

Enrobés à l'émulsion de bitume pour couches de roulement.

B. ECKMANN

EUROVIA, Rueil Malmaison, France, beckmann@eurovia.com

Résumé

Les bénéfices potentiels liés à la réduction des coûts énergétiques ainsi que des risques pour l'environnement et la sécurité des travailleurs conduisent à un intérêt croissant pour l'utilisation des matériaux enrobés à l'émulsion de bitume. Les performances mécaniques actuellement possibles avec ce genre de technique restent cependant inférieures à celles obtenues après un enrobage à chaud et ont jusqu'à présent limité son domaine d'emploi aux couches de base (graves-émulsions) ou aux travaux d'entretien (enrobés coulés à froid) sur chaussées faiblement ou moyennement circulées. La réalisation de véritables bétons bitumineux à froid utilisables en couches de roulement en plusieurs centimètres d'épaisseur se heurte à des problèmes techniques non négligeables, notamment celui des conditions de mélange et de mise en œuvre permettant d'obtenir des caractéristiques mécaniques suffisantes. Cette communication présente la démarche systématique entreprise par la Société EUROVIA afin de développer les bétons bitumineux à froid. Celle-ci s'est notamment appuyée sur les résultats du programme de recherche européen OPTEL. Effectué en partenariat avec différentes entreprises et organismes de recherche, ce projet a plus particulièrement débouché sur une meilleure compréhension fondamentale du produit. L'expérience de l'entreprise nous conduit en outre à souligner le fait que l'optimisation des enrobés à froid exige une révision de nos schémas de pensée traditionnels issus de la formulation des enrobés à chaud. Cette réflexion nous a notamment permis :

- de développer des outils de laboratoire spécifiques permettant de mieux appréhender le comportement de ces matériaux lors des différentes phases de la mise en œuvre,
- d'énoncer les principes généraux d'une méthode de formulation adaptée aux matériaux enrobés à froid,
- d'adapter nos outils de fabrication (centrale d'enrobage) et de mise en œuvre.

La communication présente également le bilan des études de validation menées à ce jour dans le cadre de différents chantiers expérimentaux.

MOTS CLES : Enrobé à froid, Emulsion, Formulation, Mise en Œuvre, Matériel

1. INTRODUCTION

Pour diverses raisons, tant techniques qu'économiques, la technologie des enrobés denses à froid, plus précisément des bétons bitumineux à froid pour couches de roulement, peine à s'imposer. Si l'on s'en tient au niveau technique, il est vrai que les difficultés inhérentes à cette technologie sont de taille. Pour les surmonter, il faudra certes faire appel à de nouveaux produits et procédés mais également, nous semble-t-il, arriver à nous "libérer" des schémas de pensée et des méthodologies imposées par une longue pratique de la formulation des enrobés à chaud. C'est ce que nous allons essayer de montrer dans cette communication.

2. LA PROBLEMATIQUE DES BETONS BITUMINEUX A FROID

D'une manière générale, la performance des matériaux enrobés aux liants bitumineux est dictée par leur formulation (choix et dosage des constituants) ainsi que par les conditions de mise en œuvre. Dans le cas des enrobés à chaud, la mise en œuvre est essentiellement tributaire de la température du liant et le produit « final » est obtenu dès que celle-ci est revenue à l'ambiante. La température étant aisément contrôlable en laboratoire, il est assez facile de fabriquer des échantillons représentatifs, c'est à dire ayant une compacité proche de celle attendue sur chantier.

Il en va tout autrement dans le cas des bétons bitumineux à froid qui font appel à un liant, l'émulsion de bitume, fortement évolutif. En effet, dès la mise en contact avec les granulats, s'enclenchent des processus de déstabilisation de l'émulsion et de coalescence qu'il faut maîtriser tout au long des opérations de malaxage, de transport, répandage, compactage et mûrissement in-situ. La compacité et donc les performances finales de l'enrobé à froid seront très largement tributaires du processus de drainage et d'élimination des eaux de rupture. Nous n'avons plus affaire à un liant unique mais à un liant composite bitume + eau qu'il faut optimiser (choix et dosage des émulsifiants et du bitume) vis-à-vis de ces différentes phases.

