

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

Besoin en adhérence des revêtements de chaussées

Griffigkeitsbedarf von Strassenbelägen

Skid resistance requirement of pavement surface

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)
Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)**

Prof. A.-G. Dumont
Dr. L. Arnaud
Ph. Chenevière

A. Junod

Mandat de recherche VSS 2000/360

Résumé

Ce travail porte sur les besoins en adhérence des chaussées. Ce phénomène met en jeu un grand nombre de paramètres liés à la fois à l'infrastructure (micro et macrotexture du revêtement de chaussée notamment), au véhicule et au conducteur. Ce travail se scinde en trois parties.

La première partie conduite en laboratoire traite de l'incidence de la forme des granulats (influence simultanée taux de cubicité – état des arêtes). Il est montré qu'une certaine compensation peut se produire entre forme et niveau de *CPA* des granulats et qu'un meilleur *CPA* sera bénéfique pour la microtexture.

La deuxième s'appuie sur le bilan les expériences dans divers pays européens pour des routes nationales et des autoroutes et pour de longues durées. Il apparaît que les liens entre caractéristiques des granulats (*LA*, *MDE*, *CPA*, ...) et adhérence sont très complexes et nécessitent une optimisation fonction du site et du trafic. Le calibre du grain maximal $D=8\text{mm}$ est un bon compromis pour favoriser micro et macrotexture.

Enfin, la troisième vise, à partir de l'analyse de sites suisses sur lesquels se sont produits des accidents, à définir un cadre d'enquête rigoureux afin de cerner le rôle précis de l'adhérence dans les situations d'accidents.

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht behandelt den Griffigkeitsbedarf von Strassenbelägen. Dieses Phänomen vereinigt viele Parameter der Infrastruktur (allen voran Mikro- und Makrostruktur des Belags), des Fahrzeugs und des Fahrzeuglenkers. Der Bericht besteht aus drei Teilen.

Der erste Teil, erarbeitet im Versuchslabor, zeigt die Auswirkungen der Granulatform (simultaner Einfluss von Anteil an kubischen Körnern und Beschaffenheit der Kornkanten). Er beschreibt, wie eine gewisse Kompensierung zwischen Form und Niveau des *PSV*-Wert des Granulats entstehen kann und dass ein besserer *PSV*-Wert der Mikrotexture zuträglich ist.

Der zweite Teil stützt sich auf die Bilanz der Langzeiterfahrungen auf Autobahnen und Hochleistungsstrassen verschiedener Europäischer Länder. Es wird gezeigt, dass die Verbindung verschiedener Granulateigenschaften (*LA*, *M_{DE}*, *PSV*-Wert, ...) und Griffigkeit sehr komplex sind und eine Optimierung gemäss der Verkehrsbelastung benötigen. Ein Grösstkornwert von $D = 8 \text{ mm}$ ist ein guter Kompromiss für Mikro- und Makrotexture.

Schliesslich will der dritte Teil anhand einer Analyse verschiedener Schweizer Unfallschwerpunkte einen strikten Untersuchungsrahmen definieren, um die genaue Rolle der Griffigkeit in Unfallsituationen festzuhalten.

Summary

The present report treats the skid resistance requirement of pavement surfaces. This phenomenon unites many parameters of the infrastructure (especially the pavement's micro- and macrotexture), the vehicle as well as the driver. The report consists of three parts.

The first part, carried out in the laboratory, shows the incidence of the aggregate shape (simultaneous influence of the rate of cubic minerals and the condition of their edges). It describes how a certain compensation between shape and level of the aggregate's *PSV* may occur and that a better *PSV* is positive for the microtexture.

The second part is based on the assessment of different long term experiences conducted on motorways and high capacity roads. It is shown that the combination of different aggregate characteristics (*LA*, *M_{DE}*, *PSV*, ...) and skid resistance is very complex and need an optimisation according to the traffic to be supported. A maximum grain size of $D = 8$ mm is a good compromise for micro- and macrotexture.

Finally, the third part aims to define a rigorous inquiry frame, based on an analysis of different accident black spots, in order to seize the exact role of skid resistance in accident situations.

A. INTRODUCTION	7
1. PROJET DE RECHERCHE	7
1.1 <i>Recherche commune franco-suisse</i>	7
2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	8
3. PROGRAMME	8
B. L'ADHÉRENCE	9
1. DÉFINITIONS	9
1.1 <i>Notion d'adhérence</i>	9
1.2 <i>Les diverses échelles de la texture des revêtements routiers</i>	9
1.3 <i>Techniques et appareils de mesure de la texture</i>	10
2. APPORT DE LA TEXTURE DU REVETEMENT SUR L'ADHÉRENCE	11
2.1 <i>Types de contact pneu/chaussée et rôle de la microtexture</i>	11
2.2 <i>Description de la microtexture</i>	12
2.3 <i>Influence de la texture sur l'adhérence</i>	13
C. ETUDE DE L'INCIDENCE DE LA FORME DES GRANULATS	18
1. BUT DE L'ETUDE	18
2. DEMARCHE	18
<i>Origine des granulats</i>	18
3. ANALYSE DES MESURES	22
3.1 <i>Evolution globale de la microtexture avec le nombre de cycles (annexes A + B + C)</i>	22
3.2 <i>Evolution globale de la macrotexture avec le nombre de cycles (annexes E + F)</i>	22
3.3 <i>Incidence du pourcentage de granulats cubiques (annexes A + E)</i>	23
3.4 <i>Incidence de l'état des arêtes (annexes B + F)</i>	23
3.5 <i>Etude de sensibilité 1 : influence du CPA (annexe C)</i>	23
3.6 <i>Etude de sensibilité 2 : influence du type d'enrobé (annexe D)</i>	24
3.7 <i>Enseignements</i>	24
4. CONCLUSION	28
D. BILAN DES EXPERIENCES FRANÇAISES ET ETRANGERES	29
1. INTRODUCTION	29
2. FRANCE : PLANCHES EXPERIMENTALES « ADHERENCE – GRANULATS »	29
2.1 <i>Type d'expérimentation</i>	29
2.2 <i>Rappels concernant les propriétés des granulats</i>	29
2.3 <i>Présentation des deux sites</i>	30
2.4 <i>Résultats après 1 an</i>	33
2.5 <i>Résultats après 3 ans</i>	33
2.6 <i>Résultats après 5 ans</i>	34

2.7	<i>Evolution des indices d'état de la chaussée pendant 5 ans</i>	36
2.8	<i>Conclusions de l'expérimentation</i>	41
3.	FRANCE : OPTIMISATION GRANULATS – ADHERENCE	43
3.1	<i>Type d'expérimentation</i>	43
3.2	<i>La RN 148 en Vendée</i>	43
3.3	<i>La RN 7 dans l'allier</i>	47
4.	FRANCE : NIVEAU D'ADHERENCE ET DE DURABILITE DES ENROBES 0/8	48
4.1	<i>Type d'expérimentation</i>	48
4.2	<i>Programme et objectifs</i>	48
4.3	<i>Résultats</i>	49
4.4	<i>Conclusion</i>	50
5.	FRANCE – PERFORMANCES D'ADHERENCE DES REVETEMENTS SUR LES CHAUSSEES FRANÇAISES	51
5.1	<i>Présentation du fichier CARAT</i>	51
5.2	<i>Influence de la composition du matériau sur l'adhérence</i>	51
5.3	<i>Influence du trafic sur l'adhérence</i>	52
6.	OFFRE EN GRANULATS – ASPECT POLITICO ECONOMIQUE	52
E.	ETUDE D'UNE RELATION ENTRE ADHERENCE ET ACCIDENT	53
1.	INTRODUCTION GENERALE	53
2.	FRANCE : ETUDE SUR LIEN ADHERENCE – TAUX D'ACCIDENTS	53
2.1	<i>Rocade d'une métropole régionale</i>	53
2.2	<i>Réseau de routes nationales dans la région Rhône-Alpes</i>	54
2.3	<i>Route en site difficile</i>	55
2.4	<i>Conclusion</i>	56
3.	ALLEMAGNE : ETUDE SUR LIEN ADHERENCE – ACCIDENT	57
3.1	<i>Allemagne : valeurs seuils de la qualité antidérapante</i>	57
4.	SUISSE: ETUDE SUR LIEN ADHERENCE ACCIDENT	59
4.1	<i>Les Routes à Grand Débit</i>	59
4.2	<i>Etude pilote – routes cantonales</i>	60
4.3	<i>Etude complémentaire: cas par cas</i>	61
4.4	<i>Nouveau cadre d'analyse</i>	65
F.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	68
G.	BIBLIOGRAPHIE	69
H.	ANNEXES	70
1.	FORMULATIONS DES PLAQUES	70
2.	RÉSULTATS DES ESSAIS SUR PLAQUE	77
3.	ANALYSE DETAILLÉE DES RESULTATS	78

A. INTRODUCTION

1. PROJET DE RECHERCHE

1.1 Recherche commune franco-suisse

Ce travail de recherche est le résultat d'une collaboration entre plusieurs laboratoires de deux pays: la Suisse et la France. Cette collaboration a permis de répartir le travail et de bénéficier de l'expérience de chaque laboratoire dans un domaine précis. Ainsi un consortium a été formé spécifiquement pour ce projet. Les membres sont:

- Le LAVOC (Laboratoire des voies de circulation, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne), Prof. André-Gilles Dumont, Dr Laurent Arnaud, Philippe Chenevière et Alejandro Junod
- Le SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), M. Pierre Dupont
- L'IVT (Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen und Eisenbahnbau, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich), Dr Hans Peter Lindenmann
- Le LRPC (Laboratoire régional des Ponts et Chaussées) d'Angers, Gérard Delalande et de Clermont-Ferrand, Y. Ganga

L'organigramme ci-dessous résume la démarche proposée et définit la répartition des tâches entre partenaires suisses et français:

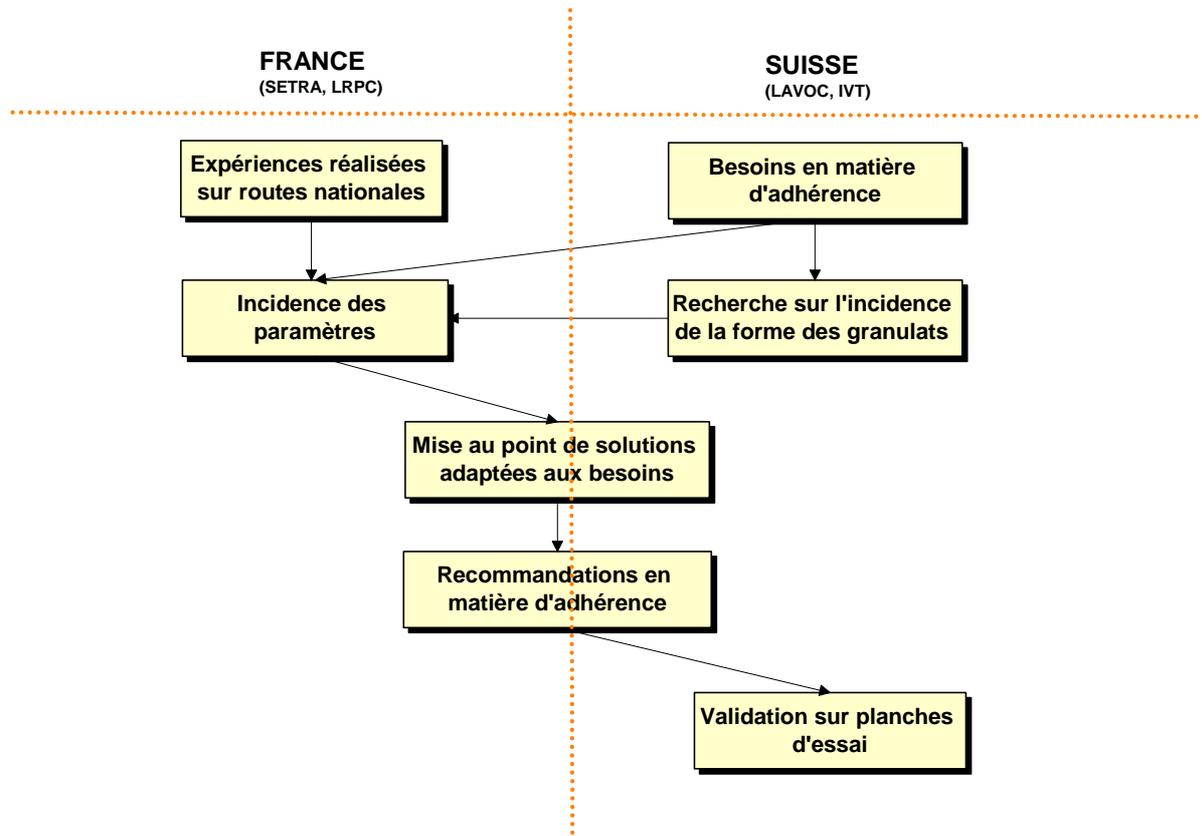


Figure 1: Organigramme de répartition des tâches

2. OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Les objectifs de ce travail sont au nombre de quatre, à savoir :

- Définir les liens entre les exigences techniques et les niveaux de service en matière d'adhérence
- Définir et sélectionner les paramètres à prendre en compte
- Définir et mettre au point les règles permettant d'optimiser la valeur d'adhérence d'un revêtement bitumineux
- Fixer des spécifications réalistes

3. PROGRAMME

Le programme de recherche développé pour répondre à ces objectifs se scinde en trois parties comme suit.

Bilan des expériences : Un bilan des expériences menées en France dans le domaine de l'adhérence a été réalisé. Il s'appuie sur une recherche bibliographique approfondie ainsi que sur une évaluation des résultats de recherches menées dans d'autres pays.

Etude de l'incidence de la forme des granulats. La deuxième partie à caractère technique a visé à étudier en laboratoire l'incidence de la forme, la dureté des granulats sur les propriétés d'adhérence à long terme de revêtements (microtexture). Le mélange de granulats d'origines pétrographiques différentes a également été abordé dans cette phase.

Collecte de données relatives à l'adhérence des revêtements. Enfin, une dernière phase traite de données relevées en Suisse. L'IVT, grâce à ses appareils à grand rendement pour mesurer l'adhérence des revêtements de chaussées (*SRM*, Skidomètre), possède les valeurs d'adhérence d'une partie importante du réseau routier national suisse.

Ces données relatives à l'adhérence ont ensuite été analysées, pour les zones dans lesquelles des accidents ont été relevés, en fonction des conditions topographiques des chaussées concernées, i.e. leur géométrie, la configuration de la zone et l'état lié aux conditions climatiques.

Ce travail a alors conduit à élaborer un nouveau cadre d'analyse des accidents, cahier des charges, des procédures et des conditions pour le relevé d'accidents orienté vers l'identification du rôle de l'adhérence. Cette démarche vise à isoler de manière plus rigoureuse l'influence de l'adhérence par rapport aux autres paramètres dans les causes d'accidents.

Le présent rapport débute sur un rappel des notions essentielles attachées à l'adhérence puis il s'articule autour des trois points précédents.

B. L'ADHÉRENCE

1. DÉFINITIONS

1.1 Notion d'adhérence

L'adhérence des pneus est définie par "la qualité du contact pneu-route permettant au conducteur d'accélérer, de diriger et de freiner son véhicule" [1]

L'adhérence d'une chaussée correspond "à sa capacité à mobiliser des forces de frottement entre le pneumatique et la surface du revêtement de la chaussée sous l'effet des sollicitations engendrées par la conduite : accélérations, freinages, changements de direction, etc." [2]

Il est important de noter que pour que l'adhérence "existe", il faut un contact entre deux matériaux. Dans le cas de la route, c'est le contact pneu-chaussée qui est en jeu. Il est important de séparer deux cas liés à l'état de la chaussée :

- contact "sec": entre pneu et chaussée sèche,
- contact "humide": entre pneu et chaussée mouillée.

En contact "sec", le niveau d'adhérence est en général satisfaisant pour des conditions normales de conduite. En contact "humide", le niveau d'adhérence est inférieur à celui rencontré sur chaussée sèche du fait de la présence d'eau qui s'interpose entre le pneumatique et la surface de la chaussée. En général, on s'intéresse à ces conditions défavorables pour évaluer la qualité antidérapante d'un revêtement.

L'adhérence des chaussées dépend non seulement des caractéristiques du revêtement de la chaussée mais également des facteurs liés au véhicule (suspension, vitesse, etc.), aux pneumatiques (pression de gonflage, profondeur de sculptures, etc.) et à l'état de la surface de la chaussée (déformations, épaisseur d'eau, pollution, ...) Les facteurs liés aux surfaces de chaussée, et en particulier ceux relatifs à la texture, sont ceux sur lesquels les ingénieurs routiers peuvent agir.

1.2 Les diverses échelles de la texture des revêtements routiers

Plusieurs textes [2], [3] ont déjà précisé les domaines usuels et les interactions entre gammes des longueurs d'onde et les caractéristiques d'usage. Nous en rappellerons quelques aspects

La mégatexture

Elle correspond à des irrégularités de surface dans une gamme de 50 à 500 mm horizontalement et à des dénivellations verticales de 1 à 50 mm. Cette mégatexture est liée principalement aux hétérogénéités granulaires et à la mise en œuvre du revêtement de chaussée. Elle est aussi associée à la génération du bruit de roulement par mise en vibration des flancs des pneumatiques.

La macrotexture

Elle correspond à des dénivellations de 0,5 à 50 mm horizontalement et de 0,2 à 10 mm verticalement. Cette macrotexture est liée à la formulation et aux conditions de mise en œuvre du revêtement de chaussée. La macrotexture joue un double rôle.

La gomme du pneumatique est en contact par un léger enveloppement des aspérités de la surface, de l'ordre de 0,2 à 0,4 mm. Une très forte macrotexture n'est pas seulement utile de ce point de vue. Entre ces aspérités, il se forme un réseau de canaux, plus ou moins continus. Ces canaux assurent deux fonctions: l'une de réservoir, liée à leur volume, l'autre

de chemin d'évacuation à surface libre ou fermée. Naturellement ces fonctions de réservoir et de chemin d'évacuation sont aussi en liaison avec la perméabilité de la structure, mais il ne s'agit plus d'un écoulement de surface. En plus de l'adhérence, la macrotexture intervient dans plusieurs domaines dont le bruit de roulement, les projections d'eau, la résistance au roulement et l'usure des pneumatiques.

La microtexture

Elle correspond aux plus fines aspérités inférieures à 0,5 mm horizontalement et à des dénivellations verticales de moins de 0,2 mm. La microtexture est directement liée à la face visible des granulats donc à leur nature pétrographique, à leurs arêtes, ...

