

LE SOUFFRE EN CONSTRUCTION ROUTIERE
SES APPLICATIONS EN AFRIQUE

A. REMILLON
Conseiller Scientifique
SCREG ROUTES

JJ. CHAUVIN
Directeur du Laboratoire
de Développement
CETE

A. CARPENTIER
Vice-Président
THE SULPHUR INSTITUTE

INTRODUCTION

Depuis une quinzaine d'années, de très nombreuses publications ont été consacrées à l'emploi intensif du soufre en technique routière.

Dans un premier temps, ces communications portaient sur le soufre utilisé en association avec les bitumes, soit en vue de modifier dans un sens favorable les propriétés de ces derniers, soit afin d'en réduire la consommation et apporter ainsi une contribution aux problèmes énergétiques posés aux pays non producteurs de pétrole.

Ensuite, et dans le même souci de faire face à une réduction éventuelle des approvisionnements, des recherches très importantes, dont il a été fait état dans les différents congrès, et tendant à substituer purement et simplement le soufre au bitume, ont été entreprises. Une nouvelle génération de liants faisait ainsi son apparition. Plusieurs communications sur ces différents thèmes ont été présentées à chacun des congrès et colloques organisés par la Fédération Routière Internationale et portaient, soit sur les résultats de nouvelles recherches, soit sur la description des chantiers réalisés.

Alors direz-vous, pourquoi une communication de plus sur ce sujet, où semble-t-il, tout a été dit, et qui, de plus, a perdu de son acuité depuis que le marché pétrolier a retrouvé son calme?

Il nous a semblé que, devant un auditoire de qualité composé d'éminents chercheurs, de praticiens avertis ouverts aux techniques les plus innovantes et de spécialistes des matériels toujours disponibles pour apporter aux équipements les adaptations nécessaires ou en concevoir de nouveaux, il convenait de faire le point sur l'évolution des techniques à base de soufre et d'indiquer les idées et voies nouvelles qui semblent se dessiner dans ce domaine.

Dans cette communication et après avoir rappelé quelques unes des propriétés du soufre, ainsi que leur conséquences pratiques, nous aborderons successivement les mortiers et béton de soufre, puis les techniques basées sur l'emploi simultané du soufre et du bitume et, tout particulièrement, une nouvelle approche de la conception des enrobés.

On entend souvent dire que le prix du soufre est trop élevé et que, par voie de conséquence, le développement des techniques qui en font usage s'en trouve compromis. Cela peut, bien entendu, être dit de tous les produits. Mais qu'en est-il réellement dans le cas qui nous préoccupe?

Les deux tableaux suivants ramènent à sa juste valeur cette affirmation et permettent une vision plus réaliste des choses, le soufre ne se classe pas si mal, bien avant les produits organiques.

QUELQUES PRIX DES MATIERES
PREMIERES VRAC.

=====

Juin 1986 Départ HT

NATURE	PRIX / Tonne	
	FF	U.S. \$
Ciments CPA-CPJ	390	54
Chaux grasse Vive 0/4	450	62
Soufre 0/5	1125	155
Bitume routier	1160	160
Soufre fondu	1200	155
Soufre écailles	1235	170
Bitume industriel oxydé	1540	212
Ciments alumineux courant	1560	215
Polyéthylène Récupération	3350	462
Ciments alumineux réfractaires	3800	524
Latex	6200	855
Elastomère Poudre SBS	14500	2000
Résine Epoxy	21000	2900

*1 U.S. \$ = 7,25 FF.

LIANTS COMPOSITES. VRAC.

=====

NATURE	PRIX / Tonne	
	FF	U.S. \$
Soufre plastifié	1900	248
Bitumes Elastomères routiers	2700	382
	à 3200	à 441
Bitumes Elastomères Etanchéité	3700	510
Brai Epoxy	12800	1765

L'exemple des élastomères montre, s'il en était besoin, combien il serait anti-économique de ne considérer que le prix des matières premières. Seul compte le prix des ouvrages.

I - RAPPEL DES PROPRIETES DU SOUFRE

Il est bien connu que les propriétés du soufre sont tout à fait attrayantes, mais, par ailleurs, pour le moins complexes. Il n'est, bien entendu pas question ici d'en faire un exposé complet et nous nous bornerons à rappeler celles d'entre elles qui conditionnent les principes mêmes de conception et les performances des formulations, ou qui sont en relation directe avec leurs conditions de fabrication ou de mise en oeuvre.

A - Propriétés physiques - Figure 1.

Si On voit que, contrairement au bitume dont la viscosité décroît lentement avec la température, le soufre élémentaire reste jusqu'à une température d'environ 119°C. Il présente alors une fusion franche et le produit fondu (autre différence importante par rapport au bitume à même température) est doté d'une viscosité particulièrement basse : 11 centipoises. Le liquide obtenu est de couleur jaune orangé car il est, en fait, un mélange de trois formes allotropiques en équilibre métastable.

Sa viscosité décroît lentement avec la température jusqu'à atteindre un minimum de 7 centipoises à environ 157° C. Au delà de 157°C, la viscosité croît très brusquement pour atteindre 959 centipoises vers 190°C. Le soufre est alors pâteux. Elle décroît ensuite et le soufre vaporise à une température de 444° C.