Pour être réalistes, les études de formulation en laboratoire ne peuvent plus être aussi simples que dans le cas des enrobés à chaud. Il leur faut en effet reproduire les processus de rupture de l'émulsion ainsi que d'évacuation de l'eau aux divers stades de la mise en œuvre cités plus haut. Enfin, les propriétés mécaniques finales du produit devront être mesurées sur des éprouvettes d'où l'on aura réussi à accélérer le départ de l'eau sans en altérer la structure et les propriétés.

Dans ces conditions, il est clair que les procédures et les critères habituels de formulation des enrobés à chaud ne peuvent pas s'appliquer tels quels aux enrobés denses à froid. Le problème de la formulation des enrobés denses à froid fait apparaître des besoins spécifiques, tant au niveau de la compréhension fondamentale des phénomènes mis en jeu qu'au niveau des outils de laboratoire. A cet égard, nous avons pu mettre à profit et parfois approfondir les enseignements du programme européen OPTTEL (Potti, 2002).

3. APPORTS ET APPROFONDISSEMENT DU PROJET OPTTEL

3.1 Caractéristiques intrinsèques des constituants

OPTTEL a plus particulièrement montré l'importance de la réactivité des granulats ainsi que des caractéristiques de l'émulsion.

3.1.1 Réactivité des granulats

Pour quantifier le degré de réactivité d'un granulat donné, OPTTEL a notamment montré l'intérêt d'une technique simple, utilisable dans le cadre d'une étude de formulation. Il s'agit de l'essai dit de "remontée de pH" consistant à mesurer l'évolution, en fonction du temps, du pH d'une solution acidifiée contenant une certaine quantité de filler du matériau considéré (10g pour 200 ml d'eau à pH = 2). Ces essais ont permis de différencier clairement les granulats à comportement acide ou basique. Dans le cas de matériaux faiblement ou moyennement réactifs, nos études nous ont cependant montré qu'il était

souhaitable de se rapprocher le plus possible des conditions réelles en augmentant la surface exposée de filler (Delfosse, 2002).

La courbe d'évolution de la remontée de pH nous donne ainsi un critère de réactivité des granulats permettant d'orienter le choix du couple émulsifiant/acide. Cette information doit cependant être couplée avec la valeur de leur surface spécifique. Ce sont en effet ces deux grandeurs qui permettront d'optimiser la surface spécifique de l'émulsion ainsi que sa teneur en émulsifiant résiduel.

3.1.2 Les caractéristiques-clé de l'émulsion

En ce qui concerne l'émulsion, c'est la granulométrie, bien plus que la simple teneur en liant, qui donne accès à la surface spécifique et donc à la capacité d'enrobage d'une émulsion. De même, alors que l'indice de rupture ne donne qu'une indication globale dépendant de plusieurs facteurs (teneur en émulsifiant résiduel, mais aussi teneur en liant et granulométrie), c'est bien la teneur effective en émulsifiant résiduel qu'il faudra ajuster en fonction de la réactivité et de la surface spécifique exposée des granulats !

La granulométrie de l'émulsion, mais aussi la viscosité et la nature chimique du bitume, jouent également un rôle majeur dans les phénomènes de rupture et de coalescence qui contrôlent la montée en cohésion des enrobés à froid. OPTEL a réalisé une étude approfondie de ces processus (Leal Calderon, 2000, 2001). Les différentes étapes reprises dans un schéma classique sont : la mise en contact de deux particules de bitume, le drainage du film d'eau qui les sépare et enfin la fusion de ces deux gouttes (coalescence). OPTEL a montré qu'une granulométrie fine devrait permettre de retarder le début de la coalescence (rupture de l'émulsion) mais conduire ensuite à une évolution rapide (contraction) du système de gouttes interconnectées. Le phénomène de contraction est fortement influencé par la viscosité du liant. Pour des gouttes de 10 microns, le temps caractéristique de relaxation est de l'ordre de quelques heures pour un bitume 70/100 et de l'ordre de quelques minutes pour un bitume 160/220. La vitesse de cette phase de contraction dépend aussi de la nature chimique du liant ainsi que de sa tension interfaciale. C'est ce qui explique la préférence donnée aux bitumes naphthéniques dans le cas des ECF.