Le rôle de la microtexture est de pénétrer la gomme du pneumatique, en produisant une pression locale de contact très élevée, assurant la rupture du film d'eau qui subsistait sous le pneumatique et permettant ainsi le contact "sec" de la gomme sur le revêtement. La microtexture est une qualité intrinsèque de la surface de la chaussée, qui est difficilement compensée par le pneumatique. Une valeur suffisante de la microtexture est donc indispensable.

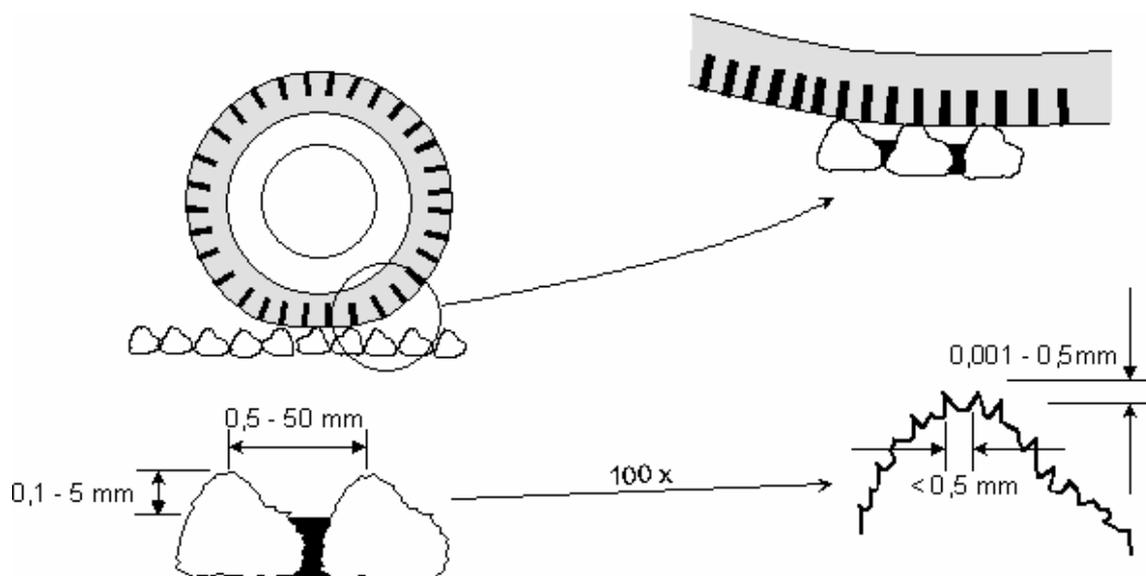


Figure 2: Micro et macrotexture des revêtements de chaussée, tailles caractéristiques.

1.3 Techniques et appareils de mesure de la texture

Appareils statiques

La méthode de la hauteur au sable [4] est toujours opérationnelle pour caractériser la macrotexture. L'interprétation est simple: c'est l'épaisseur du film d'eau qui est susceptible de noyer le revêtement. Cette technique est seulement conçue pour fournir une valeur de profondeur moyenne de la macrotexture du revêtement et est considérée comme insensible aux caractéristiques de microtexture du revêtement.

Les drainomètres permettent d'évaluer ou simuler l'évacuation d'eau sous le pneumatique. L'appréciation de la macrotexture se fait dans ce cas par la mesure d'un débit. A cette fin on mesure le temps qu'il faut à une certaine quantité d'eau pour s'écouler d'un cylindre entre un anneau de caoutchouc chargé et la chaussée.

Le pendule *SRT* pour "*Skid Resistance Tester*" est un pendule oscillant à partir d'une hauteur fixe. Il comporte un élément de friction revêtu de caoutchouc dont une arête frotte la

surface de la chaussée sur une longueur déterminée. L'énergie résiduelle est indiquée par la hauteur à laquelle remonte le pendule et donne une mesure de la qualité antidérapante de la surface examinée.

Enfin, une technique connaît un essor considérable actuellement, c'est l'analyse d'image. Cette technique permet de "zoomer" des images numérisés de portions de route est d'évaluer l'état de la macrotexture mais également parfois de la microtexture.

Appareils roulants

Le "*Skiddometer*", appareil utilisé en Suisse, est une remorque de mesure monoaxiale à trois roues, celles du centre servant aux mesures. L'appréciation de la qualité antidérapante d'un revêtement de chaussée se fait au moyen de cette roue bloquée, remorquée à une vitesse déterminée. La valeur obtenue est la force de frottement qui en résulte à l'interface pneu/chaussée en mesurant le couple de rotation à l'aide d'extensomètres connectés à un pont de mesure. Il est important de préciser que ces mesures se font sous contact "humide", c'est-à-dire en présence d'un film d'eau régulier. D'autres appareils permettent de faire ces mesures comme par exemple le *SCRIM* ou *ADHERA*, le *SRM*, etc.

Le *Rugolaser*, appareil utilisé en France, relève la macrotexture à l'aide d'un système de mesure au rayon laser. Ce type d'appareil est bien adapté aux auscultations car les résultats sont indépendants de la vitesse (qui varie de 40km/h à 100km/h) et il fournit un grand nombre de résultats.

Aujourd'hui il n'y a pas d'appareil opérationnel pour la mesure en continu de la microtexture des surfaces. Néanmoins selon [7], certains appareils de mesure permettent d'estimer de manière indirecte la microtexture. En effet, la séparation des échelles de macro et microtexture conduit à l'idée selon laquelle la macrotexture influence l'adhérence en présence d'eau à vitesse élevée, tandis qu'à basse vitesse la valeur du frottement traduit essentiellement la contribution de la microtexture. Cette idée est le fondement de l'utilisation des valeurs de frottement mesurées à basse vitesse pour apprécier la microtexture.

Qualité antidérapante: norme suisse

Selon la norme suisse [5] les mesures nécessaires pour évaluer la qualité antidérapante d'un revêtement doivent être combinées. Cette norme préconise les combinaisons suivantes:

- mesures combinées de la qualité antidérapante et de la texture au moyen du pendule anglais *SRT* et du drainomètre de Moore,
- mesures au moyen de l'appareil à roue tractée suédois "*Skiddometer*".

Les résultats des mesures que donne le pendule *SRT* dépendent avant tout de la microtexture. C'est pourquoi, en complément, des mesures de la macrotexture doivent être effectuées à l'aide du drainomètre sur tous les revêtements et quelle que soit la vitesse admissible.

2. APPORT DE LA TEXTURE DU REVETEMENT SUR L'ADHERENCE

2.1 Types de contact pneu/chaussée et rôle de la microtexture

En présence d'eau sur la chaussée, il existe deux types de contact pneu/chaussée différents : le contact mouillé (épaisseur du film d'eau supérieure à 1 mm) et le contact humide (épaisseur inférieure à 0.1 mm). Le risque associé au contact mouillé est

l'hydroplanage¹ et celui associé au contact humide est le viscoplanage². Ces deux phénomènes peuvent se produire simultanément dans le cas d'une épaisseur d'eau située entre 0.1 et 1 mm.

La plupart des accidents par glissance se produisent sur des revêtements légèrement mouillés, donc lors d'un contact pneu/chaussée de type humide. Le paramètre clef permettant de réduire ce risque de viscoplanage est la microtexture du revêtement. Les micro-aspérités permettent la rupture du film d'eau et le rétablissement d'un contact sec entre la chaussée et le pneumatique. Deux conditions doivent cependant être respectées afin que ces microaspérités remplissent leur rôle :

- leur taille devra être supérieure ou égale à l'épaisseur du film d'eau résiduel (3-10 μ m) observée après la première évacuation due à la pression de gonflage et à la macrotexture,
- leur taille devra être supérieure ou égale à l'épaisseur du film d'eau aspiré (3-10 μ m) au sommet des aspérités. Cette succion est due au glissement relatif entre la bande de roulement et le revêtement.

Bond et al (1973) ont proposé une valeur minimale de 5 μ m pour la microtexture puisque le coefficient de frottement augmente nettement dès cette valeur. Entre 10 et 100 μ m, ce coefficient diminue à cause de la réduction de l'aire de contact pneu/chaussée.

La taille minimale requise n'est cependant qu'une condition à respecter puisque les calculs de Sabey (1958) ont montré que la forme des micro-aspérités joue un rôle encore plus important dans la valeur du coefficient de frottement. A cela, vient encore s'ajouter le rôle de la densité des micro-aspérités. La géométrie peut donc être caractérisée par trois paramètres : taille, forme et densité. Qualitativement, on sait qu'il faut obtenir un bon compromis entre ces facteurs afin de rétablir le contact sec entre la chaussée et la bande de roulement. Quantitativement, il s'agit d'une question encore non résolue.

Lors d'un contact mouillé, tant que la masse d'eau n'est pas évacuée par la macrotexture, la microtexture ne pourra pas jouer son rôle. Appliquer une plus grande capacité de drainage (plus grande amplitude de macrotexture) que celle requise n'est donc pas conseillée puisque la surface de contact entre le pneu et la chaussée diminue et qu'une forte présence de microaspérités sera alors nécessaire pour compenser la perte de surface afin de retrouver un coefficient de frottement suffisant.

2.2 Description de la microtexture

Bien que le rôle de la microtexture ait été précisé sur le plan théorique au chapitre précédent, il n'existe pas encore de méthode universelle pour caractériser le niveau de microtexture d'un revêtement routier. La difficulté réside évidemment dans les dimensions très faibles. Trois méthodes actuelles de caractérisation peuvent néanmoins être citées.

¹ On parle d'hydroplanage dès que la vitesse du véhicule permet à l'eau située devant les roues d'exercer une pression supérieure à la pression de contact du pneumatique. Les roues du véhicule sont donc soulevées et flottent sur le film d'eau. Ce terme est préféré à celui d'aquaplaning.

² On parle de viscoplanage lorsque l'eau est aspirée par les pneumatiques et peut s'interposer entre ces derniers et le sommet des aspérités du revêtement. Le contact entre la bande de roulement et la chaussée est donc absent.

Mesures subjectives

Elles correspondent à une estimation par le toucher ou examen visuel de l'aspect rugueux des gravillons. Une note est ensuite attribuée à la surface étudiée. Cette méthode est fastidieuse et les résultats dépendent fortement de l'opérateur.

Mesures indirectes

La microtexture est estimée par des essais mécaniques comme la méthode *SRT*. Cette méthode est basée sur l'hypothèse selon laquelle le frottement à faible vitesse est surtout influencé par la microtexture. Les expériences de Britten et al (1974) ont toutefois montré que les mesures au pendule *SRT* dépendent aussi de la macrotexture donc ne peuvent être considérées comme une caractérisation absolue de la microtexture.

Certains auteurs ont utilisé la résistance au polissage accéléré (*CPA*) comme critère pour évaluer la rugosité des gravillons, mais Forster (1981) a constaté qu'il n'existe aucune relation entre la valeur *CPA* et la microtexture initiale.

Mesures des profils

Les profils à la surface des gravillons peuvent être relevés à l'aide d'un microscope ou d'un capteur sans contact afin d'en déduire des paramètres géométriques.

Méthodes de mesures : Forster (1981) a effectué un relevé géométrique en utilisant un système de traitement d'images à partir duquel il a pu identifier les profils du contour. Samuels (1986) a, quant à lui, montré qu'il est possible d'utiliser des capteurs sans contact pour relever les profils à l'échelle de la microtexture

Calcul des paramètres : Plusieurs méthodes ont été proposées afin de calculer des paramètres caractéristiques à partir des mesures effectuées. Ainsi Carr *et al.* (1990) ont proposé de caractériser les granulats par leur dimension fractale D liée à leur contour. La différence entre les granulats arrondis et concassés (6.5%) n'est cependant pas assez grande pour que ce critère soit utilisable. Un affinement de ce concept ajouté d'une validation par des mesures de frottement serait néanmoins intéressant pour la suite de cette approche.

Les études théoriques décrivent les microaspérités par leur densité, le rayon moyen au sommet et une distribution statistique des hauteurs [Golden J.M. (1981) FULLER K.N.G.]

De nombreux travaux dont ceux de Forster (1981) et de Myers ont visé à relier ces caractéristiques géométriques au coefficient de frottement de surface et à la notion d'adhérence. Cependant aucune règle ne fait référence sur le sujet. On précise ci-après les influences observées.

2.3 Influence de la texture sur l'adhérence

Dames (1990) a montré que la résistance au polissage du sable mesurée par la machine Wehmer & Schulze contribue à l'adhérence du revêtement. De plus, l'adhérence d'un enrobé comportant un sable de résistance au polissage moyenne ne peut pas être compensé par des gravillons de résistance élevée.

Le facteur de forme d'après Forster (1981) est le mieux corrélé avec le coefficient de frottement mesuré avant et après le polissage des gravillons (coefficient de corrélation de 0,72 et 0,74). Selon Forster, les résultats incitent à penser qu'une valeur optimale du facteur de forme se situerait entre 0.16-0.20 afin d'obtenir un coefficient de frottement maximum. En combinant cette valeur optimale à une taille idéale des granulats, l'auteur indique qu'un frottement total maximum pourrait être atteint.

Britten (1974) a montré par ses travaux qu'il existe un optimum de microtexture pour obtenir un coefficient *SRT* maximum. Le rayon efficace correspondant au maximum de frottement est d'autant plus faible que le diamètre d des sphères créant la macrotexture est faible (r_e

$\mu_{optimal} = 150(50) \mu\text{m}$ pour $d = 9(4) \text{ mm}$). Une interaction micro - macrotexture semble donc exister. Une validation sur planches d'essais serait cependant la bienvenue.

Lees et al ont précisé qu'une microtexture suffisante est requise à toutes les vitesses alors qu'une bonne macrotexture est un élément additionnelle pour un bon drainage à vitesse moyenne et élevée. Ces termes ont été confirmés par les observations de Smithson et Herzegh (1971) qui indiquent que les surfaces glissantes ont une macrotexture prédominante par rapport à la microtexture.

Sans détailler la théorie de Golden (1981), les résultats de simulations ont conduit aux conclusions suivantes :

- la diminution de la taille de la macrotexture provoque une augmentation du coefficient de frottement,
- la diminution de la taille de la microtexture provoque une augmentation du coefficient de frottement.

Un compromis existe entre la taille de la macrotexture (modélisé par le diamètre D des demi-sphères) et la taille de la microtexture (modélisé par l'amplitude moyenne h_m des microaspérités).

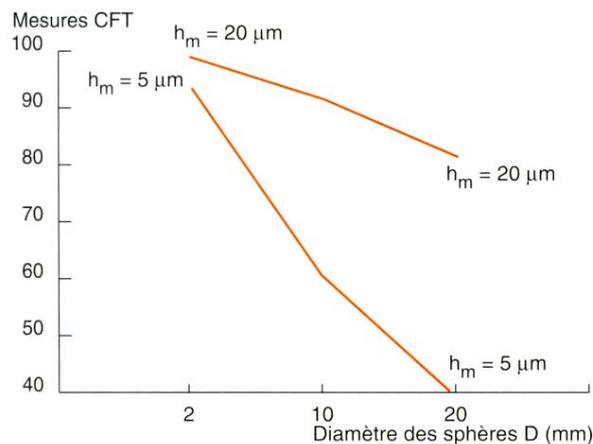


Figure 2 : Valeur de CFT en fonction de la macrotexture (diamètre des sphères) et de la microtexture (hauteur h_m). [Golden, 81]

De manière plus récente, en 1992, une large étude sur les appareils de mesure d'adhérence a eu lieu sous l'impulsion de l'AIPCR. Le but de cette expérience était de permettre de comparer les résultats de mesures obtenus par les différentes méthodes en usage dans le monde.

Plusieurs tentatives ont eu lieu dans le passé pour corréler les données fournies par divers appareillages et, quoique de bonnes corrélations aient pu être observées dans certains cas, en particulier lorsque les revêtements considérés étaient de types similaires, une corrélation généralisée n'a jamais été obtenue. Il faut admettre que pour relier des mesures de frottement obtenues par des méthodes différentes utilisant soit une roue inclinée par rapport à la direction du mouvement, une roue à taux de glissement imposé ou une roue bloquée, il est nécessaire de prendre en compte l'effet de la texture superficielle. C'est pourquoi, dans l'étude de l'AIPCR, les résultats de mesure de frottement ont été analysés à l'aide de modèles incorporant aussi les caractéristiques de texture des revêtements.

Afin de pouvoir relier des mesures de frottement et de texture provenant d'appareillages si divers, une grande quantité de mesures a été faite: tous les appareils sélectionnés ont effectué leurs mesures, que ce soit de frottement ou de texture, simultanément sur un grand

nombre de revêtements couvrant une large gamme de valeurs de texture et de frottement. Les sites choisis étaient des routes réelles en Belgique et en Espagne. La base de données obtenue a tout d'abord fait l'objet d'une recherche de corrélations directes entre chaque paire de mesure de frottement de façon à établir des relations entre appareils de mesure de frottement. En outre les différents paramètres basés sur les mesures du profil de la texture ont été comparés avec la profondeur de texture déterminée par la méthode volumétrique («essai à la tache de sable»).

Enfin, la base de données a permis d'élaborer un *Indice de Frottement International (IFI)* qui peut être prédit par chaque appareil participant à partir d'une mesure effectuée dans ses conditions ordinaires d'essai. L'*IFI* est un indice à deux paramètres qui, pour la plupart mais pas tous les appareils, exige qu'une mesure de texture soit adjointe à la mesure de glissance effectuée par l'appareil en question.

Parce qu'il y a trois types principaux d'appareillages: à glissement latéral, à glissement longitudinal et à roue bloquée, on a été conduit à admettre la nécessité de prendre en compte la macrotecture dans la recherche d'une harmonisation. C'est pourquoi un indice de frottement doit consister en deux nombres: l'un lié à une mesure de macrotecture, l'autre à une mesure de frottement. L'objectif étant de permettre à tous les appareillages de prédire les mêmes valeurs pour ce doublet de nombres sur un revêtement donné.

A priori, on pourrait penser que l'harmonisation entre méthodes de mesures différentes consiste essentiellement à étalonner chaque méthode par comparaison avec une mesure exacte. Or, en matière de frottement, il n'existe pas de valeur exacte dans l'absolu. C'est pourquoi, on a été amené à prendre comme référence les courbes du coefficient de frottement en fonction de la vitesse relative de glissement établie sur base des résultats moyens fournis par les différents appareils sur chacun des sites d'essai. Nous les appelons: «courbes idéales» 1. Elles sont caractérisées par les deux «nombres idéaux»: GF_{60} et GS dans l'équation suivante:

$$GF(S) = GF_{60} \cdot \exp\left[\frac{(60 - S)}{GS}\right]$$

dans laquelle :

- S est la vitesse relative de glissement en km/h,
- $GF(S)$ est la courbe idéale frottement/vitesse pour un revêtement donné,
- GF_{60} est la «valeur idéale» du coefficient de frottement,
- GS est la «valeur idéale» de la constante déterminant l'influence de la vitesse.