La couleur rouge brique du soufre au delà de 157° vient de la fort teneur en S soufre

Trois conséquences pratiques découlent de ces propriétés :

- La très faible viscosité du soufre entre 119° et 157°C fait de ce produit un excellent fluidifiant pour de nombreux produits organiques miscibles avec le soufre, mais non vulcanisables. Le bitume entre dans cette catégorie.

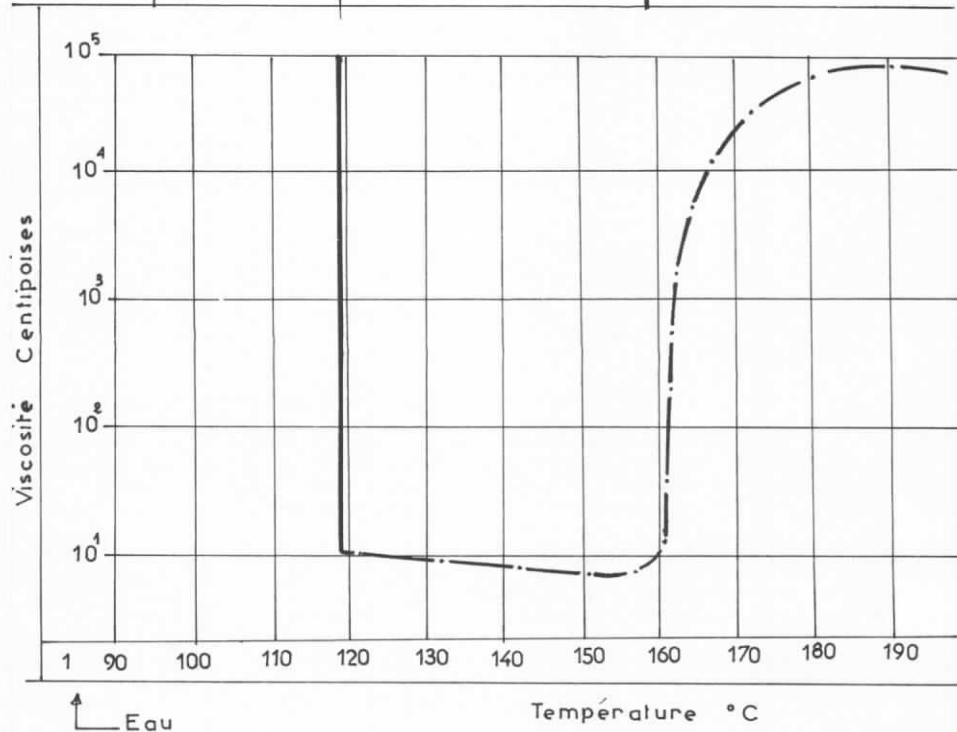
- Bien que relativement réduite (120°, 155°), la fourchette de température d'emploi du soufre est à peu près la même que celle des bitumes. Les techniciens routiers ne se trouvent donc pas particulièrement dépaysés lorsqu'ils utilisent le soufre.

- Par contre, tout se gâte au delà de 160° C. De grâce, ne surchauffez pas encore davantage des mélanges qui vous paraîtraient, vers 150° C, manquer de maniabilité. Ce serait pire!

Lorsque la température baisse, le soufre passe entre 119° C et 95,5° C par une forme allotropique prismatique S, puis retourne à son état stable S, qui est la forme orthorhombique.

Chacun de ces changements d'état génère une chaleur de transformation différente, ainsi que le montre le tableau suivant:

95,5		149	157	Température
SOLIDE			LIQUIDE	
JAUNE			JAUNE	PATEUX
Rhombique		Pri smalique	ORANGE	ROUGE
Sol		S_{β}	$S_{\gamma} + S_{\pi} + S_{\mu}$	S_{μ} ↗



	H en Cal/gr	Forme
> 160	2,8	S → S en augmentation
157	2,8	S → S
		S + S + S en équilibre
119	9,14	S → S
		S * stable
95,5	2,81	S → S
		S stable

Malgré ces seuils nettement marqués, la chaleur spécifique moyenne pour arriver à la fusion ne diffère pas fondamentalement de celle des bitumes car en dehors des seuils, la chaleur spécifique moyenne reste de 0,18 Cal/gr/°C pour S contre 0,41 à 0,52 pour les bitumes.

Par ailleurs, la présence simultanée dans un même mélange de produits de formes allotropiques différentes, ainsi que des impuretés organiques éventuelles font que les températures limites ne sont pas d'une extrême précision et que ces phénomènes de surfusion et de retard de transformation peuvent apparaître. L'importance de ces phénomènes est, bien entendu, fonction des écarts entre les températures de conservation et celles des seuils de transformation.

Une propriété tout à fait essentielle pose un problème de taille aux utilisateurs: le soufre change brusquement de masse volumique réelle lorsque la température franchit les seuils de transformation allotropiques. Les valeurs à prendre en compte, ainsi que les changements de volume qui en résultent, sont celles du tableau suivant:

Température °C	Forme	Masse volumique gr/cm ³ (ou T/m ³)	Variation relative de volume $\frac{V}{V}$ %
157	liquide	1,78	9,2
119	prisma- tique	1,96	-X- 13,6
95,5	Ortho- rhombi- que	2,06	4,9

Les contractions volumiques entre l'état fondu et les formes solides, prismatiques, puis orthorhombique, sont très importantes et conduisent à une conséquence pratique fondamentale: dans un squelette minéral à grains jointifs, le soufre ne peut cristalliser sans micro-fissuration, ce qui rend, dans les mortiers et bétons, l'interface soufre-granulat extrêmement sensible aux agents agressifs, l'eau ou les acides par exemple.