3.2 Des outils de formulation

Comme cela a déjà été évoqué plus haut, l'optimisation en laboratoire des enrobés en froid exige des outils spécifiques permettant d'appréhender correctement les interactions complexes entre les granulats et l'émulsion aux divers stades de la mise en œuvre. OPTEL s'est ainsi plus particulièrement intéressé :

- à la mesure de la maniabilité de l'enrobé à froid aussitôt après l'enrobage.
- au drainage de l'eau lors du compactage.
- à une procédure de mûrissement accéléré.

3.2.1 Essais de maniabilité

La société NYNAS a mis au point un appareillage et une méthode spécifiques pour l'étude de la maniabilité des enrobés et graves à l'émulsion. L'essai consiste à mesurer la résistance à une sollicitation de cisaillement-poussée d'un matériau foisonné moulé dès son malaxage. On relève l'effort maximum, appelé « force de cohésion », que développe le matériau soumis à une vitesse de cisaillement fixée (Figure 1). L'évolution de la cohésion en fonction du temps de cure est une mesure de la maniabilité de l'enrobé.

L'essai étant destructif, il est nécessaire de confectionner un nombre suffisant de moulages pour connaître l'évolution de la force de cohésion en fonction du temps de mûrissement.

Divers essais effectués avec ce matériel ont montré que la maniabilité était fortement conditionnée par un grand nombre de paramètres aussi bien de formulation (teneur en bitume, en émulsifiant, en eau, ...) que environnementaux (température, hygrométrie). A titre d'exemple, nous montrons ici l'incidence de la teneur en émulsifiant résiduel. Nous avons attribué les faibles cohésions obtenues pour une teneur de 0.3% à un enrobage hétérogène du fait d'une rupture prématurée. Une teneur plus élevée (0.6%) conduit à un meilleur enrobage et une rupture différée dans le temps qui explique les augmentations de cohésion observées (Figure 1).