L'analyse a montré que GS est lié à la macrotecture et que les mesures de texture effectuées par les différentes méthodes utilisées dans l'expérience permettent de bien prédire cette constante de vitesse. Il suffit en effet de déterminer la régression linéaire entre GS et chacune des mesures de texture (T_x) pour obtenir la valeur de GS «prédite» (S_p) par chaque méthode de mesure de texture:

$$S_p = a + b \cdot T_x$$

Notons que les mesures basées sur la profondeur moyenne de profil (MPD) offrent les meilleures corrélations non seulement avec GS mais aussi avec la profondeur moyenne de texture obtenue par voie volumétrique (MTD). Les valeurs de a et b ont été calculées pour toutes les mesures de texture effectuées.

Les appareils de mesure de frottement ont une vitesse relative de glissement (S) qui dépend de la configuration de l'appareil et de la vitesse de déplacement (V):

- $S = V$ pour les appareils à roue bloquée,

- $S = V \cdot \text{taux de glissement pour les appareils à glissement longitudinal}$,
- $S = V \cdot \sin(\alpha)$ pour les appareils à glissement latéral, α étant l'angle d'environnement.

La première étape permettant de prédire la valeur idéale du coefficient de frottement (GF_{60}) à partir d'une mesure (FR_S) effectuée à une vitesse quelconque (S) consiste à ramener cette mesure à la vitesse de référence de 60 km/h en utilisant le paramètre de vitesse prédit (Sp) à partir de la mesure de texture au moyen de l'équation suivante:

$$FR_{60} = FR_S \cdot \exp\left[\frac{S - 60}{Sp}\right]$$

L'étape finale de l'harmonisation consiste à prédire GF_{60} à partir de sa régression linéaire par rapport aux deux variables indépendantes FR_{60} et Tx :

$$F_{60} = A + B \cdot FR_{60} + C \cdot Tx$$

Dans cette équation, A , B et C sont des constantes de calibration propres à un appareil particulier (avec $C=0$ pour les appareils utilisant des pneus lisses)

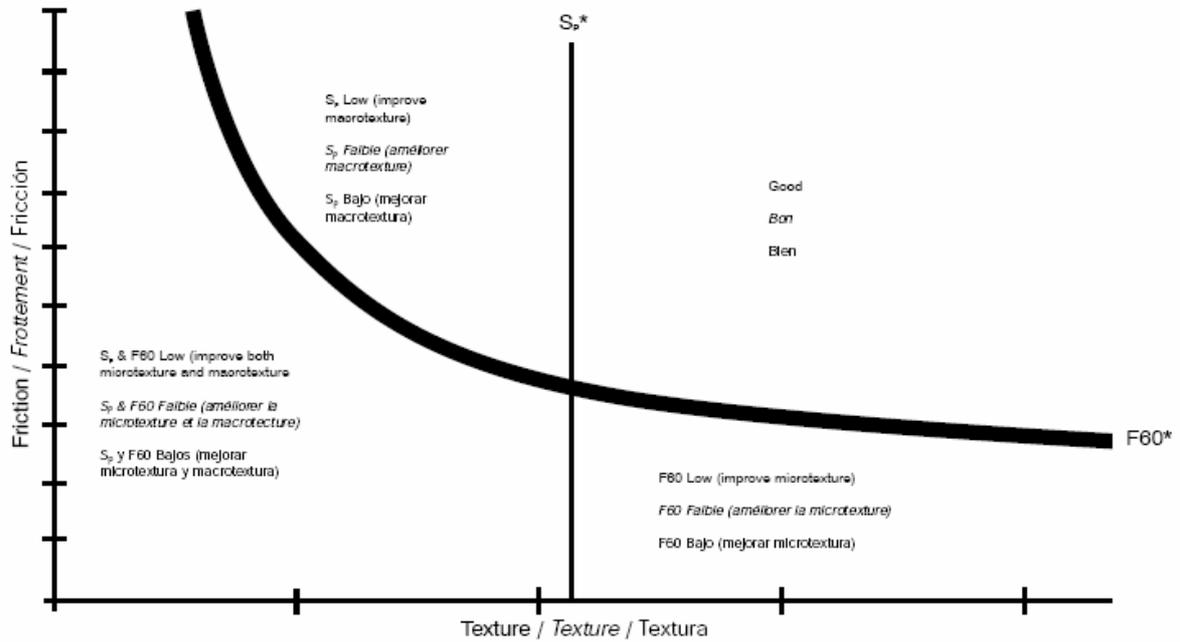
En combinant les trois dernières équations, F_{60} peut se calculer à partir de deux résultats de mesures (FR_S et Tx):

$$F_{60} = A + B \cdot FR_S \cdot \exp\left[\frac{S - 60}{a + b \cdot Tx}\right] + C \cdot Tx$$

Dans cette équation, F_{60} est la prédiction de la valeur idéale du coefficient de frottement et Sp est la prédiction de la valeur idéale de la constante de vitesse. Le couple de valeurs F_{60} et Sp constitue l'*Indice de Frottement International (IFI)* qui n'est autre que la prédiction de l'Indice de Frottement International idéal ($GIFI = IFI(Sp^*, F_{60}^*)$).

La dernière équation permet d'obtenir une courbe de F_{60} en fonction de Tx et en fixant des seuils pour Sp et F_{60} (Sp^* et F_{60}^*) on obtient une courbe qui lors du calcul pour une route donnée, et ce avec n'importe quel appareil de mesure, du coefficient FR_S et de la texture Tx nous permet de situer cette route dans une des quatre zones du graphique selon la qualité antidérapante.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet AIPCR n'ont pas conduit à fixer des seuils limites puisque cette action demande un grand travail de recherche supplémentaire sur de nombreuses routes avec des topologies différentes pour avoir un aperçu global des routes qui soit suffisamment représentatifs d'un point de vue statistique. En Suisse il est difficile à ce jour de fixer ces seuils car il n'existe pas de mesure de texture proprement dite. En effet l'utilisation du drainomètre a été étudiée dans cette étude mais a, par la suite, été abandonnée suite aux faibles corrélations entre les mesures d'écoulement et les mesures de macrotecture avec des méthodes modernes comme le Rugolaser ou autres appareils utilisant des mesures moyennes de profil.



Significance of the Areas of a Friction vs Macrotexture Diagram. / Signification des domaines du diagramme frottement/texture. / Significado de las distintas zonas en un diagrama de fricción-textura.

Figure 3 : Caractérisation de la qualité du revêtement routier vis-à-vis de l'adhérence suivant la démarche AIPCR.

C. ETUDE DE L'INCIDENCE DE LA FORME DES GRANULATS

1. BUT DE L'ETUDE

Ce travail a été conduit afin de déterminer l'influence de la forme des granulats (% cubicité + état des arêtes) sur la qualité antidérapante des chaussées.

2. DEMARCHE

Le polissage de douze plaques d'enrobés de formulations différentes élaborées au LAVOC (Laboratoire des Voies de Circulation à Lausanne, CH) a été effectué sur la machine *GRAP* (système de polissage des granulats par projection) au LRPC (Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées) d'Angers.

Les plaques sont de dimensions 50 x 18 x 5 cm et ont été élaborées à la table de compactage au LAVOC

Désignation de la plaque	Origine granulats	Type concasseur	Type d'enrobés	% cubique
A	AR	K	AB11	80
B	AR	K	AB11	50
C	AR	K	MR11	80
D	AR	K	MR11	50
E	AR	B	AB11	80
F	AR	B	AB11	50
G	AR	B	MR11	50
H	AR	B	MR11	80
I	BA	K	AB11	50
J	BA	K	AB11	80
K	BA	B	AB11	50
L	AR	G	AB11	50

Tableau 1 : Désignation des plaques élaborées pour l'étude

Origine des granulats

L'origine des granulats permet d'effectuer une étude de sensibilité au niveau de l'influence du CPA des granulats sur les résultats.

- AR – carrière d'Arvel (VD) : calcaire silicieux du Lias (99.1% calcaire, 0.9% grès), **CPA = 51**, LA = (classe granulaire 6/11) = 13 [-], MDE = (classe granulaire 10/14) = 12.4 [-] (selon norme NF P18-572)

- BA – carrière de Balmholz (BE) : calcaire silicieux du Crétacé (95.7% calcaire, 4.3% grès), **CPA = 53**, LA = (classe granulaire 6/11) = 13 [-], MDE = (classe granulaire 10/14) = 9.0 [-] (selon norme NF P18-572)

Type de concasseur

L'état des arêtes des granulats diffère suivant le type de concasseur utilisé. Pour cette raison trois types différents sont retenus dans cette étude.

- K – concasseur à marteaux : **arêtes vives**
- G – concasseur à sole tournante à enclumes : **arêtes semi-émoussées**
- B – concasseur à sole tournante autobroyant : **arêtes émoussées**

Type d'enrobés

Deux types d'enrobés distincts sont proposés dans cette étude. Il s'agit donc d'observer ici si l'influence de la forme est identique pour deux sortes d'enrobés qui constituent la grande majorité des couches de roulements en Suisse. Chaque enrobé est défini par sa courbe granulométrique.

- AB11 – béton bitumineux granulométrie 0/11
- MR11 – macrorugueux granulométrie 0/11

Chaque courbe se situe exactement au milieu du fuseau proposé par les normes suisses.

	Courbe granulométrique [% passant]							
Tamis [mm]	0.09	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8.0	11.2
AB11	7.5	38	43	50	58	70	85	100
MR11	7.5	19	21	25	-	30	65	100

Tableau 2 : Courbes granulométriques AB11 et MR11

Les tamis utilisés sont pour les tamis 0.09 à 2.8, à fils tissés et pour les tamis 4.0 à 11.2, à tôles perforées.

Taux de cubicité

Deux teneurs en cubiques ont été retenues : 50% et 80%. Ces valeurs correspondent aux limites admises par les normes suisses (*ancienne norme suisse SN 670 130, n'est plus d'actualité. Elle a été remplacée par la norme européenne EN 13043: 2002/AC: 2004 dès le 1^{er} janvier 2005*). La notion de cubique est ici définie par :

- Flakiness index (résultats à la grille) = 1.58

Séparation des éléments cubiques et non cubiques : grille à fentes (rapport G/A > 1.58), exécution manuelle.

Tamis maille sup	d_1	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8.0	11.2
Tamis maille inf	d_2	0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6	8.0
Ecartement barres	e	non trié	0.9	1.3	1.8	2.5	3.5	5.1
Rapport d_2/e	-	-	1.56	1.54	1.56	1.60	1.60	1.57

Tableau 3 : Définition des grilles à fentes pour le Flakiness/index

- Shape index (pied à coulisse) = 0.4

Mesure du taux de cubicité : A l'aide d'un pied à coulisse à double entrée avec rapport c/a de 0.4 (= plus petit diamètre/plus grand diamètre). Les grains sont dits cubiques lorsque $c/a \geq 0.4$.

Fabrication des plaques

Les plaques de dimension 500 x 180 x 50 mm ont été fabriquées en laboratoire au LAVOC puis transportées jusqu'au laboratoire LRPC d'Angers pour que l'essai de polissage des granulats à la machine *GRAP* puisse se dérouler.



Photo 1: Découpage d'une plaque

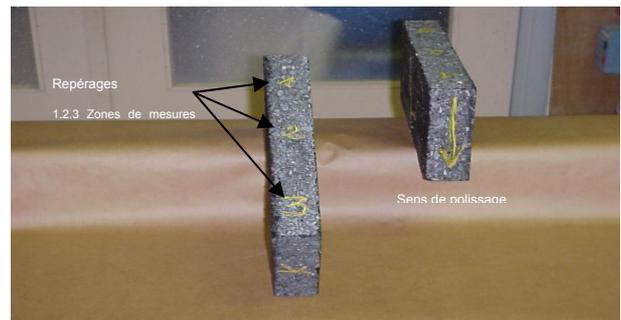


Photo 2: Repérage des points de mesure

Une fois les plaques fabriquées et sciées on procède au repérage des points de mesure

Par la suite on monte la plaque sur la machine de polissage accéléré pour faire subir des cycles de polissage à la surface des plaques.

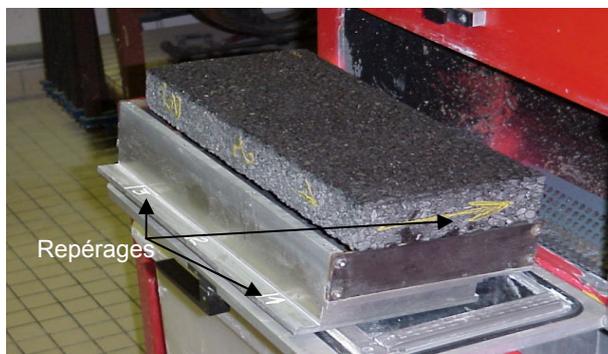


Photo 3: Montage d'une plaque dans la machine GRAP

Décapage du film de bitume à la surface des plaques

Un décapage a été effectué à chaud immédiatement après la confection des plaques au moyen du dichloro-méthane (ou chlorure de méthylène, solvant très volatil) et d'une brosse métallique à poils tendres. Ce décapage est important afin de permettre le bon déroulement des essais sur la machine *GRAP*.

Déroulement de l'essai



Figure 3: Machine *GRAP* – principe (source: www.lcpc.fr)

La machine *GRAP* permet d'effectuer le polissage rapide des gravillons utilisés en couches de roulement. Elle est constituée par une enceinte de projection, un doseur volumétrique de poudre, un générateur d'eau sous pression, une buse de projection eau-abrasif, une table à mouvements croisés, un bac de récupération et un pupitre électrique avec automate programmable.

Le polissage est réalisé par la projection d'un flux d'eau et d'abrasif très fin sous pression avec une incidence donnée (dans notre cas 20°). Un balayage de la surface est réalisé par le déplacement de la buse de projection grâce à une table à mouvements croisés. Le polissage est obtenu au bout de vingt cycles de balayage de forme rectangulaire. Le fonctionnement est contrôlé par un automate programmable.

La procédure de l'essai est détaillée comme suit:

Avant le polissage accéléré sur la machine *GRAP* (état 0) :

- découpage des plaques en trois échantillons
- description précise de la surface de tous les échantillons (fissuration, arrachage de granulats, position de certains granulats, qualité des bords, défauts particuliers, etc.)
- mesure de la microtexture (pendule *SRT*)
- mesure de la macrotecture (hauteur au sable vraie)

Pendant le polissage accéléré sur la machine *GRAP* :

Nombre de balayages	Mesure <i>SRT</i>	Mesure <i>HSv</i>	Description sommaire de la surface ³
5	oui	oui	oui
10	oui	oui	oui
20	oui	oui	oui
30	oui	oui	oui
40	oui	oui	oui

Tableau 4 : Programme de polissage et mesures du GRAP

3. ANALYSE DES MESURES

3.1 Evolution globale de la microtexture avec le nombre de cycles (annexes A + B + C)

AB11 : Entre 0 et 5 cycles, on observe toujours une augmentation de la valeur *SRT* lorsque les plaques sont confectionnées avec des granulats provenant de la carrière d'Arvel (reste de liant à la surface malgré le décapage). A l'inverse, on observera toujours une diminution de cette valeur lorsque les plaques sont confectionnées avec des matériaux provenant de la carrière de Balmholz. Toutes les valeurs *SRT* à 5 cycles se situent entre 64 ± 1 points.

La zone entre 5 et 20 cycles est la plus intéressante de l'étude puisqu'elle offre des évolutions différentes suivant les formules. Même si on constate toujours une diminution de la valeur *SRT* entre 5 et 20 cycles, cette perte sera de -4 à -8 points suivant la formule. A 20 cycles, le polissage est considéré comme terminé puisque ce stade correspond à celui de l'essai *CPA* avec une corrélation de 0.95.

Entre 20 et 40 cycles on remarque que la microtexture reste plus ou moins constante (0 ± 2 points) mais qu'elle contient toujours un léger pic à 30 cycles.

Sans explications on observera que la formule introduisant des granulats à arêtes semi-émoussées fournit le meilleur comportement de tous les AB11.

MR11 : L'allure générale des courbes est la même que pour les enrobés AB11 (augmentation de +3 et +11 points (!) entre 0 et 5 cycles si les granulats contiennent des arêtes vives ; perte de -5 à -8 points entre 5 et 20 cycles ; stabilisation entre 20 et 40 cycles).

3.2 Evolution globale de la macrotecture avec le nombre de cycles (annexes E + F)

Les valeurs *HSv* d'une manière générale augmentent entre 0 et 20 cycles puis se stabilisent. Cette augmentation peut être en partie expliquée par l'éventuelle création de vides communicants suite à la destruction de rideaux de liant par la projection d'abrasif. Il est intéressant de noter que cette augmentation de macrotecture (par création de vides communicants ou autre) se traduit par une diminution de la microtexture. Cette remarque

³ La description sommaire inclut l'état général de la surface et les éventuelles remarques.

traduit la nécessité d'obtenir un bon compromis, pour avoir une bonne adhérence, entre des performances de macrotexture et de microtexture.

3.3 Incidence du pourcentage de granulats cubiques (annexes A + E)

Evolution de la microtexture :

AB11 : Dès 10 cycles, un taux de cubicité de 80% observe de meilleures valeurs *SRT* (+1 à +4 points) qu'un taux de 50% cubiques pour des granulats à arêtes émoussées. Les valeurs *SRT* sont semblables après 5 cycles. Les valeurs *SRT* sont similaires pour des granulats à arêtes vives.

MR11 : Dès 5 cycles, un taux de cubicité de 50% observe de meilleures valeurs *SRT* (+4 à +6 points) qu'un taux de 80% cubiques pour des granulats à arêtes vives sauf à 30 cycles où il existe une différence négative de -2 points. Les valeurs *SRT* sont similaires pour des granulats à arêtes émoussées.

Evolution de la macrotexture :

AB11 : Aucune tendance notable.

MR11 : Dès 5 cycles et en présence de granulats à arêtes vives, un taux de cubicité de 80% observe des valeurs *HSv* plus importantes (+0.7 à 1.1 point). Au contraire, en présence de granulats à arêtes émoussées, ce même taux d'éléments cubiques observe des valeurs *HSv* moindres (-0.4 à -0.6 point).

3.4 Incidence de l'état des arêtes (annexes B + F)

Evolution de la microtexture :

AB11 : Dès 5 cycles et pour un taux de cubicité de 80%, les granulats à arêtes émoussées provoquent des valeurs *SRT* supérieures ou identiques (+0 à +4 points) aux valeurs obtenues avec des granulats à arêtes vives. Les valeurs *SRT* sont semblables pour un taux de cubicité de 50%.