Cette malheureuse propriété justifie pleinement les techniques de plastification de soufre, que nous verrons tout à l'heure.

Disons tout de suite que, dans les mélanges soufre-bitume, le bitume joue le rôle d'un plastifiant car non seulement il permet un certain fluage, mais il favorise aussi un retard important de la recristallisation du soufre.

B - propriétés chimiques

Dans son état solide, le soufre est principalement constitué par des chaînes S bouclées. Il en résulte que, dans sa masse, le soufre présente une très grande stabilité chimique. Cette propriété fondamentale est à l'origine de l'emploi de ce matériau dans les revêtements anti-acides.

Lorsque le soufre est fondu, une partie de ses chaînes S s'ouvrent et le produit devient, au contraire, éminemment réactif. Au delà de 157°, les chaînes ouvertes tendent à polymériser par voie radicalaire, ce qui explique l'augmentation brutale de viscosité. Les conséquences pratiques de la très grande réactivité du soufre fondu sont multiples, mais toutes ne sont pas favorables.

Si elle permet la vulcanisation ou l'obtention de produits plastifiés, elle peut conduire aussi à des dégagements de SO_2 ou d' H_2S contre lesquels il convient de se prémunir, à la fois pour des raisons d'hygiène et de sécurité. L'expérience industrielle montre que, si les précautions élémentaires de ventilation et de maîtrise de la température sont prises, ce handicap reste mineur et parfaitement surmontable.

La fusion du soufre s'accompagne, en général, d'un léger dégagement de vapeur qui peut avoir tendance, si l'on n'y prend pas garde, à obturer les filtres à air des moteurs.

En revanche, le soufre élémentaire ne présente vis-à-vis des métaux aucun caractère abrasif.

C - La plastification du soufre

Le retrait intrinsèque du soufre a conduit les chercheurs à imaginer différentes méthodes de plastification. Il est bien établi maintenant qu'il est partiellement impossible d'empêcher indéfiniment le soufre élémentaire de revenir à son état le plus stable, qui est la forme orthorhombique.

Deux voies, assez différentes dans leur principe, ont été suivies et ont conduit à des solutions suffisamment fiables pour être utilisées sur le plan industriel.

La première voie consiste à profiter de la très grande réactivité du soufre fondu pour le traiter au moyen de dicyclopentadiène auquel on ajoute des oligomères destinés à bloquer la réaction après traitement et maîtriser la viscosité.

Ces produits mis sur le marché constituent la nouvelle génération des soufres plastifiés qui remplace avantageusement la première où le dicyclopentadiène était employé seul.

La deuxième voie consiste, dans le cas mortiers et bétons de soufre à traiter le mélange au moyen d'huiles silicones jouant à la fois le rôle de plastifiant et d'hydrophobants.

Notons que ces problèmes de retrait ne se posent pas dans les techniques soufre-bitume tant que la teneur pondérale en soufre du mélange ne dépasse pas 40%.

II - LES MORTIERS EN BETONS DE SOUFRE.

A - Avantages

S'agissant de matériaux enrobés à chaud, il est bien évident que le prix des mortiers et bétons de soufre est nettement plus élevé à la tonne (ou au mètre cube) que les mortiers et bétons de ciment de même granularité. Ils sont pourtant recherchés pour un certain nombre de leurs qualités que ne possèdent pas les bétons hydrauliques:

- A condition de choisir des granulats convenables non calcaires, ils résistent aux acides dans d'excellentes conditions;

- ils acquièrent, dès leur refroidissement, la quasi totalité de leurs performances définitives, ce qui permet une mise en service quasi instantanée des ouvrages;

- contrairement aux bétons hydrauliques qui restent forcément à un niveau de porosité élevé (puisque la totalité de l'eau de gâchage n'est pas mobilisée par l'hydratation du ciment), des bétons de soufre à vides quasiment nuls peuvent être formulés;

- ils peuvent être facilement colorés dans la masse au moyen de fines sélectionnées participant au remplissage;

- les produits moulés peuvent atteindre une très grande précision dimensionnelle et prendre les formes les plus complexes, puisque la maniabilité à chaud est assurée par le liant lui même, donc sans chute de résistance, ce qui n'est pas le cas des bétons hydrauliques où ce rôle est assuré par l'eau, ce qui ne va pas sans chute de résistance.

B - Principe de formulation

Le choix des granulats des liants et des adjuvants dépend de la destination du béton, du mortier ou du mastic. On n'emploiera pas de granulats calcaires ou dolomitiques si la formulation doit résister aux acides. C'est le cas de beaucoup de sols industriels ou de canalisations d'assainissement. Il en va de même pour les bétons poreux car lors de l'inhibition, on peut craindre une formation trop importante de sulfates.

Les études fort importantes entreprises à l'Institut National des Sciences appliquées de Rennes, sous la direction du professeur LAQUERBE et en liaison étroite avec l'institut du soufre, ont montré que de nombreuses fines présentaient un intérêt particulier. C'est le cas du talc, de la silice et surtout des pyrites broyées.