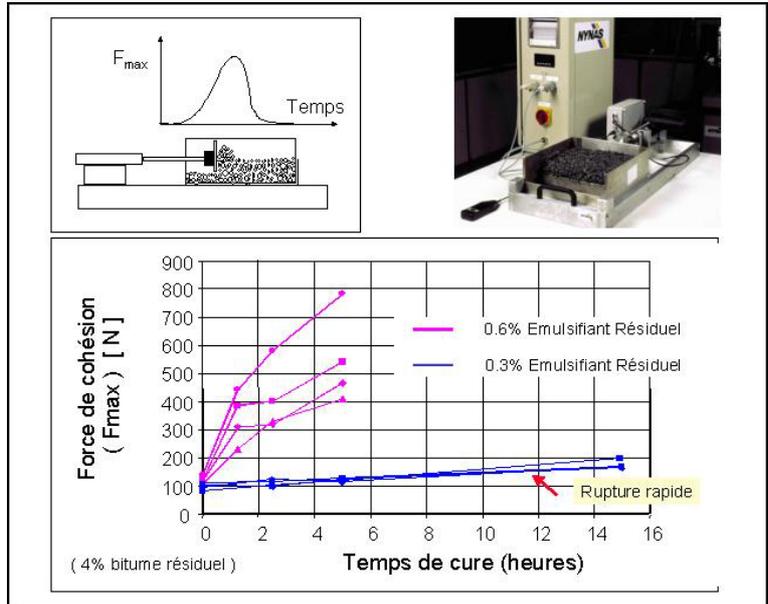


Figure 1 – OPTEL : Essais de maniabilité

La confrontation avec la réalité du terrain nous a cependant révélé que le comportement du matériau à la sortie de la centrale d'enrobage est souvent plus cohésif (moins maniable) et plus évolutif que ne le suggèrent les essais au maniabilimètre. Ces constatations nous ont amené à remettre en cause la procédure standard de préparation des moules (Delfosse, 2002). Dans celle-ci, en effet, le matériau est manipulé plusieurs fois entre la fin du malaxage et le moulage final des éprouvettes d'essai ce qui, en détruisant un certain nombre des pontages initiaux, peut décohésionner le matériau et conduire à des courbes de maniabilité "plates", non observées dans la réalité du chantier. Nous avons dès lors remplacé la procédure standard par une méthode modifiée dans laquelle l'éprouvette est moulée directement après le malaxage, sans manipulation intermédiaire grâce à un malaxeur de laboratoire à arbres parallèles horizontaux muni d'une trappe d'ouverture en fond de cuve (Figure 2).

Si l'on admet que le matériau puisse être décohésionné par les manipulations de préparation des éprouvettes, cela peut également être le cas lors d'un malaxage trop prolongé, notamment dans le cas des émulsions rompant rapidement au contact des granulats. Nous avons essayé de conforter ces hypothèses par un petit programme expérimental portant sur l'incidence des temps de malaxage (10s à 60s de malaxage avec l'émulsion après 10s de malaxage "à blanc") et du mode de préparation des éprouvettes de maniabilité (méthode "standard" versus méthode modifiée).

Les résultats obtenus (Figure 2) montrent que les valeurs de cohésion mesurées au maniabilimètre dépendent bien du degré de rupture de l'émulsion qui est lui même tributaire, dans le cas d'émulsions rompant rapidement, du temps de malaxage. Pour des temps de malaxage courts, la rupture est incomplète et se poursuit après le moulage de l'éprouvette. Malgré une qualité d'enrobage moyenne, on assiste alors à la création de pontages entre grains qui expliquent les valeurs de cohésion élevées après 2 heures et

leur augmentation entre 2 heures et 4 heures. Un malaxage prolongé assure une rupture plus complète de l'émulsion mais entraîne sans doute aussi la destruction des pontages, ce qui conduit à une enrobé plus "sec" opposant moins de résistance et n'évoluant plus dans le temps. Les manipulations supplémentaires du mode "standard" de préparation des éprouvettes amplifient encore ces phénomènes. Les deux procédures conduisent à des résultats comparables lorsque les temps de malaxage sont prolongés (60s).