MR11 : Entre 5 et 20 cycles et pour un taux de cubicité de 80% les arêtes émoussées provoquent de meilleures valeurs *SRT* (+2 à +5 points) que les arêtes vives ; au-delà ces valeurs sont semblables. On n'observe pas de différence notable pour un taux de cubique de 50%.

Evolution de la macrotexture :

AB11 : La présence de granulats à arêtes vives permet d'obtenir des valeurs *HSv* plus élevées quel que soit le taux de cubique mais la différence est cependant plus marquée pour un taux de 50% d'éléments cubiques.

MR11 : Selon le taux de cubique (50% ou 80%), les valeurs *HSv* sont plus importantes respectivement pour une formulation comprenant des granulats à arêtes vives et à arêtes émoussées.

3.5 Etude de sensibilité 1 : influence du CPA (annexe C)

Quel que soit l'état des arêtes mais pour un taux de cubicité de 50%, les valeurs *SRT* obtenues sont égales ou supérieures (0 à +3 points) dans le cas de l'utilisation d'un granulat détenant un meilleur CPA. On n'observe par contre aucune différence dans le cas d'un taux de cubicité de 80%.

La faible différence des valeurs CPA entre Arvel (51) et Balmholz (53) peut expliquer entre autre l'absence de tendance pour le taux de cubicité de 80%.

On constatera aussi que dans tous les cas la valeur *SRT* diminue entre 0 et 5 cycles pour les plaques réalisées avec les matériaux en provenance de la carrière de Balmholz alors que cette valeur augmente dans le cas d'utilisation de matériaux provenant d'Arvel.

3.6 Etude de sensibilité 2 : influence du type d'enrobé (annexe D)

Evolution de la microtexture :

Cubicité = 50% : Quel que soit l'état des arêtes des granulats (vives ou émoussées), le type d'enrobé n'influence de manière générale pas les valeurs *SRT*.

Cubicité = 80% : Un enrobé bitumineux AB observe de meilleures valeurs *SRT* (+1 à +4 points) dans le cas de granulats à arêtes vives. Cette tendance est davantage accentuée (+2 à +5 points) en présence de granulats à arêtes émoussées mais seulement dès 10 cycles (valeurs similaires après 5 cycles).

3.7 Enseignements

Les enseignements tirés de cette étude sont synthétisés dans les tableaux suivants. Les résultats de l'expérience étant de nature relatives, il s'agit donc ici de montrer les bénéfices obtenus avec une certaine formule par rapport à une autre.

Microtexture :

Formules AB11 :

Effet de la formule modifiée sur la formule initiale			Modification apportée			
			Arêtes vives		Arêtes émoussées	
			50% cub.	80% cub.	50% cub.	80% cub.
Formule initiale	Arêtes vives	50% cub.		=	= (*) (**)	
		80% cub.	= (*)			↑
	Arêtes émoussées	50% cub.	= (*)			↑
		80% cub.		↓	↓ (*) (**)	

= (aucun effet), ↑ (effet plutôt positif), ↓ (effet plutôt négatif)

(*) Effet positif dans le cas de l'utilisation d'un CPA meilleur dans la formule modifiée.

(**) Formulation AB11 ayant observé les meilleures valeurs *SRT* sur tout le cycle de vie dans le cas de l'utilisation d'un CPA meilleur.

Tableau 5 : Effets apportés par l'état des arrêtes et la cubicité pour la formule AB11 sur la microtexture

L'incidence simultanée % cubicité – état des arêtes est observée mais délicate à démontrer. On peut cependant penser que le compactage est facilité lors d'une augmentation du taux de cubicité et qu'une densité d'enrobé plus grande entraîne une surface de contact plus conséquente. L'utilisation d'arêtes émoussées à 80% de granulat cubique va dans ce sens et de plus montrent des résultats positifs d'un point de vue de la microtexture par rapport aux

autres formulations. Ce gain en microtexture peut s'expliquer dans le fait que l'utilisation d'arêtes émoussées tend à augmenter la surface de contact entre le pneu et la chaussée. Néanmoins il ne faut pas non plus oublier que l'utilisation en excès d'arêtes émoussées est un facteur accélérant le processus d'orniérage des chaussées.

Effet de la formule modifiée sur la formule initiale			Modification apportée			
			Arêtes vives		Arêtes émoussées	
			50% cub.	80% cub.	50% cub.	80% cub.
Formule initiale	Arêtes vives	50% cub.		↓	=	
		80% cub.	↑ (*)			↑
	Arêtes émoussées	50% cub.	= (*)			=
		80% cub.		↓	=	

= (aucun effet), ↑ (effet plutôt positif), ↓ (effet plutôt négatif)

(*) Formulation MR11 ayant observé les meilleures valeurs *SRT* dès 5 cycles.

Tableau 6 : Effets apportés par l'état des arrêtes et de la cubicité pour la formule MR11 sur la microtexture

Une structure en MR11 a donc selon ces résultats un comportement inverse par rapport à une structure AB11 concernant l'influence simultanée du taux de cubicité et de l'état des arêtes. En effet, un MR11 observera une évolution similaire de sa microtexture indépendante du taux de cubicité lorsqu'il s'agit d'arêtes émoussées alors qu'un AB11 observera une évolution similaire de sa microtexture lorsqu'il s'agit d'arêtes vives. D'autre part, une diminution du taux de cubicité sera bénéfique dans le cas d'un MR11 à arêtes vives alors qu'une diminution de ce taux sera plutôt néfaste dans le cas d'un AB11 à arêtes émoussées.

Pour les structures MR11 on peut penser qu'un faible taux de cubicité permet aux granulats plats d'accroître la surface de contact et ainsi le niveau de microtexture.

On remarquera cependant pour les deux types d'enrobés que pour un taux de cubicité de 80% la présence de granulats à arêtes émoussées sera bénéfique sur le niveau de microtexture.

Formules AB11 :

Effet de la formule modifiée sur la formule initiale			Modification apportée			
			Arêtes vives		Arêtes émoussées	
			50% cub.	80% cub.	50% cub.	80% cub.
Formule initiale	Arêtes vives	50% cub.		= (*)	↓	
		80% cub.	= (*)			↓
	Arêtes émoussées	50% cub.	↑ (*)			=
		80% cub.		↑ (*)	=	

= (aucun effet), ↑ (effet plutôt positif), ↓ (effet plutôt négatif)

(*) Formulations AB11 ayant observé les meilleures valeurs *HSv* sur tout le cycle de vie

Tableau 7 : Effets apportés par l'état des arrêtes et de la cubicité pour la formule AB11 sur la macrotecture

Formules MR11 :

Effet de la formule modifiée sur la formule initiale			Modification apportée			
			Arêtes vives		Arêtes émoussées	
			50% cub.	80% cub.	50% cub.	80% cub.
Formule initiale	Arêtes vives	50% cub.		↓	↓	
		80% cub.	↑ (*)			↑
	Arêtes émoussées	50% cub.	↑ (*)			↑
		80% cub.		↓	↓	

↑ (effet plutôt positif), ↓ (effet plutôt négatif)

(*) Formulations MR11 ayant observé les meilleures valeurs *HSv* sur tout le cycle de vie

Tableau 8 : Effets apportés par l'état des arrêtes et de la cubicité pour la formule MR11 sur la macrotecture

Alors qu'une structure AB11 observe une meilleure macrotecture en présence des granulats à arêtes émoussées quel que soit le taux de cubique, cette relation simultanée cubicité – état des arêtes est plus délicate pour une structure MR11. Un taux de cubicité de 50% est plutôt favorable dans le cas d'arêtes vives tandis qu'un taux de 80% sera quant à lui plutôt favorable pour les arêtes émoussées.

Valeurs *SRT* bruts à 20 cycles de balayages

Valeur *SRT* à 20 cycles en fonction de la formulation

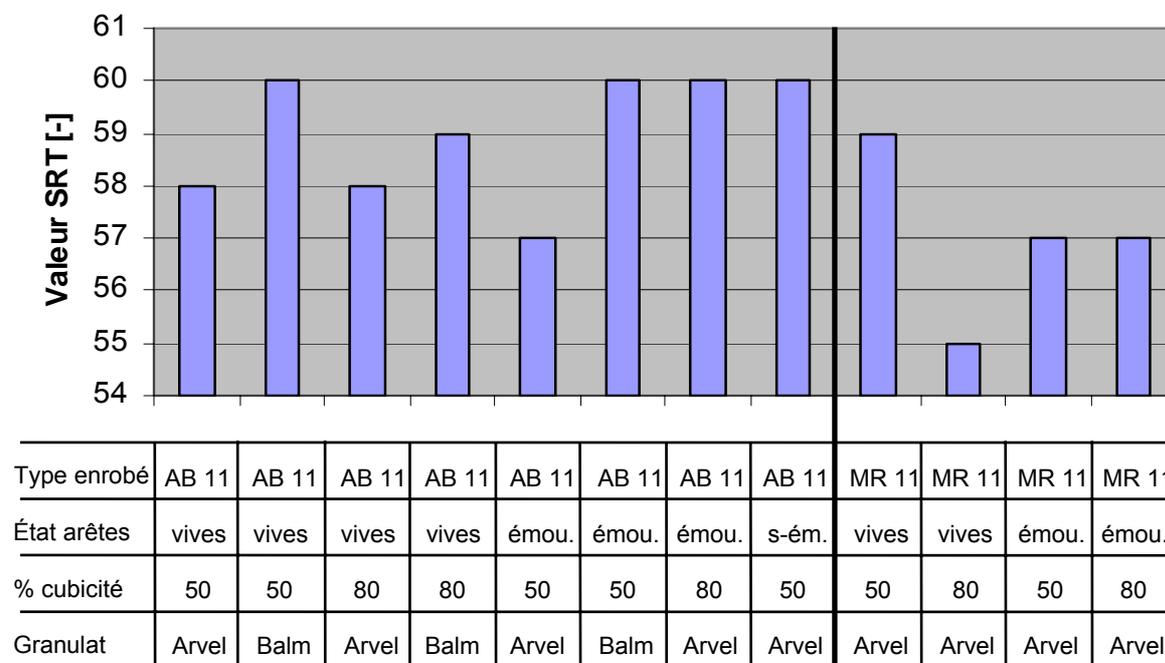


Tableau 9 : Valeurs *SRT* après 20 cycles sur la machine GRAP

Les valeurs *SRT* obtenues à 20 cycles sur les enrobés AB11 sont plus grandes ou égales que celles obtenues pour les MR11. On retrouve en moyenne en valeur *SRT* la différence de CPA de 2 points entre les deux types de granulats (colonnes 1+2, 3+4 et 5+6).

4. CONCLUSION

Cette étude en laboratoire apporte des éléments de réponses concernant l'incidence de la forme des granulats (influence simultanée taux de cubicité – état des arêtes) surtout en matière de microtexture. Et même si il s'agit de tendances il apparaît que l'effet produit par ces facteurs peut être nul ou marqué suivant la formulation choisie (chapitre enseignements).

Il semblerait qu'il existe aussi dans certains cas une certaine compensation entre la forme et le niveau de *CPA* des granulats pour autant que ce dernier reste dans une même gamme de grandeur. Un meilleur *CPA* sera cependant toujours bénéfique pour la microtexture si tous les autres facteurs sont identiques.

Les enseignements tirés de cette étude peuvent guider la réalisation de futures planches d'essais. Il sera cependant indispensable de choisir judicieusement les matériaux afin d'obtenir de réels contrastes au niveau de l'état des arêtes (par exemple concasseur giratoire à enclumes pour des arêtes très vives) ou des valeurs *CPA* (par exemple carrière de Choëx, VS, pour des niveaux de *CPA* avoisinant les 65).

D. BILAN DES EXPERIENCES FRANÇAISES ET ETRANGERES

1. INTRODUCTION

Cette première partie traite du bilan des expériences suisses et étrangères en matière de glissance. Cette synthèse sur l'état des connaissances se veut très large, mais pourra difficilement intégrer toute la documentation relative à ce sujet au vu du large éventail des sources d'informations et du nombre important de textes publiés.

Les chapitres suivants retracent et résument uniquement les travaux de recherches, conférences ou autres qui sont jugés nécessaires pour la suite de l'étude. Les autres travaux seront mentionnés en annexe.

Chaque chapitre correspond à une source d'information type. Ces sources sont pour la plupart européennes.

2. FRANCE : PLANCHES EXPERIMENTALES « ADHERENCE – GRANULATS »

2.1 Type d'expérimentation

Dans le cadre du programme d'entretien préventif 1992, pour le compte de la Direction des routes, deux séries de planches expérimentales « granulats – adhérence » ont été réalisées sur deux sites différents : la RN 148 dans les Deux-Sèvres et l'A 75 dans le Puy de Dôme. La date de leur réalisation était début automne 1992.

Le but de cette expérimentation était de tester l'incidence des caractéristiques intrinsèques des gravillons (résistance au polissage CPA, à la fragmentation LA et à l'usure MDE) sur l'adhérence des bétons bitumineux à forte discontinuité, sur un itinéraire facile (RN 148) et un autre difficile (A 75). Il s'agissait en particulier de définir des spécifications réalistes en matière de granulats, conciliant les impératifs techniques et les contraintes économiques.

Ce programme recouvre une période de 5 ans.

2.2 Rappels concernant les propriétés des granulats

Catégorie des granulats

La norme française propose trois catégories de granulats (A, B et C) en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques. Une règle de compensation intervient afin d'obtenir la catégorie :

Catégorie	100 CPA – (LA + MDE)		100 CPA		LA + MDE	
	Valeur inférieure	spécifiée	Valeur inférieure	spécifiée	Valeur supérieure	spécifiée
A	30		50		30	
B	15		45		40	
C	5		45		50	

Tableau 10: Calcul de la catégorie des granulats.

Base de la qualité antidérapante

On rappellera qu'afin d'assurer une bonne qualité antidérapante, les propriétés qui interviennent au niveau des granulats sont :

- > La granularité + forme + angularité pour la macrotexture.
- > La résistance au polissage pour la microtexture.

Et afin de conserver leur intégrité aussi durablement que possible dans la chaussée, les propriétés des granulats qui entrent en jeu sont :

- > La résistance à la fragmentation et à l'usure.

2.3 Présentation des deux sites

La RN 148 dans les Deux-Sèvres

Le tracé est rectiligne et le profil en long pseudo-plat. Le trafic journalier moyen (TJM) est de 13 300 [véh/jour] dont 13 % de poids lourds. Deux séries de quatre planches d'essais contiguës y ont été placées :

- Série RN 148-1 : 4 planches en béton bitumineux très minces (BBTM, e = 2.5 cm).
- Série RN 148-2 : 4 planches en béton bitumineux drainant (BBD_r, e = 4 cm).

Chacune des planches d'une série est composée d'un type de granulat spécifique, sélectionné selon des critères précis.

Les caractéristiques des quatre types de granulats utilisés sont présentées dans le tableau 11.

granulats	Nature pétrographique	Caractéristiques intrinsèques			Caractéristiques de fabrication		
		CPA ⁴	LA ⁵	MDE ⁶	A ⁷	PS ⁸	VB ⁹
A	Amphibolite	0.50	20	14	20	71	-
B	Tuf rhyolitique	0.51	12	5	11	58	0.9
C	Granite feuilleté à deux micas	0.58	25	15	5	67	-
D	Séricitoschiste	0.59	20	25	16	65	-
E	Microdiorite	0.48	12	10			

⁴ Coefficient de polissage accéléré.

⁵ Coefficient de Los Angeles.

⁶ Coefficient de friabilité des sables par l'appareil micro-Deval (conservation de l'angularité des granulats)

⁷ Coefficient d'aplatissement des gravillons.

⁸ Equivalent de sable à 10% de fines (propreté des sables).

⁹ Valeur de bleu de méthylène à la tache (propreté des sables).

Tableau 11 : Caractéristiques des granulats utilisés. [1 modifié]

Ces granulats correspondent respectivement aux catégories suivantes (selon norme XP P18-540) : B (A), A (B), B voire C (C) et C (D). Mentionnons que les granulats C et D observent un défaut en caractéristiques *LA + MDE*. Pour cette raison, leur catégorie sera seulement C voire B

Les courbes granulométriques pour les deux séries sont présentées sous la forme de deux tableaux (Tableau 12 et Tableau 13:13)

Tamis [mm]	10	6.3	4	2	1	0.315	0.08
BBTM	90	37	33	30	22	14	7
BBDr	90	23	18	16	13	8	4.6

Tableau 12: Courbes granulométriques théoriques.

	6/10	0/2	Fines d'apport dioritiques	Bitume 60/70 dopé
BBTM	70	27 à 30	0 à 3	5 à 5.55
BBDr	85	12.5 à 15	0 à 2.5	4.2 à 4.65

Tableau 13: Composition moyenne visée [%].

Le programme de l'étude comprenait des mesures d'adhérence et des mesures descriptives de la macrotecture et de la microtecture des revêtements, c'est-à-dire :

- *CFL* (mesures via appareil ADHERA à 40, 60 et 90 km/h) et *CFT* (mesures via appareil *SCRIM* à 60 km/h) : coefficients de frottement longitudinal et transversal.
- *HSV* : hauteurs au sable vraie ; *MTM*, *Rugolaser* : hauteurs au sable calculée.
- Pendule *SRT*, observations au microscope électronique et macrographies.

Après une première série de mesures à l'état initial des différentes chaussées, les séries de mesures suivantes ont été prises après 6 mois, 1 an, 2 ans, 3 ans et 5 ans.

L'A 75 dans le Puy de Dôme

Le tracé est constitué d'une succession de courbes à rayon faible ou moyen et de courts alignements continus de dévers. L'humidité quasi permanente régnant sur la chaussée et un verglas fréquent nécessite dans le cadre de son entretien une couche de roulement conservant dans le temps. Le TJM est de 20 000 [véh/jour] dont 7.5 % de poids lourds. Une série de sept planches d'essais contiguës de BBTM y ont été placées. Trois granulats types ont servi à leur réalisation (Tableau14)

Nature pétrographique	CPA	LA	MDE	A	PS
Granite (G)	0.54	20	9	11 (6/10) 14 (4/6)	
Basalte 1 (H1)	0.51	15	18	11 (6/10) 21 (4/6)	62 (0/2)
Basalte 2 (H2)	0.47	13	9	21	

Tableau 14: Caractéristiques des granulats utilisés.

Les tableaux suivants montrent les caractéristiques propres à chacune des planches (localisation + composition granulométrique).