Si l'on veut obtenir des mélanges à forte compacité, on se rapprochera des méthodes utilisées pour la formulation des enrobés bitumineux.

Les méthodes granulométriques et l'emploi de courbes types telles que celles de la figure 2 conviennent parfaitement, sous

réserve que les granulats et fines ne présentent pas des masses volumiques réelles trop différentes.

Dans le cas contraire, par exemple si des fines de pyrites sont utilisées (MVR = 4), il convient de raisonner en volumes absolus et d'employer des méthodes dérivées de la méthode de la méthode VALLETTE employée pour la formulation des bétons hydrauliques.

C - Types de formulation Performances

Outre le moulage d'éléments préfabriqués destinés au bâtiment et qui peuvent également trouver leur place dans les murs et aménagements annexes routiers, trois types d'application ont vu le jour :

-Les bétons routiers, soit pour dalles neuves notamment pour arrêt d'autobus soit pour réparation de dalles en béton hydraulique fracturées :

les revêtements anti-acides;

-Les éléments préfabriqués pour assainissements, tout particulièrement lorsque les effluents sont à tendance acide. A titre d'exemple, les deux formulations types ont été expérimentées :

	<u>Béton 0/8</u>	<u>Microbéton 0/5</u>
Gravillon 3/8	36,0	
Sable 0/5	43,3	65,3
Pyrite 0/80	7,0	10,0
Silice 0/80		7,4
Soufre	13,3	16,9
Huile de Silicone	0,4	0,4
Masse vol. apparente T/m3	2,32	2,40
R à 7 jours MPA	31,7	47,6
RTF à 7 jours MPA	3,3	7,1
Absorption d'eau à 7 jours %		0,35

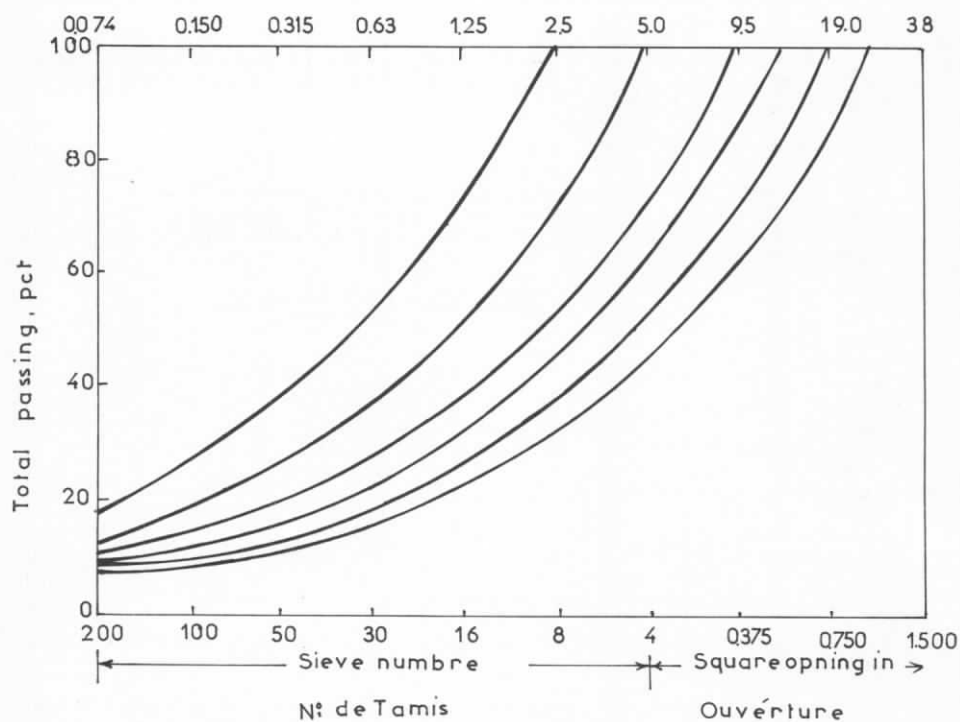
D - Conditions de fabrication et de mise en oeuvre

Suivant les tonnages à mettre en oeuvre, deux méthodes sont utilisées :

-Pour les petits tonnages, le soufre est provisionné sous forme solide en sacs ou en vrac. Les granulats sont, soit chauffés sur le site, soit commandés à la centrale d'enrobage la plus proche. Leur température est réglée vers 160° C pour tenir compte de la quantité de chaleur nécessaire pour la fusion du soufre.

-Dans le cas de tonnages importants, il est souvent plus intéressant de recevoir le soufre sous forme fondue. Il est alors livré en camions citernes dont les remorques spécialisées sont munies d'épingles de réchauffage alimentées à la vapeur. Bien

BETON DE SOUFRE
(Courbe Type)



entendu, dans ce cas, la température des granulats est maintenue à une valeur plus basse, 140°C par exemple. La fabrication est réalisée au moyen de bétonnières chauffantes ou de malaxeurs et les transports, en général, assurés par des bennes calorifugées ou en malaxeurs mobiles.