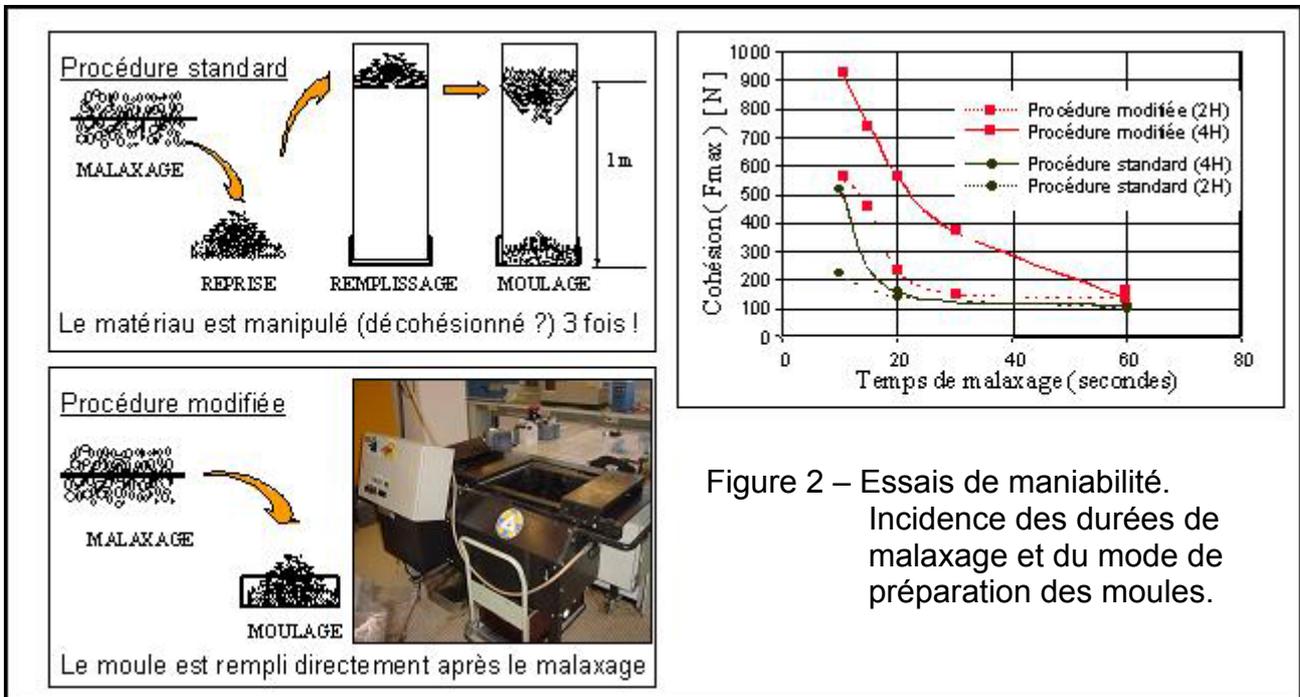


Figure 2 – Essais de maniabilité.
Incidence des durées de malaxage et du mode de préparation des moules.

3.2.2 Aptitude au compactage

OPTEL a étudié le comportement lors du compactage à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire équipée d'un dispositif de « suction d'eau » (Lesueur, 2000). L'analyse de l'évolution des vides « remplis d'air » et « remplis d'eau » en fonction du nombre de girations (pression verticale de 600 kPa, angle de 1°, vitesse de 6 tr/min.) permet de mettre en évidence un point remarquable (N_e , C_e) correspondant au départ de l'eau (Figure 3). Théoriquement, on peut penser que la compacité en place ne devrait plus évoluer une fois atteinte la valeur C_e . En effet, dans la pratique, il se produit alors le phénomène de matelassage : déplacement de l'eau sans drainage. Cette théorie a pu être vérifiée en laboratoire par comparaison avec des résultats obtenus avec le compacteur de plaque. Celui-ci étant moins efficace que les compacteurs de chantier, on peut penser que la compacité finale in-situ devrait être au moins égale ou légèrement supérieure à la valeur C_e indiquée par l'essai PCG. Sur chantier, les mesures de densité en place n'ont cependant pas montré un bon accord avec les valeurs C_e de l'essai PCG. Différents facteurs peuvent être invoqués pour expliquer ces divergences, tels que la difficulté des mesures de densité in-situ en présence d'une quantité d'eau mal connue ou le fait que les schémas de compactage des différentes planches n'aient pas été identiques.

3.2.3 Procédure de mûrissement accéléré

La formulation en laboratoire impose une évaluation rapide des propriétés finales. Dans ce but, OPTEL a cherché à accélérer le départ de l'eau résiduelle en jouant sur la température et l'hygrométrie (Le Bec, 2000). L'évolution dans le temps de la teneur en eau résiduelle et de la résistance en compression a été suivie sur des éprouvettes DURIEZ

compactées à seulement 30 kN de façon à obtenir des teneurs en vides comparables à celles habituellement observées sur chantier (~ 14%). Il est apparu que l'augmentation de la température à hygrométrie constante (50% d'humidité relative) ne permet pas d'accélérer significativement le départ de l'eau. Appliquer un déficit hygrométrique se révèle beaucoup plus efficace. C'est ainsi qu'à 50°C et 10% d'humidité relative, la teneur en eau se stabilise après seulement 3 jours de mûrissement. Dans ces conditions, il suffit de 5 jours pour atteindre la résistance en compression obtenue au bout de 30 jours dans les conditions de référence (18°C – 50% Hum.) ! On note cependant toujours une phase finale au cours de laquelle la teneur en eau résiduelle évolue très peu vers une valeur apparemment «incompressible» de l'ordre de 1% (dans cet exemple) alors que la résistance à la compression continue de monter (Figure 4). Par rapport au comportement in-situ, un certain nombre de questions restent alors ouvertes :