Planche	1	2	3	4	5	6	7
Rayon de courbure [m]	300 à INF	650	300 à INF (courbe en S)	INF	450 à INF	300 à 900	250 m

Tableau 15: Situation des planches expérimentales.

Composition moyenne des BBTM [%]							
Planche	1	2	3	4	5	6	7
6/10	70	65	35 35			35 35	70
4/6				70	70		
0/2	26	31	26	26	26	26	26
Fines d'apport calcaires	4						
COLFLEX N	5.7			6.2		5.7	
Granularité des BBTM							
10 mm	91	92	90	-	-	93	89
6.3 mm	41	45	41	93	92	44	41
2 mm	29	34	30	30	32	30	30
0.08 mm	7.0	7.6	7.4	7.3	8.0	7.7	7.8

Tableau 16 :composition granulométrique des planches expérimentales. [1modifié]

Le programme de mesure est identique à l'autre site.

Toutes les formules testées dans cette étude sont conformes aux normes NF P 98-137 (BBTM) et NF P 98-134 (BBDr).

2.4 Résultats après 1 an

La RN 148 dans les Deux-Sèvres

Macrotecture : la macrotecture moyenne (via mesure des *HSv*) des planches A à D n'a pas évolué, mais un certain lissage des *HSv* sous l'effet du trafic est visible.

Coefficient *SRT* : Augmentation pendant les six premiers mois, puis stabilisation. Les valeurs *SRT* sont semblables pour les deux types de revêtements. Les meilleurs granulats du point de vue de la microrugosité initiale (planches C et D) provoquent une valeur de *SRT* plus importante.

Frottement longitudinal *CFL* – 40 : Le coefficient *CFL* augmente pendant les 12 premiers mois. Ceci est dû au décapage progressif du liant bitumineux. Cet effet est plus marqué pour les BBDr par rapport aux BBTM puisque leur pourcentage de liant est plus grand. Mentionnons que le polissage accéléré des granulats n'est pas encore entamé et qu'uniquement la microrugosité des granulats entre en jeu durant cette première année.

L'A 75 dans le Puy de Dôme

Macrotecture : Elle est plus élevée pour les BBTM 0/10 que pour les BBTM 0/6. Les planches à base de gravillons granitiques (planches 5 et 7 surtout) donnent les meilleures valeurs *HSv*. Ces valeurs diminuent avec le passage du trafic.

- coefficient *SRT* : Légèrement supérieur pour les BBTM 0/6 par rapport aux BBTM 0/10.
- frottement transversal *CFT* : Les coefficients restent très élevés avec un léger avantage pour les BBTM 0/6.
- frottement longitudinal *CFL* : Les BBTM 0/6 observent les plus grands coefficients.

On retiendra que durant la première année, les propriétés intrinsèques des granulats n'entrent pas encore en jeu puisque le décapage du film de bitume touche seulement à sa fin.

2.5 Résultats après 3 ans

La RN 148 dans les Deux-Sèvres

Le trafic après 3 ans est estimé à 10^6 passages de poids lourds.

Macrotecture : Evolution quasi semblable pour les groupes de planches AB et CD. La valeur *HSv* est satisfaisante.

Coefficient *SRT* : Pour les BBDr, accroissement de l'écart avec le trafic entre les groupes AB et CD en faveur du deuxième groupe. Pour les BBTM, mêmes observations, mais l'écart est plus faible.

Frottement longitudinal CFL – 40 : Pour les BBDr, augmentation du coefficient *CFL* pendant la première année, puis stabilisation (AB) ou accroissement (CD) pendant la deuxième année et enfin diminution durant la troisième année. Les meilleurs coefficients correspondent au groupe CD (environ + 0.5).

La microrugosité des granulats se situerait à un état intermédiaire (entre l'état neuf et l'état limite de polissage) après 3 ans de trafic. Comme il existe un réel avantage pour le groupe de planches CD, l'effet d'un *CPA* fort est donc significatif vis-à-vis de la glissance. Les coefficients de frottement relatifs aux planches A et B respectent quant à eux aussi les normes en vigueur.

Les spécifications *LA* et *MDE* relatives aux normes françaises pourraient être abaissées. Une plus grande prudence sera cependant observée pour le *MDE*.

La règle de compensation (conservation d'une bonne macrotecture¹⁰ contre une faible microtexture¹¹) ne provoquerait pas un niveau d'adhérence semblable. Concernant la glissance, les formulations à base de granulats possédant un meilleur *CPA* ont un avantage.

Un fort *CPA* est donc primordiale en vue d'une bonne adhérence. Les auteurs de la recherche soulignent le fait que la demande en glissance n'est pas une constante mais qu'elle varie en fonction des caractéristiques du tracé et du trafic.

L'A 75 dans le Puy de Dôme

Macrotecture : La différence de la valeur *HSv* diminue avec les années entre les BBTM 0/10 et les BBTM 0/6.

Coefficient SRT : Niveau de microtexture meilleur pour les planches à base de basalte. Ces coefficients sont cependant proches.

Frottement transversal CFT : Entre les années deux et trois, aucune perte de *CFT* pour les BBTM 0/6 une perte de 0.05 à 0.10 pour les BBTM 0/10.

Frottement longitudinal CFL : Après trois ans, niveau de *CFL – 40* satisfaisant pour toutes les planches ($0.50 < CFL < 0.60$) et excellent niveau pour *CFL – 60* et *CFL – 90*.

CFL – 40 : Les BBTM 0/10 comprenant du granit observent les *CFL* les plus bas. *CFL* plus élevés pour les BBTM 0/6.

CFL – 90 : Valeur constante et élevée pour les BBTM 0/6 et BBTM 0/10 basalte.

Il a donc été constaté d'une part l'influence bénéfique d'une granulométrie 0/6 sur l'adhérence d'une chaussée et d'autre part des meilleures caractéristiques de frottement pour les BBTM 0/10 basalte par rapport aux BBTM 0/10 basalte + granit.

Ajoutons encore que le nombre de passage de poids lourds s'élève aussi à 10^6 après trois années comme pour l'autre site.

2.6 Résultats après 5 ans

La RN 148 dans les Deux-Sèvres

Le trafic après 5 ans est estimé à $2 \cdot 10^6$ passages de poids lourds.

Macrotecture : Evolution quasi semblable pour les groupes de planches AB et CD. La valeur *HSv* est satisfaisante.

¹⁰ LA + MDE

¹¹ CPA

Coefficient SRT : Pour les BBDr, stabilisation de l'écart en faveur du groupe CD durant les 2 dernières années. Pour les BBTM, mêmes observations mais l'écart est plus faible.

Frottement longitudinal CFL – 40 :

Pour les BBDr, avantage pour les granulats C et D (+0.07), stabilisation du *CFL* après 4 ans.

Pour les BBTM, comportement voisin de celui des BBDr mais avec une meilleure adhérence au jeune âge. Après 5 ans, avantage pour le groupe CD (+0.08).

A vitesse plus élevée (*CFL – 60 et 90*), conservation de l'avantage des granulats CD sur ceux du groupe AB pour les deux types de planches.

Après 5 années, les formules CD restent bien situées par rapport aux fuseaux nationaux français. Les formules AB se situent par contre dans la région basse des fuseaux à basse vitesse (*CFL – 40*).

L'avantage des granulats C et D vis-à-vis de l'adhérence est dû à une meilleure microrugosité. Un fort *CPA* à l'origine est donc significatif autant pour les BBTM que pour les BBDr. Un léger bémol pour les BBTM AB à faible vitesse (*CFL – 40*) après 5 ans. Une macrotexture élevée assure quant à elle un bon comportement à vitesse supérieure.

Des dégradations précoces sont survenues sur les planches. Cependant, les planches AB ne présentent pas plus d'arrachement que les planches CD. A priori, l'abaissement des caractéristiques en *LA* ou *MDE* n'a pas de répercussion sur le niveau d'adhérence des formules BBTM ou BBDr. Etant donné que les résultats sont meilleurs pour C (bon *LA*) par rapport à D (bon *MDE*), il est préférable de maintenir une valeur *LA* élevée que *MDE* pour obtenir un niveau d'adhérence suffisant.

Concernant la règle de compensation et après 5 ans, les résultats des mesures ne justifient pas une telle règle. En effet, l'avantage des planches CD est toujours présent. D'autre part, les résultats sont meilleures pour A par rapport à B malgré des valeurs plus faibles pour *LA* et *MDE*.

L'A 75 dans le Puy-de-Dôme

Valeur *HSv* comparable (granit) ou légèrement inférieure (basalte) pour les BBTM 0/6 par rapport aux BBTM 0/10. Niveau globalement acceptable.

Meilleurs *CFT* pour les BBTM 0/10 basalte que pour les BBTM 0/10 granit pour une macrotexture identique. Les deux BBTM 0/6 observent un *CFT* quasi égal. L'adjonction d'un gravillon peu polissable (basalte) à un gravillon moyennement polissable (basalte) dans les BBTM 0/10 favorise la conservation de l'adhérence. L'intérêt d'un mélange de gravillons de natures pétrographiques différentes est cependant à confirmer.

70% de 6/10 au lieu de 65% permet d'optimiser le niveau de macrotexture des BBTM 0/10 sans altérer l'adhérence.

Les BBTM 0/6 sont mieux adaptés que les BBTM 0/10 dans les tracés sinueux puisque les coefficients de frottements sont supérieurs et sont conservés dans le temps. De plus, il semblerait que les caractéristiques intrinsèques des granulats sont moins significatifs pour un BBTM 0/6 qu'un BBTM /10.