Quant à la mise en oeuvre, elle est, en général, assurée par pré vibration comme dans le cas du béton de ciment. Un réchauffage de la surface peut s'avérer nécessaire si l'on veut obtenir un aspect de surface suffisamment homogène. Pour éviter la fissuration des dalles sous l'effet du retrait, il convient de prévoir des joints. Il peut être intéressant de couler en priorité une dalle sur deux.

LE MELANGE BITUME- SOUFRE

=====

Associer le bitume et le soufre en un même liant pour réaliser des enrobés routiers, est une idée déjà ancienne.

Elle a repris au cours de la dernière décennie un intérêt nouveau, car utiliser du soufre, c'était économiser du bitume donc du pétrole.

Très vite cependant, les propriétés particulières des enrobés au bitume-soufre se sont imposées en tant que telles plaçant ces enrobés au rang des techniques routières à part entière indépendamment de toute conjoncture économique, tant sur le pétrole dont est issu le bitume que sur le soufre.

Pour décrire cette technique, seront successivement abordés trois aspects :

- Les propriétés des mélanges bitume-soufre.

- Les caractéristiques en laboratoire des enrobés utilisant ces liants

- un exemple d'application mettant à profit les particularités des mélanges bitume-soufre.

I - PROPRIETES DES MELANGES BITUME - SOUFRE

Le soufre est soluble dans le bitume à concurrence de 15% environ, au-delà il se disperse en particules dont la finesse est fonction de l'énergie mécanique utilisée pour réaliser le mélange ; en règle générale, les procédés de mélanges employés sont conçus pour disperser finement ce soufre, afin d'obtenir un mélange homogène et stable; la taille de ces particules est de l'ordre du micron, dimension parfaitement compatible avec l'épaisseur du film de liant autour des granulats qui est d'environ 10 microns.

Les proportions de soufre mélangées au bitume se situent entre 20 et 50 % et la plupart des études et réalisations effectuées, ont utilisé un mélange 70/30 (70% de bitume - 30% de soufre).

PROPRIÉTÉ DU LIANT

Le Soufre fluidifie le bitume et le liant obtenu est plus mou que le bitume pur de base : Cet effet est sensible tant que le soufre se dissout dans le bitume, au-delà, la viscosité augmente à nouveau en restant toutes fois toujours inférieure à celle du bitume pur (FIGURES 1 ET 2).

La consistance du mélange bitume-soufre évolue ensuite dans le temps (FIGURE 3).

Cette évolution est liée à la recristallisation progressive du soufre à l'intérieur du mélange.

D'un liant d'une consistance plus élevée, on arrive ainsi à un liant plus dur : cette observation est cependant à nuancer car il ne s'agit plus à ce stade d'un véritable liant, mais plutôt d'un mélange filler-bitume. Le filler étant constitué de cristaux de soufre dispersés dans le bitume.

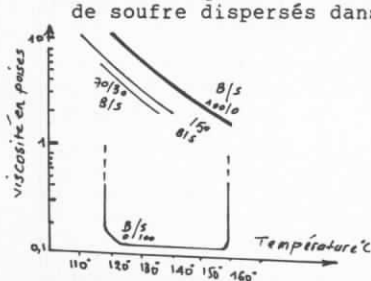


FIGURE 1

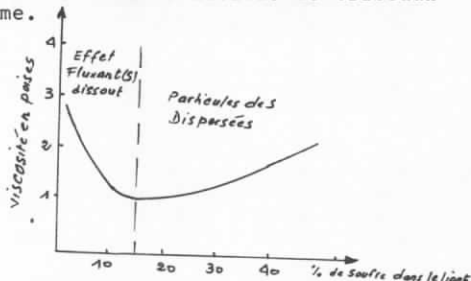


FIGURE 2

La vitesse du durcissement du mélange bitume-soufre est liée à la vitesse de recristallisation du soufre, elle-même fonction de la température. C'est ainsi que ce durcissement ne s'effectue pratiquement pas à -25°C , qu'il est complet en une quinzaine de jours à température ambiante et qu'en trois jours, il est terminé à 75°C (FIGURE 4)

Lorsqu'il est réchauffé, le mélange bitume-soufre retrouve sa consistance d'origine (FIGURE 5).

Ceci est dû au fait que le soufre n'est pas lié chimiquement au bitume et redevient liquide. Si la température est trop élevée, chimiquement avec le bitume ($T = 150^{\circ}\text{C}$).

La réaction se signale par un dégagement caractéristique de H_2S , dans ces conditions, la rigidification est irréversible et il est impossible de retrouver la consistance d'origine au réchauffement; le phénomène peut également se produire à plus basse température, mais il est très lent, c'est pourquoi les mélanges Bitume-Soufre sont généralement produits au moment de l'utilisation et ne sont pas stockés à chaud. On évite ainsi ce type de réaction.