- L'eau résiduelle est-elle piégée de la même façon ?
- La montée en cohésion après stabilisation de l'eau résiduelle est-elle représentative de la réalité ?

On peut soupçonner que, dans les deux cas, la température et le comportement rhéologique du bitume vis-à-vis des phénomènes de coalescence, interviennent. Ce qui suggère qu'il vaut sans doute mieux accélérer le départ de l'eau en réduisant l'hygrométrie plutôt qu'en augmentant la température ! A cet égard, les conditions (35°C – 20% humidité relative) suggérées par certains de nos confrères nous paraissent présenter un bon compromis (Serfass, 2003).

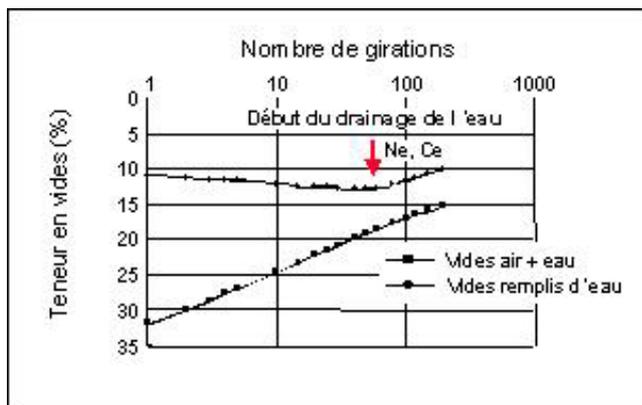


Figure 3 – OPTEL. Essais PCG avec succion d'eau

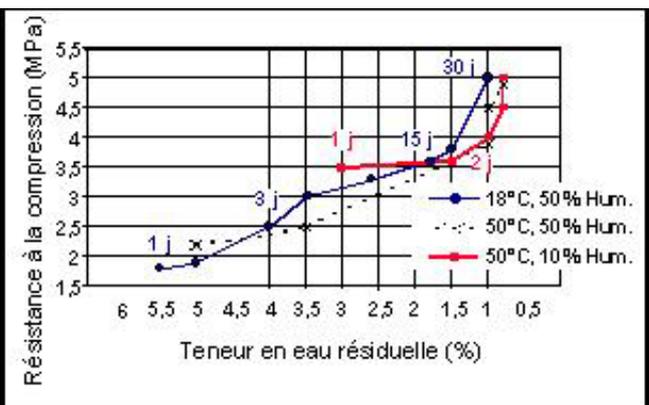


Figure 4 – OPTEL. Procédures de mûrissement accéléré.

4 COMMENT ABORDER LA FORMULATION DES ENROBES A FROID ?

4.1 Un nouveau cahier des charges pour les études de laboratoire.

D'après ce qui précède, le "Cahier des Charges" pour l'étude en laboratoire des enrobés à froid doit bien sûr inclure des essais permettant de caractériser :

- La réactivité du granulat ainsi que sa surface spécifique, c'est à dire son impact sur la stabilité de l'émulsion.
- Le comportement du mélange lors des opérations d'enrobage, de mise en œuvre, de compactage et enfin lors de son mûrissement.