2.7 Evolution des indices d'état de la chaussée pendant 5 ans

Evolution des indices d'état sur la RN 148 dans les Deux-Sèvres

Macrotexture

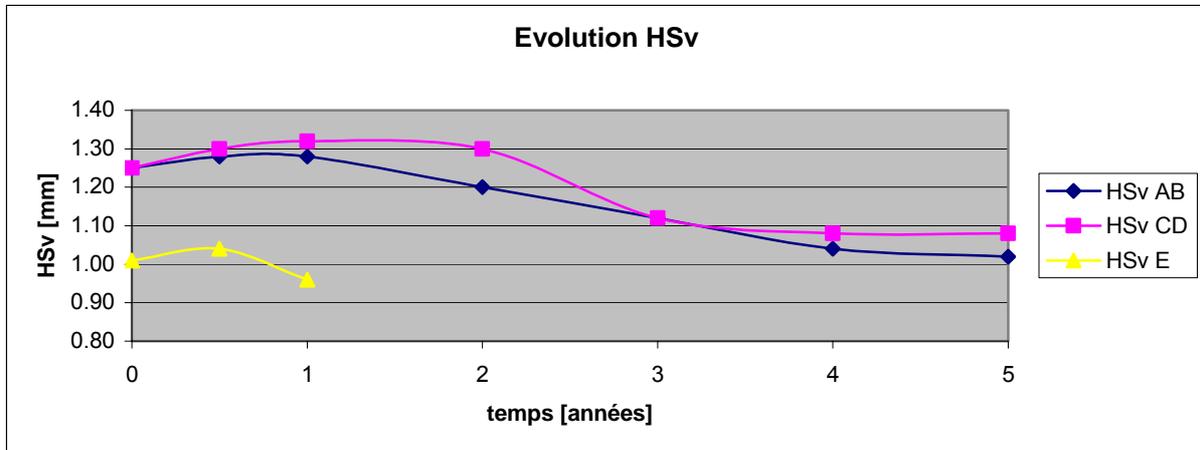


Figure : Evolution temporelle de HSv sur la RN 148

Microtexture

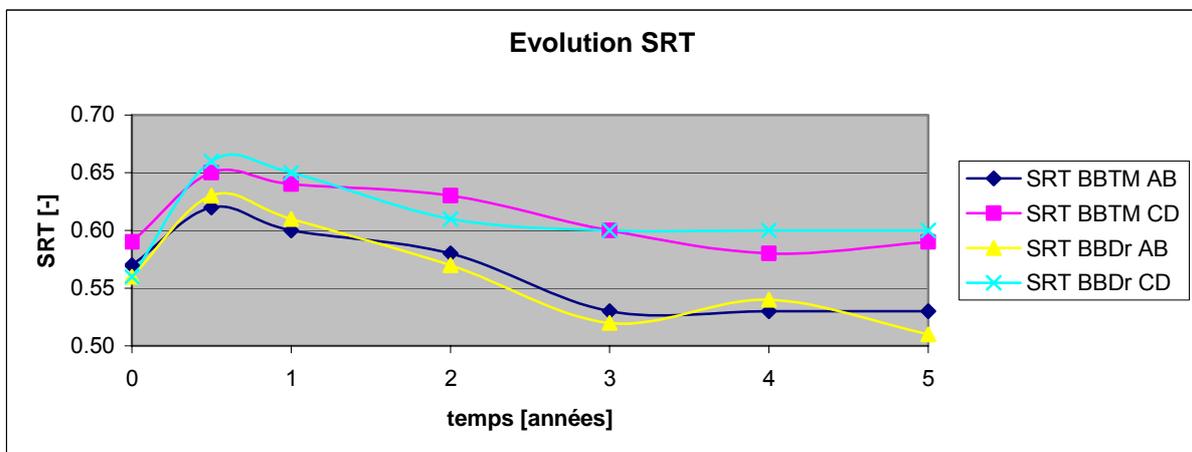


Figure : Evolution temporelle du SRT sur la RN 148

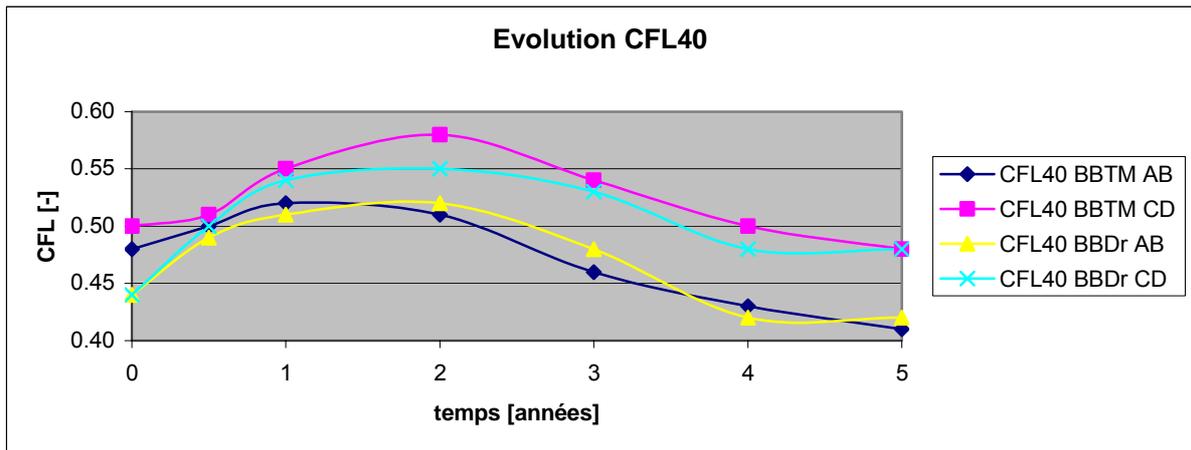


Figure : Evolution temporelle du CFL sur la RN 148

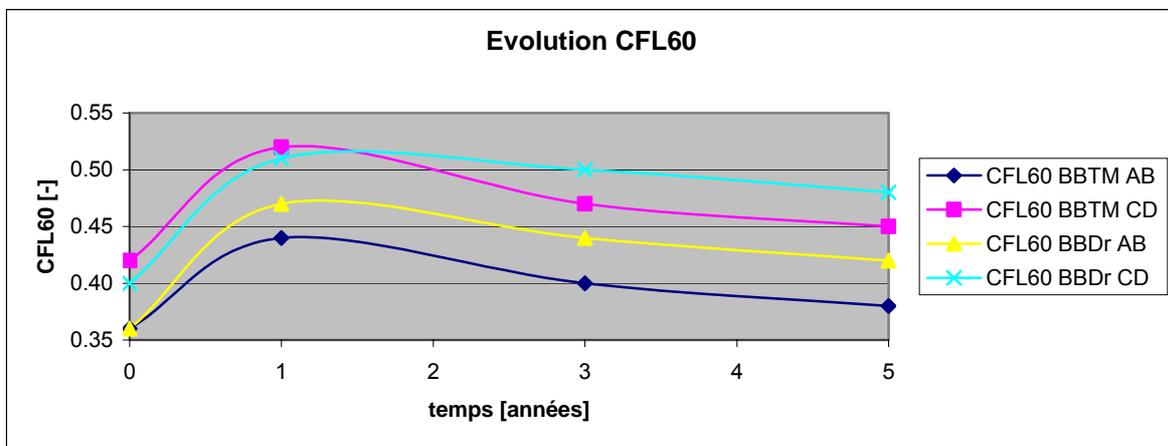


Figure : Evolution temporelle du CFL60 sur la RN 148

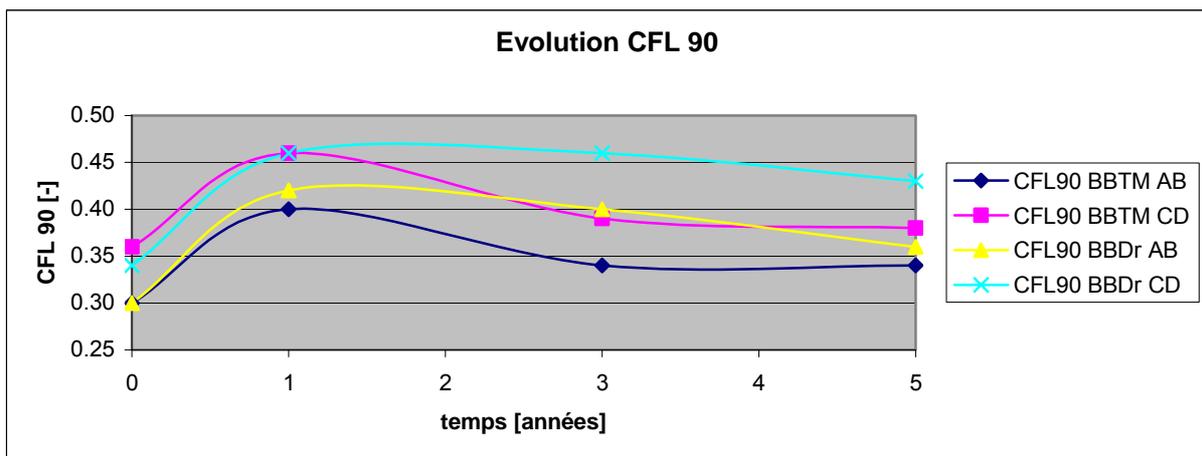


Figure : Evolution temporelle du CFL90 sur la RN 148

Evolution des indices d'état sur l'A 75 dans le Puy-de-Dôme

Macrotexture

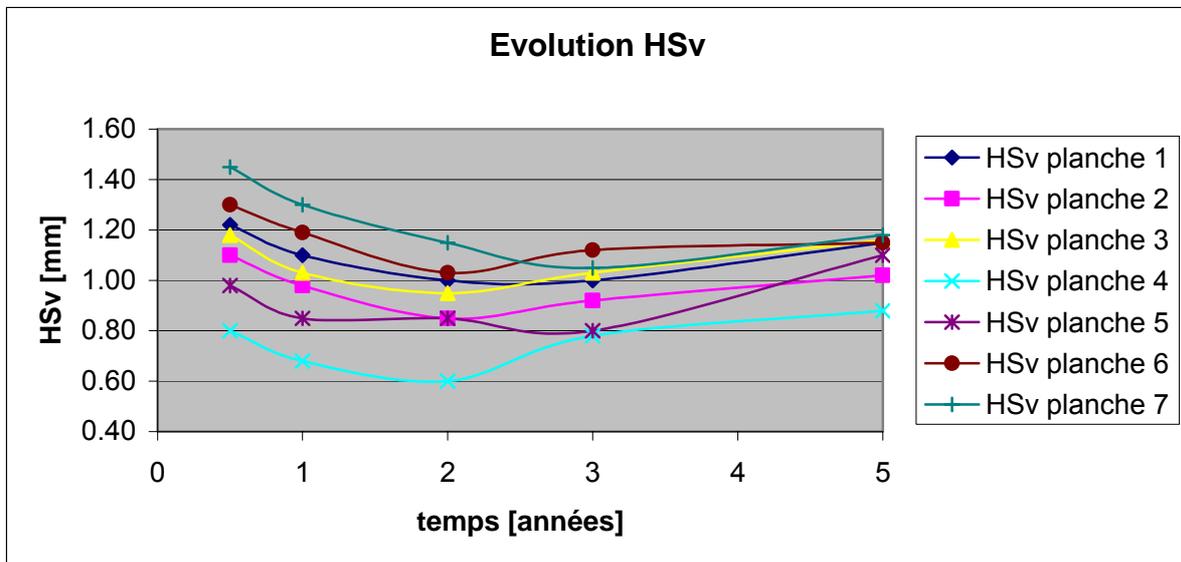


Figure : Evolution temporelle de HSv sur la A75

Microtexture

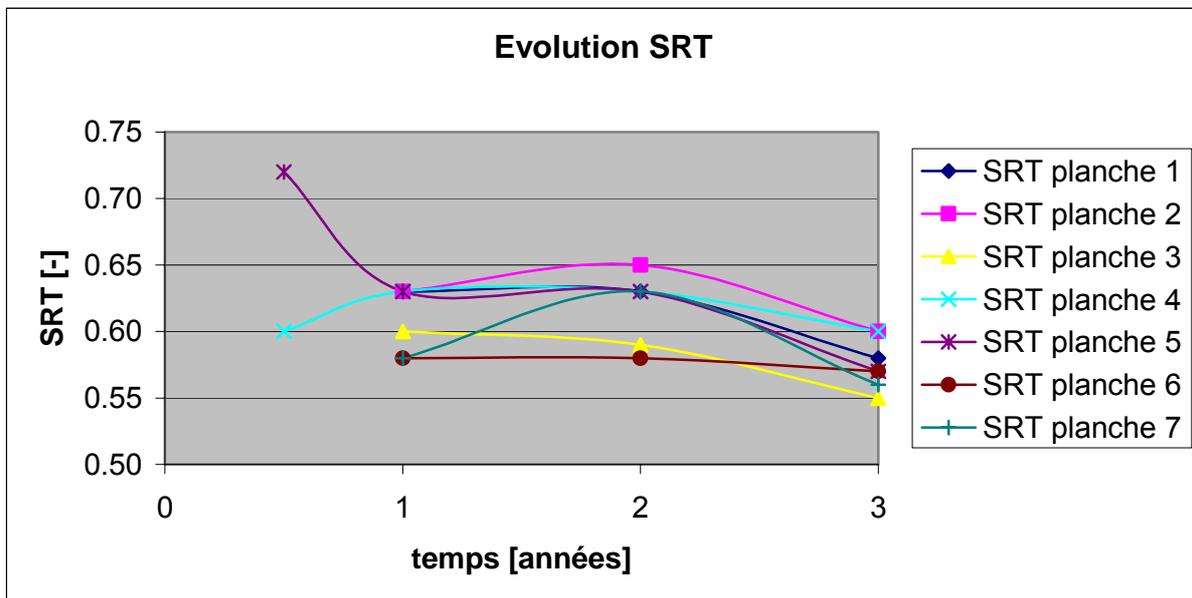


Figure : Evolution temporelle du SRT sur la A75

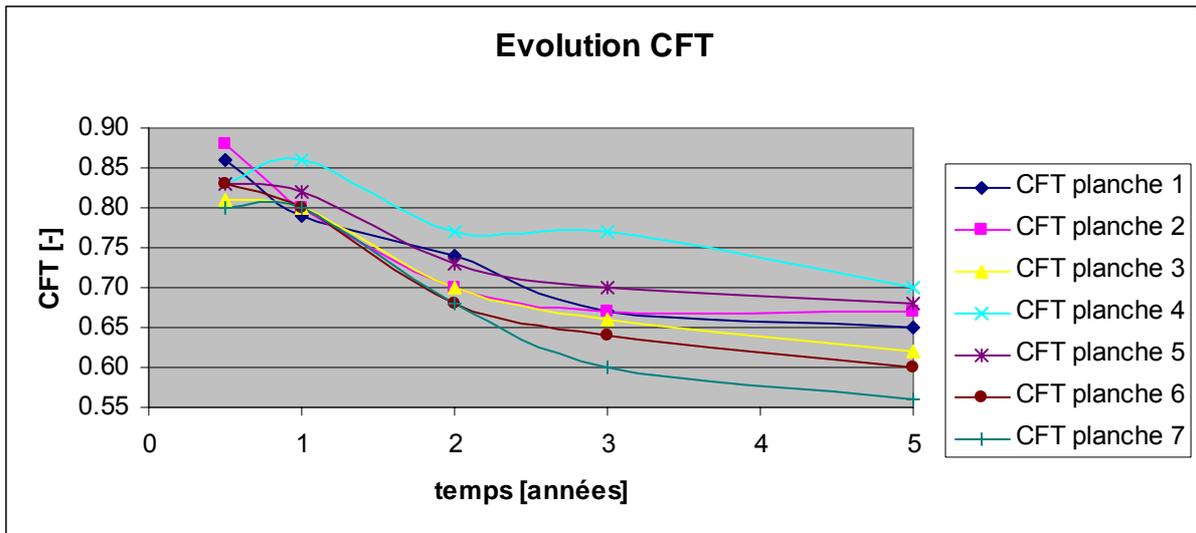


Figure : Evolution temporelle du CFT sur la A75

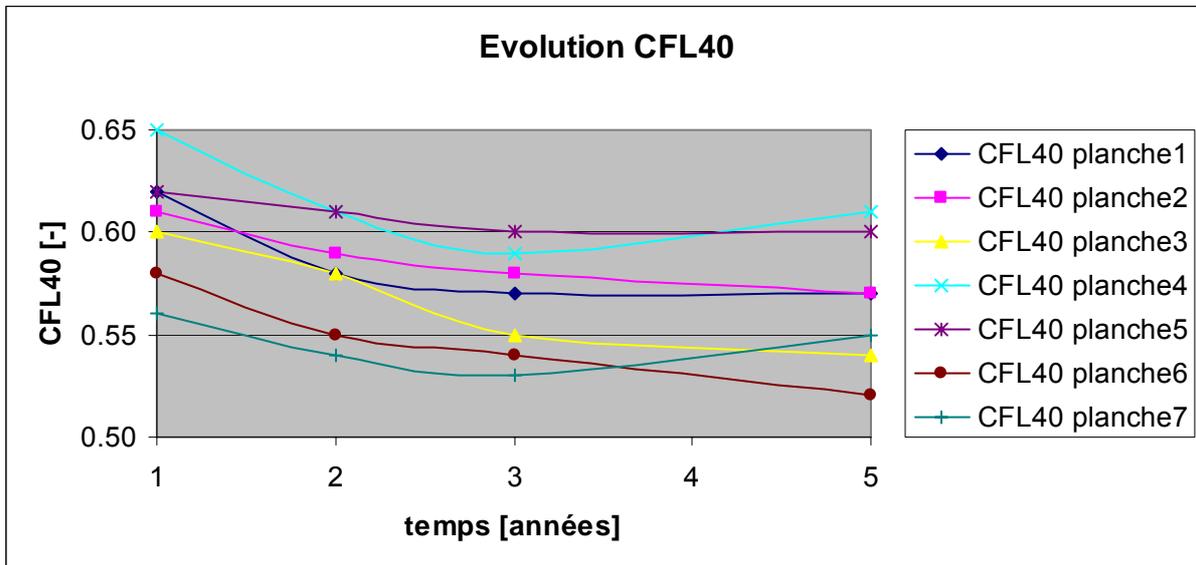


Figure : Evolution temporelle du CFL40 sur la A75

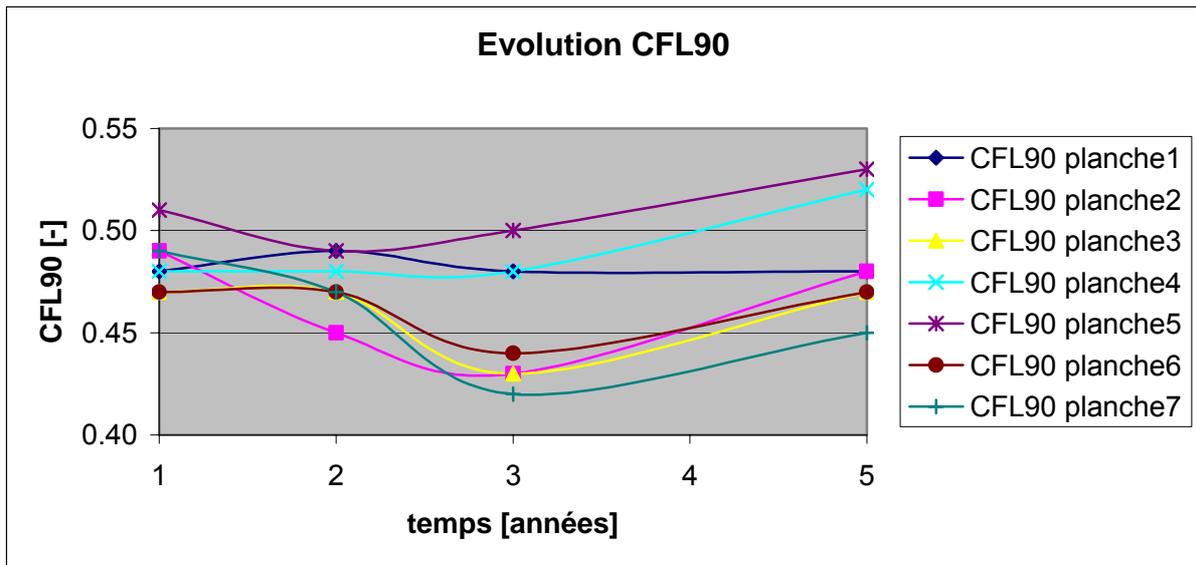


Figure : Evolution temporelle de CFL90 sur la A75

2.8 Conclusions de l'expérimentation

Afin que les conclusions soient explicites, elles sont présentées sous forme de tableaux. On ne rappellera pas les conclusions énoncées au chapitre 2.6 (résultats après 5 ans).

Incidence du calibre D et de la courbe granulométrique

Rappel formules testées					
	BBTM 0/10			BBTM 0/6.3	BBDr 0/10
Discontinuité	2/6.3	continu	4/6.3	2/4	2/6.3
Passant à 2 mm	28 %	30 %	28 %	28 %	14 %
Passant à 4 mm	-	33 %	60 %	45 %	-
Classement vis-à-vis de la texture et de l'adhérence					
HSv jeune âge	Très bon	Bon	Passable	Moyen	Moyen
HSv 2 mios PL	Très bon	Bon	Moyen	Bon	Passable
Frottement	Bon	Bon	Bon	Très bon	Moyen
Domaine préférentiel d'utilisation et solutions techniques					
Site facile	Très bien adapté (1)	Bien adapté	Sans intérêt	Très bien adapté (1)	Adapté (3)
Site difficile ≤ 600 m	Très bien adapté (1)	Adapté	Sans intérêt	Très bien adapté (1)	Non adapté
Site difficile > 600 m	Adapté	Adapté	Bien adapté (2)	Adapté	Non adapté

Tableau 17: Conclusion incidence calibre D et courbe granulométrique. [1modifié]

- (1) Utilisation préférentielle des BBTM 0/6.3 discontinus 2/4 en site urbain ou périurbain (excepté 2 x 3 voies) par rapport aux BBTM 0/10 discontinus 2/6.3.
- (2) Particulièrement intéressant pour des sites soumis à des conditions hivernales difficiles.
- (3) Adapté pour des sites à virages de rayons $R > 600$ m et non soumis à des conditions hivernales difficiles. Pour les rayons $R < 600$ m, les formules de type BBM ou BBSG à faible pourcentage de vide et à forte macrotecture seront préférées.
- (4) Adapté pour des sites à virages de rayons $R > 250$ m et non soumis à des conditions hivernales difficiles.

Effet des caractéristiques intrinsèques normalisées des granulats

Le film de liant superficiel est considéré décapé après le passage d'au moins 200'000 PL (dans ce cas) et c'est seulement à partir de ce moment que les caractéristiques intrinsèques des granulats commencent à jouer leur rôle.

Rappel des types de grains utilisés				
	Nature pétrographique	LA	MDE	CPA
A	Amphibolite	20	14	0.50
B	Tuf rhyolitique	12	5	0.51
C	Granite feuilleté à deux micas (grain moyen)	25	15	0.58
D	Séricitoschiste	20	25	0.59
E	Microdiorite	12	10	0.50
G	Granite (grain fin)	20	9	0.54
H	Basalte	12	18	0.51

Tableau 18 : Tableau récapitulatif des types de grains utilisés.

On retiendra entre autre de cette expérimentation que :

- > D'excellents *LA* ou *MDE* n'ont parfois aucune influence (B vs E) sur le niveau d'adhérence et parfois une influence réelle (G vs H).
- > Un bon *CPA* implique une augmentation en *CFT* et *CFL* sur un site donné et quel que soit le type d'enrobé bitumineux (C+D vs A+B). Il n'est pas possible de comparer deux sites de nature différente car il existe des incohérences entre les niveaux d'adhérence.
- > Les spécifications françaises concernant les propriétés intrinsèques des granulats se trouvent vérifiées.

D'autres caractéristiques propres aux granulats encore inconnues à ce jour pourraient avoir une forte influence sur le niveau d'adhérence comme par exemple les propriétés physico-chimique et en particulier la tension-activité superficielle. Ceci appartient quelque soit leur influence au domaine de la recherche. Les conclusions de cette expérience sont cependant les suivantes :

- > Bonne observation de l'influence du calibre D et de la courbe granulométrique sur la texture et l'adhérence.
- > Observation mitigée de l'effet des caractéristiques intrinsèques des granulats sur l'adhérence.
- > Il existerait une certaine compensation entre la formule et la résistance au polissage des granulats. Une optimisation serait donc techniquement bénéfique en fonction du site et du trafic.
- > Un fort *CPA* ne se concrétise pas forcément par un niveau d'adhérence plus élevé.

Rappel formules testées					
	BBTM 0/10			BBTM 0/6.3	BBDr 0/10
Discontinuité	2/6.3	continu	4/6.3	2/4	2/6.3
Passant à 2 mm	28 %	30 %	28 %	28 %	14 %
Passant à 4 mm	-	33 %	60 %	45 %	-
Classement vis-à-vis des caractéristiques intrinsèques					
LA	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Passable
MDE	Moyen	Moyen	Moyen	Bon	Moyen
CPA	Moyen	Passable	Moyen	Passable	Bon

Tableau 19: Lien formules testées et caractéristiques des granulats requis.

3. FRANCE : OPTIMISATION GRANULATS – ADHERENCE

3.1 Type d'expérimentation

Les couches de roulement récentes comme les bétons bitumineux 0/10 à forte discontinuité engendrent des déséquilibres au niveau de la production des granulats. En effet, les carrières observent actuellement un accroissement de leur stock pour certaines classes granulaires.

L'idée directrice de cette expérimentation est de réduire les déséquilibres liés à la production des granulats par le biais de solutions techniques réalistes intégrant le plein emploi de ces granulats.

Les lieux de cette expérimentation sont la RN 148 en Vendée et la RN 7 dans l'Allier.

3.2 La RN 148 en Vendée

Programme et objectifs

Une série de neuf planches expérimentales a été mise en œuvre en automne 1994. Cette série fait l'objet d'un programme complémentaire à celui intitulé « planches expérimentales adhérence – granulats » décrit précédemment puisqu'il traite du même sujet. L'objectif est cependant différent puisqu'il est de *confirmer et de hiérarchiser les principaux paramètres intervenant dans la formulation des enrobés exerçant un effet sur l'adhérence en recherchant un optimum (interaction) entre les facteurs de macrotecture et de microtecture qui conditionnent l'offre d'adhérence d'un revêtement routier.*

Résultats après 3 ans

- Effet du calibre D

Il a été testé sur des BBDr 0/6, 0/10, 0/14. Le BBDr 0/6 est le plus performant en matière d'adhérence (*CFL* 40, *CFL* 90, *CFT* et *SRT*) et perméabilité (vitesse de percolation). Le graphique suivant (le seul disponible) montre l'évolution de *CFL* 40 en fonction du diamètre maximal *D*.