La répétition des réchauffements (FIGURE 5) met en évidence ce phénomène par une baisse du maximum de consistance

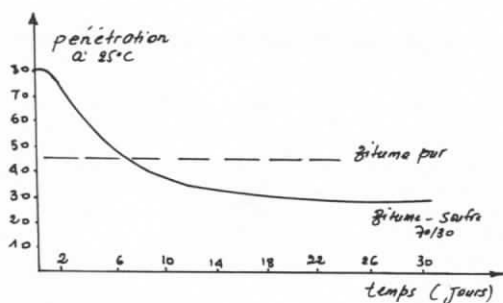


FIGURE 3

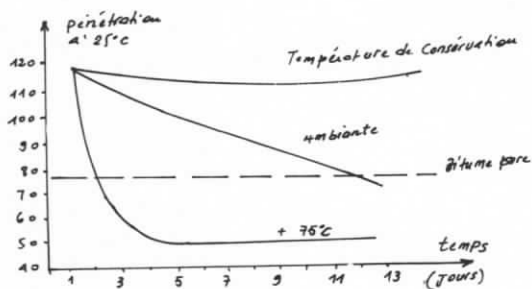


FIGURE 4

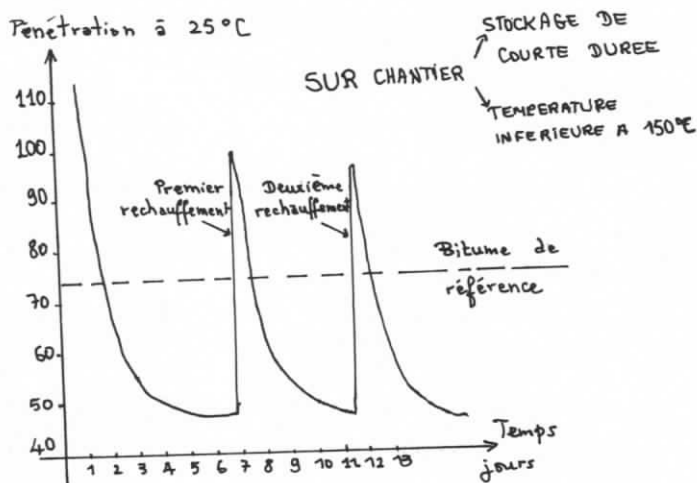


FIGURE 5

II - LES CARACTERISTIQUES EN LABORATOIRE DES ENROBES AU BITUME - SOUFRE (B S)

Les enrobés au Bitume-Soufre se sont développés selon deux voies distinctes :

Le mélange Bitume-Soufre est considéré comme un liant et on l'utilise dans les enrobés en remplacement du bitume pur à même dosage en volume, ce qui correspond à un dosage plus faible en bitume que dans un enrobé au bitume pur classique

Le Soufre est considéré comme un additif destiné à augmenter les performances des enrobés classiques : La teneur en bitume est inchangée - le Soufre est en plus.

Les enrobés au bitume - Soufre (BS) à équivalence volumique

La différence de densité entre bitume pur (environ 1) et bitume-soufre (fonction du pourcentage de soufre : environ 1,2 pour un mélange 70 bitume /30 soufre en poids) entraîne un dosage pondéral en bitume-soufre plus important qu'en bitume pur.

A titre d'exemple, un enrobé à 6 % de bitume pur sera réalisé avec 7,2 % de BS 70/30.

Cette équivalence en volume de liant utilisé entraîne l'obtention de compacité de mélange comparable à celle d'un enrobé au bitume pur et c'est là l'originalité de ces mélanges.

Ils sont en effet aussi compacts mais moins dosés en bitume, puisque dans l'exemple précédent, 7,2 % de BS correspondent à 5 % de bitume (au lieu de 6 %).

La conséquence pratique sera d'obtenir un mélange plus rigide que l'enrobé de référence, en particulier à haute température : cette propriété peut être mise à profit dans la lutte contre l'ornièrage: la FIGURE 6 en donne un exemple : avec un liant BS, on obtient un comportement similaire avec un matériau roulé (Courbe 1) à un matériau concassé (Courbe 3), alors que le même matériau roulé traité au bitume pur est beaucoup plus sensible à l'ornièrage (Courbe 2).

On peut ainsi utiliser des matériaux roulés pour réaliser des chaussées même sous fort trafic. Cette propriété a cependant des limites : si le liant BS peut compenser un manque d'angularité, il ne compensera pas un défaut de granulométrie important.

Une question souvent posée est de savoir l'intérêt d'une rigidification par le bitume-soufre, par rapport à celle obtenue en utilisant un bitume plus dur.

L'ensemble des résultats de la FIGURE 7 répond à cette question. Il représente, la valeur du FACTEUR DE RIGIDIFICATION en fonction de la valeur du module de l'enrobé de référence au bitume pur.

Le facteur de rigidification est le rapport du module de l'enrobé considéré, sur le module de l'enrobé de référence dans les mêmes conditions de températures, de temps de chargement et de dosage volumétrique

L'enrobé de référence est dans le cas présent, réalisé au bitume pur 80/100. Les essais ont permis de constater que la variation de ce rapport était linéaire en échelle semi-logarithmique.

D'une façon générale, la rigidification est plus élevée pour les faibles modules; (forte température, temps de chargement élevé) que pour les modules importants) faible température, temps de chargement court) : au-delà de 10.000 MPa, les différents liants sont même très voisins.

La FIGURE 7 C donne les résultats obtenus avec des bitumes purs de différentes pénétrations ; la FIGURE 7 A compare les rigidifications obtenues avec deux bitumes plus durs (40/50 et 20/30) et celles obtenues avec un bitume-soufre 70-30 réalisé à partir de bitume 80/100 : cette figure met en évidence la spécificité du BS par rapport à des bitumes plus durs : le BS a un comportement voisin du bitume de base pour les modules élevés, il apporte par contre une rigidité supérieure à celle d'un bitume 20/30 pour les faibles modules, d'où son intérêt pour résoudre un problème d'ornièrage à chaud sans en contrepartie être trop rigide à basse température.