Même si, comme nous l'avons illustré dans le cas du maniabilimètre, nous pouvons perfectionner les méthodes d'essai actuellement disponibles, force nous est cependant de constater que la reproduction exacte en laboratoire des conditions prévalant lors des différentes phases de mise en œuvre reste malgré tout largement illusoire. Cela ne veut cependant pas dire qu'il faut y renoncer ! Plutôt que des valeurs absolues, on peut en effet simplement leur demander d'être suffisamment "sensibles" aux divers paramètres mis en jeu pour orienter les choix du formulateur. Au vu des expériences menées au cours du projet OPTTEL ainsi que de nos propres travaux, nous pensons que cela est tout à fait possible.

Les limitations des outils de laboratoire ainsi que la variabilité importante des conditions de mise en œuvre nous conduisent également à assigner des objectifs spécifiques à l'étude de formulation en tant que telle. Plutôt que de rechercher une solution "optimale", c'est-à-dire une formulation précise permettant d'obtenir un niveau de performance maximal, il nous paraît plus judicieux de rechercher des solutions qui soient :

- "Robustes", c'est-à-dire relativement peu sensibles aux fluctuations des divers paramètres tels que les teneurs en eau et en filler, la température,
- "Adaptables", c'est-à-dire permettant un ajustement rapide, au cours de l'exécution du chantier, à des variations intempestives des paramètres cités plus haut. Une telle flexibilité peut par exemple être obtenue par l'utilisation d'additifs à incorporer dans l'eau d'ajout.

4.2 L'outil industriel doit lui aussi évoluer

L'outil industriel doit lui aussi s'adapter aux spécificités de l'enrobé dense à froid.

La maniabilité différente des enrobés à froid, plus frottants et plus collants que les enrobés à chaud, appelle des modifications des finisseurs classiques. C'est ainsi qu'on peut faciliter le répannage en limitant l'approvisionnement de la chambre de répartition et en allégeant la table.

Au niveau du compactage, la nécessité d'assurer un drainage maximum de l'eau doit conduire à repenser des paramètres tels que la fréquence et l'amplitude des vibrations, les charges appliquées et le schéma de compactage.

Mais c'est surtout au niveau du matériel d'enrobage que les plus gros progrès sont susceptibles d'être apportés. C'est en effet à ce stade qu'il faut optimiser l'enrobage dont découleront les caractéristiques de maniabilité ainsi que l'essentiel des performances futures du produit. C'est également lors de l'enrobage que la plus grande flexibilité est requise afin de pouvoir s'adapter aux fluctuations des matériaux et des conditions extérieures. La centrale d'enrobage doit donc offrir un maximum de souplesse, notamment en ce qui concerne :

- l'énergie et la durée de malaxage
- l'approvisionnement des différents flux de matériaux au niveau de l'arbre du malaxeur;
- le dosage et la répartition de l'émulsion au cours de l'enrobage;
- l'introduction de l'eau d'ajout;
- l'incorporation d'additifs dans l'eau d'ajout.

5 PREMIERS ESSAIS

Dès l'année 2000, EUROVIA s'est essayé, par le biais de trois chantiers en Maine-et-Loire, à appliquer des formules d'enrobés à froid sans fluxant, conformes à la norme NF P 98-139 « Couches de roulement : bétons bitumineux à froid ». Ces chantiers ont notamment conduit à des améliorations significatives de la centrale d'enrobage (Figure 5).

A la suite des chantiers de Maine-et-Loire, réalisés avec des granulats peu réactifs, un ensemble de petits essais « de faisabilité » réalisés en 2000 et 2001 nous a permis de mettre à profit les enseignements d'OPTEL pour mieux adapter la formulation de l'émulsion aux granulats et ajuster les conditions opératoires des essais de laboratoire, notamment en ce qui concerne la maniabilité.

Ces efforts ont pu être concrétisés en 2002 dans le cadre d'une Charte d'Innovation Départementale signée avec le Conseil Général des Côtes d'Armor et le SETRA. Plus de 450 tonnes d'un enrobé 0/10, à un dosage moyen de l'ordre de 80kg/m^2 , ont été appliquées sur le RD28, près de Kerpert (Figure 6). L'objectif assigné à ce chantier, à savoir la maîtrise d'un granulats local réactif avec une émulsion (65%) à base de bitume pur (70/100) non fluxé, a été parfaitement atteint. Malgré des conditions météorologiques médiocres (temps frais et crachin), l'enrobé s'est parfaitement mis en place et n'a donné lieu à aucun rejet significatif.