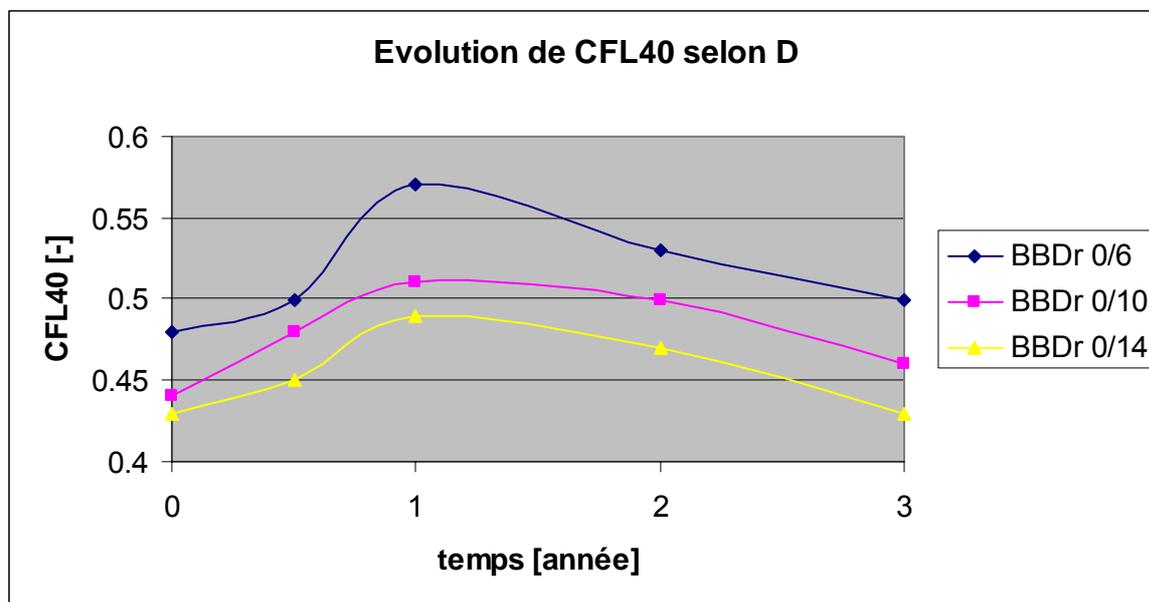


Figure 4: Evolution du CFL40 en fonction du temps

- *Effet du pourcentage de gravillons dans un enrobé 0/10*

Il a été testé sur cinq bétons bitumineux. Les diverses compositions ainsi que les résultats après trois ans sont placés dans le tableau suivant :

Formule	BBSG	BBTM continu	BBTM type 1	BBTM type 2	BBDr
2/6 [%]	27	28	9	10	11
6/10 [%]	36	56	64	75	76
<i>HSv</i> [mm]	0.5	1.0	0.9	1.5	-
<i>CFL</i> 40	0.39	0.48	0.47	0.46	0.47
<i>CFL</i> 90	0.16	0.35	0.32	0.36	0.38
<i>CFT</i>	0.45	0.59	0.54	0.55	0.57

Tableau 20: Tableau récapitulatif des formules et des résultats après 3 ans.

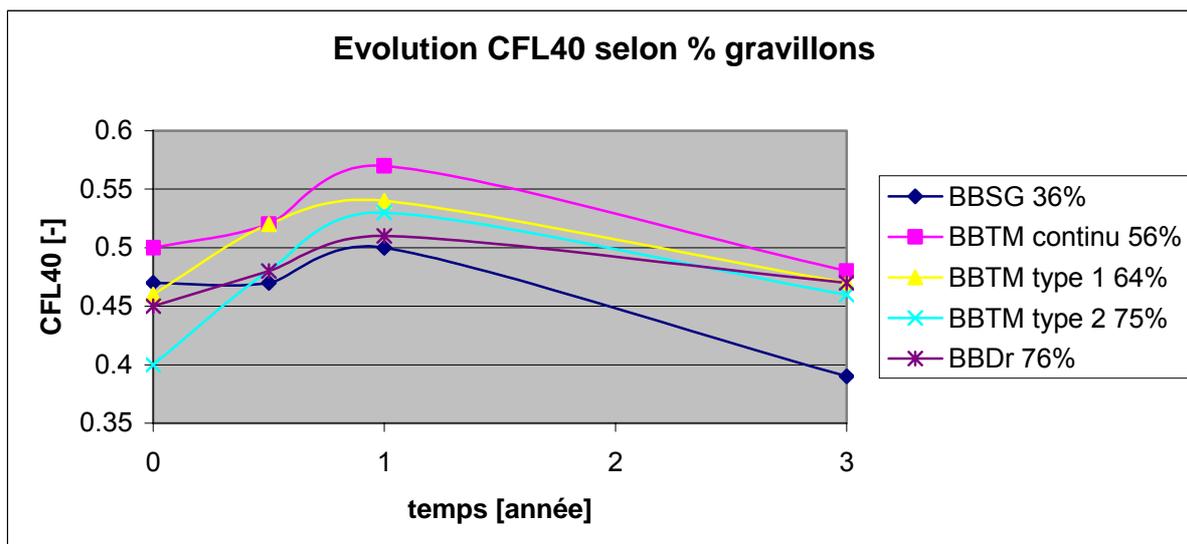


Figure 5: Evolution du CFL40 en fonction du temps selon le pourcentage de gravillons

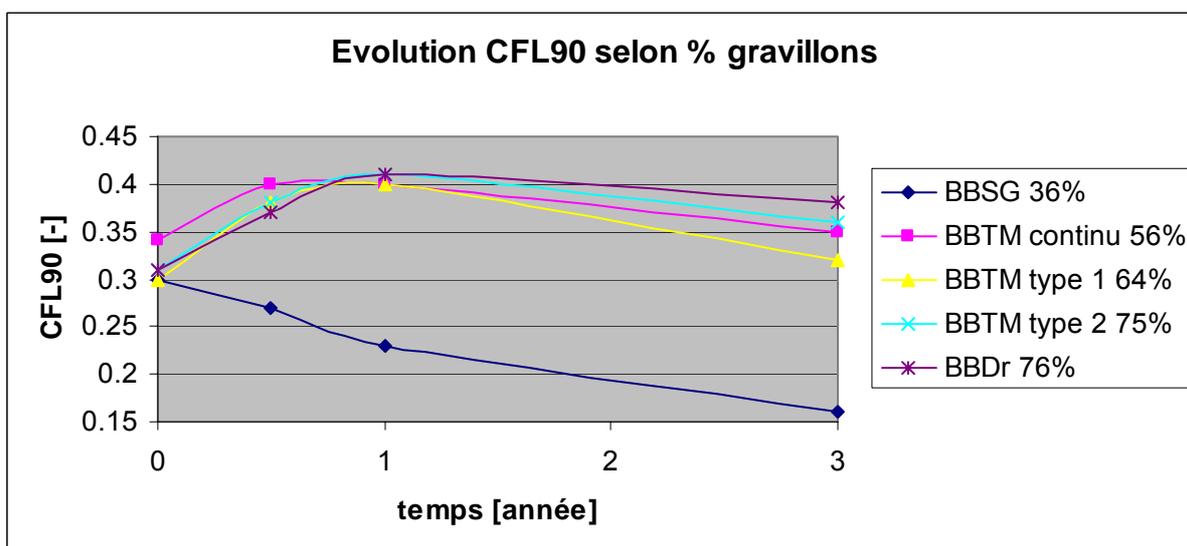


Figure 6: Evolution du CFL90 en fonction du temps selon le pourcentage de gravillons

Les valeurs *CFL* obtenues pour les BBTM et le BBDr sont bonnes (milieu du fuseau selon les normes françaises). Elles sont par contre médiocres pour le BBSG. On retiendra qu'après trois ans de circulation (1.1 million de PL), le BBTM continu a un comportement très satisfaisant, sa macrotexture est au moins aussi bonne qu'un BBTM type 1 et ses performances en adhérence sont globalement les meilleures.

- Formule mixte éruptif/calcaire

Rappelons tout d'abord que les formules mixtes (gravillons à bon *CPA* et sable calcaire 0/2 ou 0/4) sont déconseillées ou interdites en Allemagne et en Grande-Bretagne. Les formules testées dans cette étude sont un BBSG 0/10 entièrement constitué de granulats dioritiques (ici *CPA* = 0.50) et un BBSG 0/10 constitué d'une fraction sableuse 0/4 mm calcaire (ici *CPA* = 0.39). L'usage d'un tel type de formule pénalise les valeurs *CFT* et *CFL* 40 de manière sensible (voir graphiques suivants).

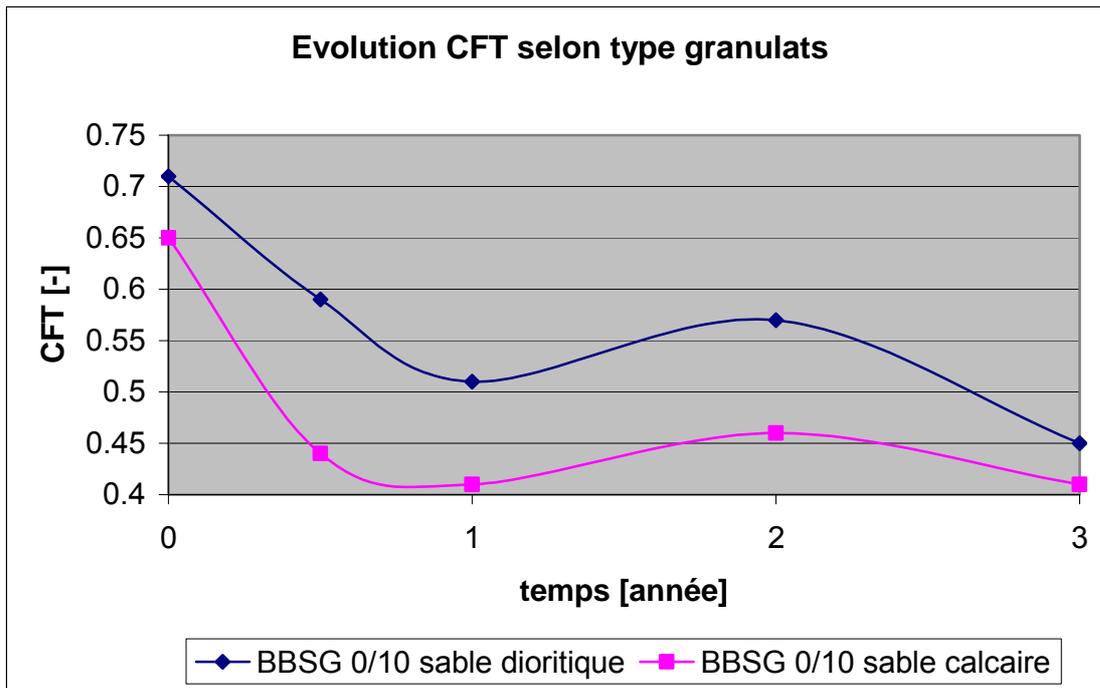


Figure 7: Evolution du CFT en fonction du temps selon le type de granulats

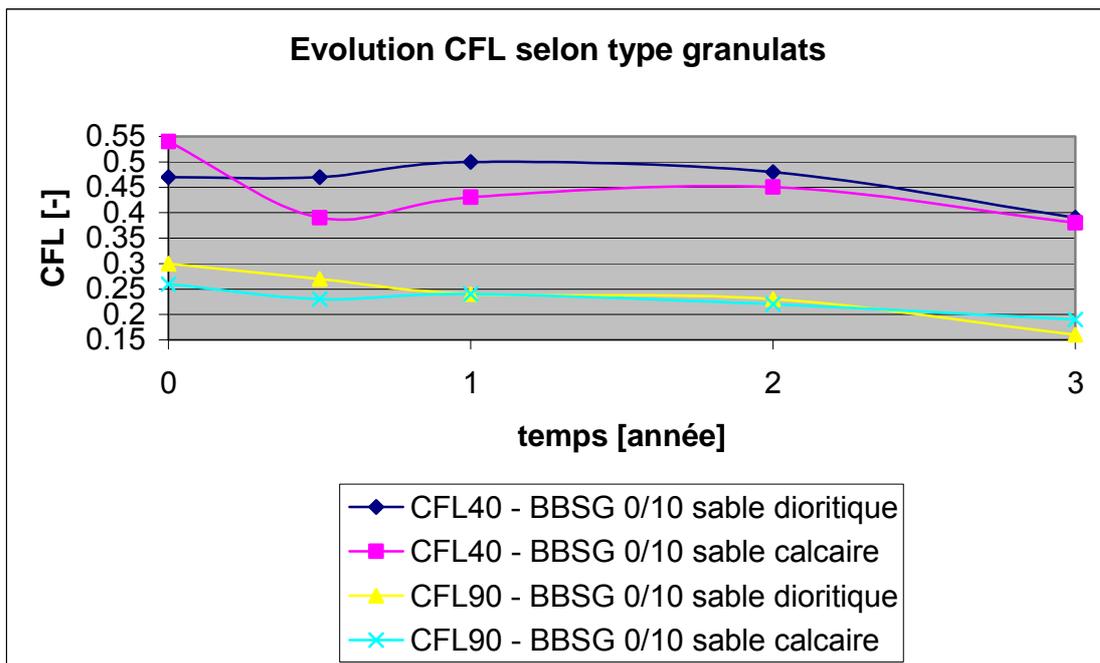


Figure 8: Evolution du CFL en fonction du temps selon le type de granulats

- *Conclusion provisoire*

L'emploi de formules telles les BBDr 0/6 ou les BBTM continus ne peut être qu'enthousiasmant puisqu'elles conduisent à d'excellentes performances et contribuent au rééquilibrage offre-demande des carrières à vocation routière !

3.3 La RN 7 dans l'allier

Programme et objectif

Les formules testées correspondent à trois formules conventionnelles (en jaune) et à trois formules tests.

Composition moyenne						
Granulométrie	0/10		0/8	0/6	0/14	
Discontinuité	2/6	4/6	2/4		2/6	2/4 et 6/10
10/14 [%]	-	-	-	-	48.5	53.5
6/10 [%]	68	32	20	-	15	-
4/6 [%]	-	-	40	68	-	10
2/4 [%]	-	40	-	-	-	-
0/2 conc. [%]	28	23	35	28	33	33
Fines d'apport [%]	4	5	5	4	3.5	3.5
Bitume modifié [%]	5.8	5.8	6.0	6.2	5.8	5.8

Tableau 21: Formules testées – composition moyenne théorique.

Tamis [mm]	Granularité des BBTM					
14	-	-	-	-	94	94
10	91	96	97	-	56	54
6	38	71	73	86	39	45
4	33	63	45	40	37	38
2	31	30	38	31	35	35
0.08	7.5	7.6	9.2	7.5	7.7	7.7

Tableau 22: Formules testées – composition effective.

Les caractéristiques des granulats utilisés sont les suivants :

Caractéristique des granulats					
Nature pétrographique	6/10				0/2
	CPA	LA	MDE	A	PS
Tuf rhyolitique	0.51	12	5	10	62

Tableau 23 : Caractéristiques des granulats entrant dans la composition des enrobés.

L'objectif de cette étude est aussi de rechercher des formulations permettant le plein emploi des granulats d'une part et de répondre aux exigences routières requises par des conditions hivernales rigoureuses d'autre part. La comparaison s'effectuera donc essentiellement au niveau des indicateurs de la glissance.

Résultats après 2 ans

Les résultats obtenus ne permettent pas de s'énoncer sur une éventuelle comparaison objective. Il faut donc patienter jusqu'à la prochaine publication (sortie ??).

4. FRANCE : NIVEAU D'ADHERENCE ET DE DURABILITE DES ENROBES 0/8

4.1 Type d'expérimentation

Cette étude réalisée en automne 1996 sur l'autoroute A75 dans le Puy-de-Dôme consiste à apprécier au cours du temps le compromis macrotecture – microtexture obtenu avec des enrobés très minces de granularité 0/8 mm. Rappelons que les enrobés très minces couramment utilisés en France contiennent une classe granulométrique 0/6 ou 0/10.

4.2 Programme et objectifs

Trois formules 0/8 ont été testées ainsi que deux formules classiques. Ces formules sont résumées dans le tableau suivant :

Granulométrie					
Tamis [mm]	BBTM 0/8	SMA TM 0/8	SMA UM 0/8	BBTM 0/6	BBTM 0/10
0.08	7.5	7.9	5.8	7.3	7.0
2	29	30	17	30	29
4	31	36	24	45	31
6.3	81	82	?	93	41
8	92	92	95	100	65

10	100	100	100	-	91
Liant Colflex N	-	-	-	6.2	5.7
Liant Colflex S	6.0	7.0	5.6	-	-

Tableau 24: Granulométrie des formules testées.

L'origine des matériaux est identique pour les différentes formules :

- Classes 0/2 et 2/4 : tuf ryolitique.
- Classes 4/6 et 6/10 : basalte ($LA = 15$, $MDE = 18$ et $CPA = 0.51$).

Après le passage d'un million de PL, les valeurs mesurées seront HS_v , CFL40 et CFL90.

4.3 Résultats

Macrotexture

Le niveau initial des HS_v est conservé pour toutes les formulations 0/8. Les meilleures valeurs sont obtenues pour le SMA UM 0/8 (faible portion de sable).

Le SMA TM 0/8 et le BBTM 0/6 ont des valeurs HS_v voisines.

Le BBTM 0/8 observe une valeur HS_v intermédiaire située entre celles du BBTM 0/6 et du BBTM 0/10, mais plus proche de ces dernières.

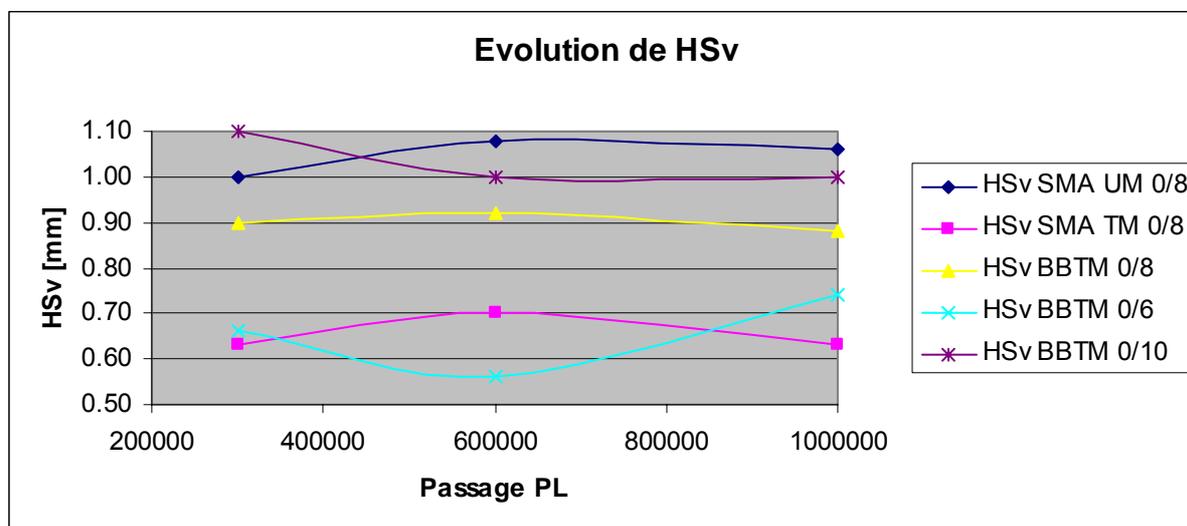


Figure 9: Evolution de la hauteur de sable vraie en fonction du trafic

Microtexture

Les CFL40 sont identiques pour les trois formulations 0/8 et sont de niveau très acceptables. Ces valeurs sont très voisines des BBTM 0/6 et BBTM 0/10.

