudié les contraintes induites par le trafic sur une section à couche de base en béton compacté au rouleau où l'on a remplacé 8 cm de matériau bitumineux par 5 cm de béton poreux. En comparant les deux couches, on a obtenu des valeurs de contraintes très semblables. On peut donc considérer les deux couches comme équivalentes du point de vue des contraintes induites sur la couche de base. La méthode employée permet de concevoir des chaussées à couche de roulement en béton poreux et de les comparer avec d'autres types de chaussées actuellement utilisées dans les différents pays.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMES W.H. (1985), *Concrete Pavement Design and Rehabilitation in California*, Third Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ. abril, pp. 253-265.
- EERLAND D.W., GROB Th.S., ONSTENK HJCM (1990), *Developments in noise reduction of concrete roads in the Netherlands*, 6º Simposio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Cembureau, Madrid, vol. AIII, pp. 55-64.
- EERLAND D.W., ONSTENK HJCM, UBACHS WGM (1991), *Betonwegdekken met verminderde geluidsemisie*, Informe 90510 para CUR. Intron, Holanda, abril.
- ESGLEAS F., GUYOT L., PIPIEN G., BEAUMONT J. (1992), Chaussées poreuses urbaines. Bilan et perspectives de la recherche, *Revue générale des routes et aérodromes*, 692, enero, pp. 1-5.
- JASIENSKI A. (1984), *L'usage du béton poreux en bandes d'arrêt d'urgence (BAU)*, Technique routière, 1, pp. 6-15.
- JOFRÉ C. (1993), *Hormigones porosos*. Cemento-Hormigón, agosto, pp. 992-1014.
- KELLERSMAN G.H., SMITS F. (1989), *An experiment with porous concrete top layer on JCP*, Fourth Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ., abril, pp. 615-624.
- MATHIS M.D. (1989), *Permeable base design and construction*. Fourth Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ., abril, pp. 663-670.
- MOPU (1989), Instrucción 6.1 y 2-1C. Secciones de firme. Madrid.
- NISSOUX J.-L. (1985), Bilan de l'expérience française pour le drainage des chaussées neuves. *Bulletin de liaison des laboratoires de Ponts et Chaussées*, 139, septiembre-octubre, réf. 2991, pp. 39-43.
- ONSTENK HJCM (1991), *Porous concrete - Test section Texel*. Informe n° 91185 para CUR. Informe provisional del subgrupo de trabajo 3.3 (proyecto Brite Euram BE-3415). Intron, Holanda, Septiembre.

ONSTENK E., AGUADO A., EICKSCHEN E., JOSA A. (1993), *Laboratory study of porous concrete for its use as top-layer of concrete pavements*. Fifth Int. Conf. on Concrete Pavement Design and Rehabilitation, Purdue Univ. abril, vol. 2, pp. 125-139.

PIPIEN G., CHRISTORY J.-P., COMBELLES F., RAIMBAULT G. (1992), Routes à structures poreuses. Où en est-on ?, *Revue générale des routes et aérodromes*, **694**, marzo, pp. 1-8.

RAIMBAULT G., BALADÈS J.-D., FAURE-SOULEM A. (1985), Quatre expérimentations françaises de chaussées poreuses. *Bulletin de liaison des laboratoires de Ponts et Chaussées*, **137**, mayo-junio, pp. 43-55.

RAIMBAULT G., NISSOUX J.-L., BARBE B. (1982), Les chaussées poreuses. Une technique nouvelle pour l'as-

sainissement urbain, *Bulletin de liaison des laboratoires de Ponts et Chaussées*, **117**, enero-febrero, pp. 21-31.

ROSELL J.J., AGUADO A., DOLZ J. (1987), *From theory to practice of porous cement concrete*. 1st Int. Congress, RILEM, *De la Science des matériaux au génie des matériaux de construction*, Paris, Chapman and Hall, vol. 1, pp. 218-225.

ROSELL J.J., AGUADO A., JOSA A. (1990), *Porous Concrete for Urban Pavements*, 6<sup>e</sup> Simposio Internacional sobre Carreteras de Hormigón. Cembureau, Madrid, vol. AIII, pp. 87-95.

### **Remerciements**

*Les auteurs tiennent à remercier la Commission européenne pour le financement qu'ils ont reçu par l'intermédiaire du projet Brite-Euram BE-3415.*

### **ABSTRACT**

#### **Experimental study and structural analysis of the use of porous concrete for wearing courses in concrete pavements**

A. JOSA - C. JOFRÉ - A. AGUADO - E. EICKSCHEN - E. ONSTENK

This paper describes an experimental study, conducted in the framework of the Brite-Euram BE-3415 project, of porous concrete cement which is suitable for use in the wearing course of concrete pavements. The experimental study reached the following conclusions :

- for a particular particle size distribution of large aggregate, the strength and porosity increase as the maximum size of the fines decreases. It was also observed that strength is inversely proportional to porosity ;
- for porous concrete with a voids content of 25%, it is possible to achieve an unconfined compressive strength of the order of 18 MPa and a splitting tensile test strength of 2 MPa. The addition of a polymer can increase the bending tensile strength to approximately 4 MPa. The dynamic modulus of elasticity ranges between approximately 20 000 and 25 000 MPa.