Beaucoup de chemin reste cependant à faire. Si l'enrobé posé a effectivement pu être maîtrisé au niveau de la maniabilité, les teneurs en vides obtenues après compactage restent encore trop élevées et les propriétés mécaniques insuffisantes pour autoriser une exposition de ce produit à des trafics importants ou des contraintes de cisaillement excessives. L'amélioration de la montée en cohésion de ces produits constitue maintenant l'objectif prioritaire pour notre recherche.



Figure 5 – Centrale d'enrobage

Figure 6 – Plaque expérimentale
CD28 - Kerpert

6 CONCLUSION - LES EXIGENCES D'UNE NOUVELLE TECHNOLOGIE

Les enseignements des divers travaux ainsi que des réflexions que nous venons d'évoquer nous conduisent à résumer comme suit les nouveaux besoins spécifiques liés à la mise au point des enrobés denses à froid :

- Une meilleure compréhension fondamentale du mode de fonctionnement de ces matériaux.
- Des outils de laboratoire permettant d'appréhender leur comportement lors des différentes phases de la mise en œuvre, et plus particulièrement leur sensibilité aux différents paramètres mis en jeu.
- La recherche de formulations "robustes" et "adaptables" plutôt que de solutions "optimales".
- L'adaptation des outils de fabrication et de mise en œuvre, permettant notamment de s'adapter aux fluctuations des matériaux et des conditions extérieures.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier leurs partenaires du projet OPTTEL dans le cadre duquel ont été effectués les travaux ayant constitué le point de départ des essais rapportés dans cet article. Rappelons également que la réalisation du projet OPTTEL a été possible grâce à la contribution financière de la Commission Européenne (DGXII) dans le cadre du 4^{ème} programme-cadre BRITE-EURAM III.

REFERENCES

- Delfosse, F., Pierre, M.L., Quinton, C., Eckmann, B. (2002)
Emulsions de bitume pour enrobés à froid : essais de remontée de pH
Bituminous emulsions for cold mixes : the "rise in pH" test
3^{ème} Congrès Mondial de l'Emulsion, Lyon (France).
- Delfosse, F., Pierre, M.L., Quinton, C., Eckmann, B. (2002)
Emulsions de bitume pour enrobés à froid : l'essai au maniabilitémètre NYNAS
Bituminous emulsions for cold mixes : the Nynas workability test
3^{ème} Congrès Mondial de l'Emulsion, Lyon (France).
- Leal Calderon, F., Potti, J.J. (2000)
Study of breaking mechanisms & cohesion built-up on bituminous emulsions.
Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona (Spain), Technical Session 2,
Book II, p. 480.
- Leal Calderon, F. (2001)
Rupture des émulsions de bitume : quel mécanisme ?
Revue Générale des Routes et Aéroports N° 800

Le Bec, S., Mazé, M., Brûlé, B. (2000)

Formulation des enrobés à l'émulsion : accélération du mûrissement en laboratoire.
Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona (Spain), Technical Session 1,
Book I, p. 416.

Lesueur, D. (2000)

Predicting the in-place compacity of cold mixes.
Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona (Spain), Technical Session 2,
Book II, p. 315.

Potti, J.J., Lesueur, D., Eckmann, B. (2002)

Vers une méthode rationnelle de formulation des enrobés à froid : les apports du
projet OPTTEL. Revue Générale des Routes et Aéroports N° 805

Serfass, J.P., Poirier, J.E., Henrat, J.P., Carbonneau, X. (2003)

Influence of curing on cold mix mechanical performance.
Proceedings of the 6th international RILEM Symposium, PTEBM'03, Zürich
(Switzerland), p. 223-229.