La FIGURE 7 C présente les facteurs de rigidification obtenus avec différentes compositions bitume-soufre (80/20 , 70/30, 50/50): avec 50% de soufre dans le mélange, on constate un effet rigidificateur considérable : le soufre devient un liant alors que pour des dosages inférieurs, il n'est qu'une charge d'où l'usage de mélange plutôt à 30%.

Les enrobés au BS à équivalence volumique de dosage ont sensiblement les mêmes compacités que les enrobés au bitume pur de référence. Les essais réalisés indiquent par ailleurs qu'ils ont une tenue en fatigue du même ordre.

Formule	COMPOSITION GRA- NULOMETRIQUE ET DOSAGE	COMPACTITE	DEFORMATION RELA- TIVE ADMISSIBLE POUR 10^6 CHARGES	VALEUR ABSOLUE DU MODULE COMPLEXE 15°C - 10Hz EN MPa
a	0/14 mm avec	93,7	9610^{-6}	12000
b	4,2 % de bitume pur	90,6	9110^{-6}	9000
c	0/14 mm avec	98,5	13410^{-6}	10000
d	de 5,7% de bitume pur	96,3	12510^{-6}	8500
BS	0/14 avec 4,2 % de bitume et 3% de soufre	96,3	14410^{-6}	11000

La formule BS correspond au même dosage pondéral en bitume que les formules (a) et (b) et au même dosage volumétrique (Bitume + Soufre) que les formules (c) et (d) : elle est supérieure à toutes ces formules ; il faut également noter que les formules (c) et (d) ne sont pas utilisables car sensibles à l'orniérage, ce qui n'est pas le cas de la formule BS.

LE CHANTIER DU GERS

Pour illustrer ce qui vient d'être dit, rappelons qu'à la suite d'un premier chantier réalisé en 1982 en matériaux concassés, un nouveau chantier portant sur 51.000 tonnes de grave-bitume-soufre a été exécuté dans le même département en 1984.

La grave-bitume-soufre répondait à la formulation suivante :

	%
8/16 Roulé	40
3/8 Roulé	21
0/3 Roulé	17
0/2 Broyé fillérisé	20
Filler Calaire	2
	100

Liant bitume-soufre 70/30 5

Les compacités moyennes en place étaient de 90% de la compacité Duriez et de 93 % de la compacité Marshall.

La grave-bitume-soufre a été recouverte d'un enduit moncouche double gravillonnage à base de liant modifié, sauf dans les traverses où des enrobés de recyclage ont été employés.

Pour illustrer cette description, nous vous présentons les principales applications réalisées jusqu'à présent en Afrique et au Moyen Orient.

ORNIERAGE

----- Bitume Soufre 70/30
 ————— Bitume pur

[• 100 % ROULÉ
 [o 100 % CONCASÉ
 TEMPERATURE : 50°C

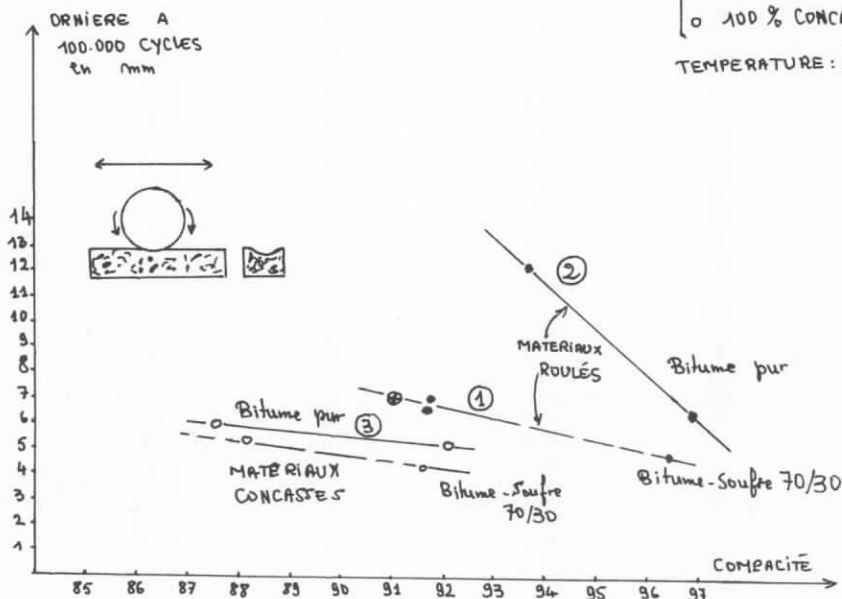


FIGURE 6

Les enrobés au BS doivent comporter un minimum de bitume pour conserver une bonne tenue à l'immersion.

Ce minimum va dépendre des possibilités d'imbibition du mélange par l'eau, donc de sa compacité; il sera de ce fait fonction des facteurs influençant la compacité, c'est-à dire essentiellement la granulométrie du mélange et l'épaisseur de mise en oeuvre : à titre indicatif, il peut être fixé à 4,5% de bitume pour une compacité de 90; il pourra être plus faible pour des compacités supérieures sans toutefois être inférieur à 3,6 %.

FIGURE 7 A

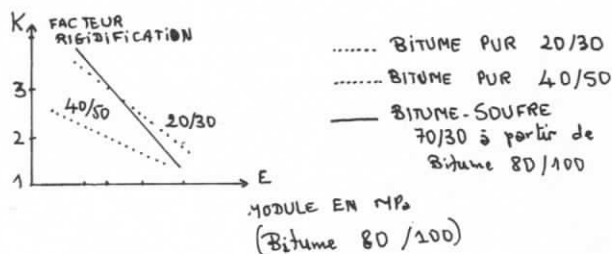


FIGURE 7 B

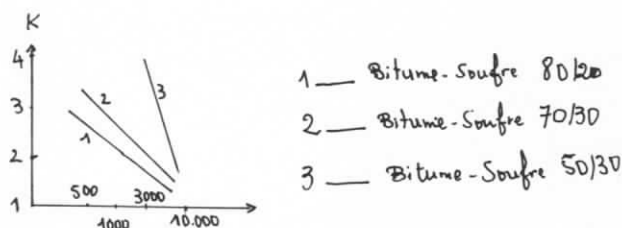
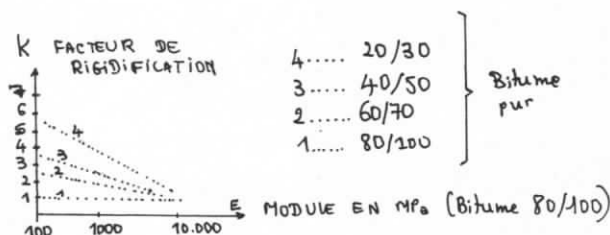


FIGURE 7 C



B - Les enrobés classiques avec addition de soufre

Liquide à la température de mise en oeuvre de l'enrobé le soufre joue le même rôle lubrifiant que le bitume et l'ensemble bitume plus soufre a le même effet qu'un dosage en bitume plus élevé sans soufre : il conduira donc à des compacités plus élevées obtenues avec une énergie de compactage plus faible.

Solide à température ambiante, le soufre n'a plus aucun caractère visqueux quelle que soit la température : il correspond à des fines minérales et le mélange ne comportera comme liant que le dosage en bitume employé mais avec une compacité plus élevée que celle normalement attendue avec ce dosage sans soufre : de tels mélanges ont des performances nettement supérieures à celles des enrobés traditionnels, notamment en comportement à la fatigue comme l'indique le tableau page 8 .

TRAVAUX AU MOYEN - ORIENT

Irak

Mai/Juin 1977

2 sections à Mosul et 2 sections à Babylone. 1 km chacun de longueur. Couches de base et de roulement construites avec de différents rapports de soufre/bitume : 20/80 - 30/60.

4.4 % à 6% de soufre pur a été utilisé avec pénétration de 60/70.
4.4% à 7.5 % de soufre/bitume a été utilisé.

Début 1981

Le Ministère des Travaux Publics a décidé de généraliser l'emploi des techniques du bitume-soufre dans l'Irak, avec la license de la SNEA (P) et la technologie.

Programme achevé en mai 1981.

KUWAIT

Juin/Juillet - décembre 1977

2 km de sections en utilisant le bitume-soufre sur l'autoroute principale au nord de la ville de Kuwait.

Le rapport de liant de bitume-soufre- 30/70.
4% à 5.1 de bitume pur a été utilisé avec pénétration de 60/70.
4.5 % à 6.1 de bitume soufre.

5000 t d'enrobé avec 90t de soufre ont été utilisés.

Suivant le succès des applications routières en 1977, un programme d'optimisation a été réalisé avec la coopération de l'Institut de Recherches Scientifiques de Kuwait et le Ministère des Travaux Publics. Le coût était US \$ 4,000,000 et l'objectif principal était l'introduction de formulations optimums pour le bitume-soufre aux spécifications de Kuwait en 1982/83. Les premières formulations commerciales ont été réalisées en Janvier 1982 sur une section de 10km.

Programme achevé en Juin 1982.

REPUBLIQUE ARABE UNIE

Février 1978

1 km de chaussée a été construite sur la nouvelle autoroute à deux passages en provenance de Sharjah à Ras Al Khaimah. Le rapport de soufre/ bitume était de 30/70 et 3,00 t d'enrobé avec 60 t de soufre ont été utilisés.

SYRIE

Depuis Juin 1978 pendant 2 ans

25 km d'une nouvelle autoroute à huit passages en provenance de Tratus à HOMS.

5000 000 t d'enrobé et 12 000 t de soufre.

ARABIE SAOUDITE

Deux applications réalisées en Juin et Novembre 1979 près de Damman chacun 1 km de longueur.

Des travaux pareils sur l'optimisation des formulations de bitume-soufre réalisés par l'Université de la Pétrole et des Minérales. Programme de trois ans - 1979 à 1981 .

Deuxième étape au début de 1981 - construction d'une section en utilisant la technologie du bitume-soufre et du sable local.

BAHRAINE

Une section construite près de Manama en 1980 - 1km.

Qatar

Juin 1981

Une couche de glissement de 6 km avec soufre/bitume 30/70 (5,000t) a été construite.

Août 1981

Section Marshall de 2 km (4,000 t)

Septembre/octobre 1981.