Les valeurs CFL90 sont très bons pour les trois formulations 0/8 mais sont inférieures aux valeurs observées sur les BBTM 0/6 et BBTM 0/10.

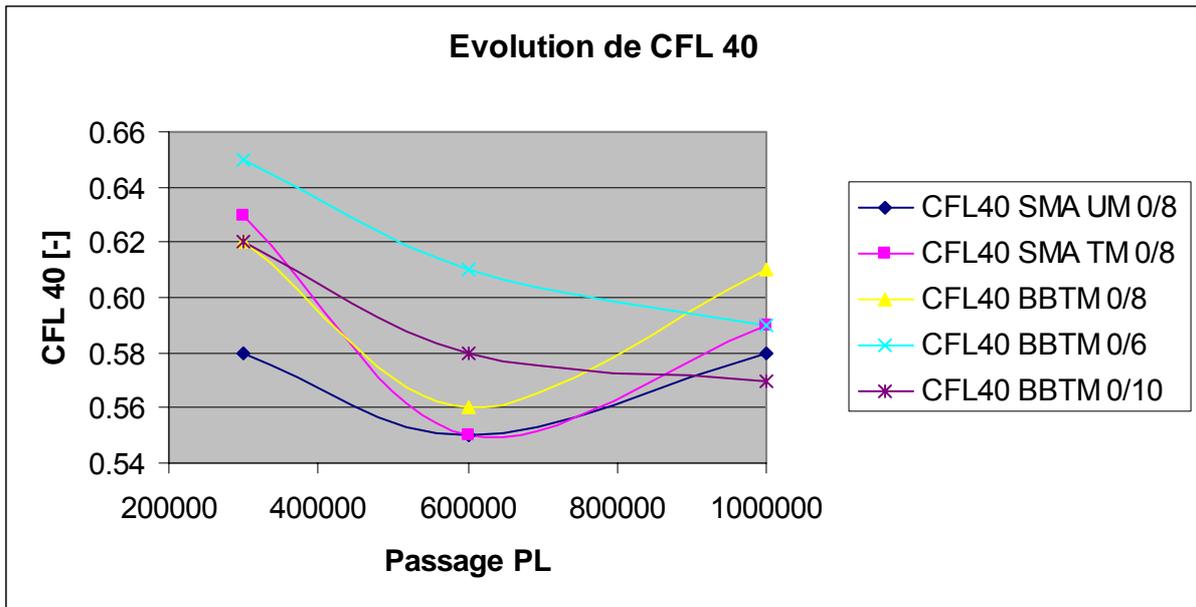


Figure 10: Evolution du CFL40 en fonction du trafic lourd

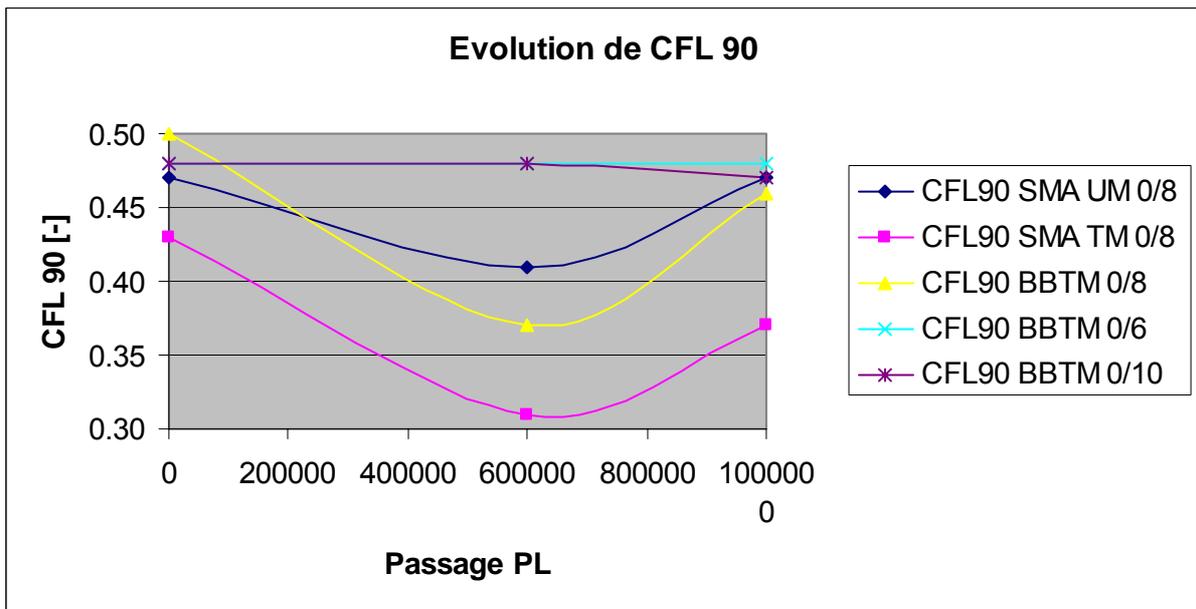


Figure 11: Evolution du CFL90 en fonction du trafic lourd

4.4 Conclusion

Le calibre D = 8 mm semble en effet être un bon compromis entre 6 et 10 mm. Les fibres cellulosiques ajoutés aux SMA TM 0/8 et SMA UM 0/8 (5 % de la masse) permettent d'obtenir et conserver dans le temps une adhérence satisfaisante sur une chaussée soumises à des conditions hivernales sévères.

5. FRANCE – PERFORMANCES D'ADHÉRENCE DES REVÊTEMENTS SUR LES CHAUSSEES FRANÇAISES

5.1 Présentation du fichier CARAT

Il existe en France une base de données nommée *CARAT* qui indique pour les différents types de couches de roulement et une section donnée les performances en adhérence (CFL40, 80 et 120) et en macrotexture. La provenance, la nature et le CPA des granulats sont naturellement aussi visibles. L'alimentation en information de ce fichier se base sur les mesures de glissance effectuée par le laboratoire des Ponts et Chaussées par le biais de la remorque *ADHERA*.

Ce chapitre présente un tableau regroupant le niveau d'adhérence moyen observé sur les différents types de chaussées pour les classes de trafic C2 (< 20000 PL), C3 (< 1000000 PL) et C4 (< 5000000 PL). Une idée sur l'évolution de l'adhérence au cours de temps est ainsi possible.

Niveau d'adhérence moyen des revêtements usuels ·100													
CFL	Trafic	BBSG		BBM		BBTM			BBUM		BBDr		
		0/10	0/14	0/10	0/14	0/6	0/10	0/14	0/6	0/10	0/6	0/10	0/14
CFL 40	C2	50 ₄₀	-	53 ₃₀	-	-	54 ₈₅	-	-	53 ₇₂	-	50 ₅₀	-
	C3	47 ₁₁₁	50 ₆₅	49 ₃₀	43 ₂₁	58 ₁₉	51 ₁₂₅	47 ₁₁₉	53 ₂₀	51 ₈ ⁵	51 ₁₄	52 ₆₄	52 ₄₆
	C4	42 ₄₄	-	47 ₃₀	-	-	47 ₇₆	-	-	47 ₃₅	-	49 ₃₃	-
CFL 80	C2	31 ₄₀	-	39 ₃₀	-	-	39 ₈₅	-	-	43 ₇₂	-	42 ₅₀	-
	C3	26 ₁₁₁	33 ₆₅	38 ₃₀	28 ₂₁	48 ₁₉	39 ₁₂₅	33 ₁₁₉	43 ₂₀	42 ₈₅	47 ₁₄	44 ₆₄	43 ₄₆
	C4	25 ₄₄	-	31 ₃₀	-	-	34 ₇₆	-	-	38 ₃₅	-	41 ₃₃	-
CFL 120	C2	22 ₄₀	-	33 ₃₀	-	-	34 ₈₅	-	-	40 ₇₂	-	39 ₅₀	-
	C3	19 ₁₁₁	27 ₆₅	32 ₃₀	22 ₂₁	44 ₁₉	32 ₁₂₅	32 ₁₁₉	39 ₂₀	38 ₈₅	43 ₁₄	41 ₆₄	40 ₄₆
	C4	19 ₄₄	-	25 ₃₀	-	-	27 ₈₅	-	-	35 ₃₅	-	38 ₃₃	-

Figure 25: Valeurs moyennes des CFL observées sur différentes chaussées.

Les chiffres en rouge correspondent au nombre d'échantillons à partir duquel la moyenne a été calculée. Les valeurs manquantes existent dans le fichier CARAT, mais n'étaient pas présentes dans la littérature.

5.2 Influence de la composition du matériau sur l'adhérence

Effet du calibre :

Les revêtements tels les BBTM, les BBUM et les BBDr présentent une adhérence croissante avec une diminution du calibre D pour autant que la résistance au polissage des granulats soit similaire.

Effet du pourcentage de sable :

Le pourcentage moyen de sable rencontré dans un BBSG, BBM, BBTM, BBUM et BBDr est respectivement de 33, 30, 25, 20 et 12%. L'augmentation de la fraction sableuse jusqu'à 30% amène une diminution régulière de *CFL*, puis une diminution brutale.

5.3 Influence du trafic sur l'adhérence

Le niveau d'adhérence diminue en général avec l'augmentation du trafic cumulé. Il est cependant délicat d'émettre un avis objectif à partir des valeurs du tableau ci-dessus étant donné que toutes les classes de trafic ne sont pas présentes. On constate néanmoins que le niveau d'adhérence ne diminue pas obligatoirement avec l'augmentation du trafic (BBDr – *CFL* 40).

6. OFFRE EN GRANULATS – ASPECT POLITICO ECONOMIQUE

En France, la majorité des carrières fournissent des granulats de catégorie B, donc moyenne. Après une brève enquête de l'offre en granulats en terme de caractéristiques intrinsèques, on constate que le seuil de 0.50 pour le *CPA* marque une frontière. En effet, le nombre de carrières pouvant fournir des granulats dont le *CPA* > 0.50 diminue fortement. Il serait donc nécessaire d'optimiser dans certains cas une formulation contenant des granulats avec certaines propriétés peut-être moins élevées afin d'utiliser au mieux les ressources disponibles. Il est important de ne pas se focaliser sur les meilleurs matériaux alors que d'autres *a priori* moins bons peuvent répondre aux mêmes exigences requises pour un site précis et un trafic particulier.

Ces propos sont naturellement aussi valables pour les autres pays. Pour les grands pays tels l'Allemagne ou la France, en plus du fait que le nombre des excellentes carrières est faible, ces dernières sont généralement situées dans une même région. Il peut donc exister une inégalité de traitement entre les différentes régions.

E. ETUDE D'UNE RELATION ENTRE ADHERENCE ET ACCIDENT

1. INTRODUCTION GENERALE

Un accident de la route est rarement imputable à un seul facteur. Les spécialistes de l'accidentologie soutiennent l'idée que le comportement de l'automobiliste est prépondérant alors que les ingénieurs routiers défendent le fait qu'une bonne adhérence sur chaussée humide est très importante.

Il est certain que le comportement de l'utilisateur de la route est un facteur essentiel à la création d'un accident. Il faut cependant aussi mentionner le niveau de l'adhérence du revêtement n'est pas visible et qu'un usager raisonnable pourra toujours s'attendre à perdre la maîtrise de son véhicule dans certaines situations. Il existe donc ici une contradiction avec le code de la route qui indique qu'un automobiliste doit en permanence adapter sa vitesse en fonction des conditions rencontrées.

Il est donc nécessaire que la couche de roulement d'une structure routière garantisse une adhérence suffisante sur une certaine période afin de contribuer par des mesures techniques à la sécurité routière.

2. FRANCE : ETUDE SUR LIEN ADHERENCE – TAUX D'ACCIDENTS

Le laboratoire central des ponts et chaussées a conduit plusieurs études au cours des années 90 sur des cas concrets afin d'analyser l'influence de l'adhérence sur la sécurité. Trois de ces études se basent sur des conditions de tracé et de circulation différentes : une rocade d'une grande métropole régionale, un ensemble de sections de routes nationales et une section d'une route nationale comprenant un tracé particulièrement délicat.

2.1 Rocade d'une métropole régionale

Cette route de deux fois deux voies de 35 km de long observe un trafic moyen de 38000 véhicules par jour et par sens de circulation en 1992. La vitesse est limitée à 110 km/h et un fort trafic de poids lourds existe.

Le taux d'accident est donné par la formule suivante :

$$\tau_{acc} = \frac{n_{acc}}{n_{veh} \cdot \Delta t \cdot L} \cdot 10^8 \quad \text{avec :}$$

τ_{acc} : nombre d'accidents moyen par kilomètre et par véhicule observé sur une section de route, multiplié par 10^8 .

n_{acc} : nombre d'accidents pendant la période d'observation.

Δt : durée de la période d'observation en jours.

n_{veh} : nombre de véhicules quotidien (moyenne annuelle) [véh/jour/sens]

L : longueur de la chaussée étudiée [km]

L'analyse des mesures de frottements effectuées entre 1990 et 1994 a montré que les *CFL* (via ADHERA) ont évolués de la manière suivante :

		BBDr	BBTM	Autres
Janvier 1990	CFL 40	0.34 – 0.43		
	CFL 110	0.13 – 0.32		
Juin 1994	CFL 40	Diminution de 0.09	Diminution de 0.19	-
	CFL 110	Diminution de 0.06	Diminution de 0.07	-

Figure 12: Evolution des CFL entre 1990 et 1994.

Une augmentation des valeurs initiales est perçue lors des six premiers mois grâce au décapage du film de liant.

Les valeurs CFT (via SCRIM) alors comprises entre 0.45 et 0.65 après les travaux (janvier 1990) diminuaient en moyenne de 0.08 trois années plus tard quel que soit le type d'enrobé.

L'article mentionne le fait qu'en dehors de toute évolution structurelle, la microtexture d'un revêtement semble évoluer plus vite sous trafic que sa macrotexture.

La période d'observation s'étale entre 1985 et 1994 et compte 82 accidents pour 130 km. Les accidents comptabilisés sont ceux qui ont eu lieu sur chaussée mouillée et avec dommage corporel. Les résultats sont visibles sur le graphique suivant :

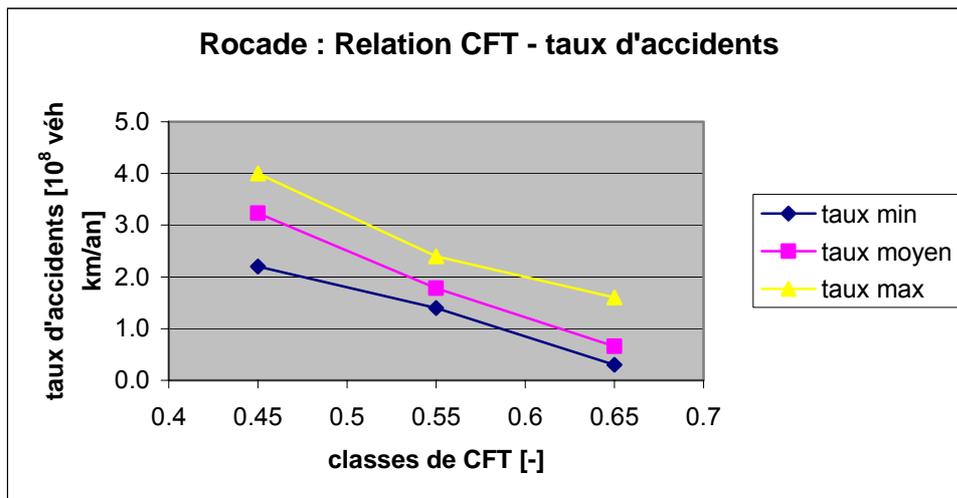


Figure 13: Relation CFT – taux d'accidents pour la rocade (130 km, 82 accidents).

Etant donné le volume de trafic, on peut imaginer qu'un défaut d'adhérence est un élément parmi d'autres à la cause d'un accident. Il serait intéressant de connaître le nombre d'accidents sur chaussée sèche et aussi les heures auxquelles sont survenus ces accidents (les heures de pointes observent certainement un part importante de ces accidents).

2.2 Réseau de routes nationales dans la région Rhône-Alpes

Quatre itinéraires importants pour un total de 215 km ont été étudiés. Chacun de ces itinéraires supporte un trafic d'environ 10000 véhicules/jour et a observé 201 accidents corporels sur chaussée mouillée sur une période de 4 ½ années. Les tronçons ont été

découpés en segments de 100 m de long caractérisés par la plus faible des valeurs *CFT* (via *SCRIM*) et *HSc* (via *RUGOLASER*).

Les résultats de cette étude sont visibles sur les deux graphiques suivants :

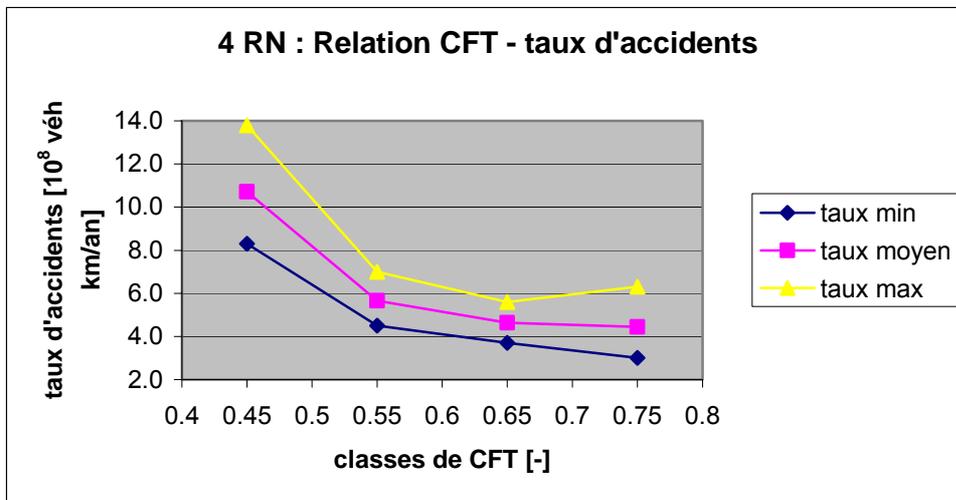


Figure 14: relation *CFT* – taux d'accidents pour les RN région Rhône – Alpes (213 km, 201 accidents).

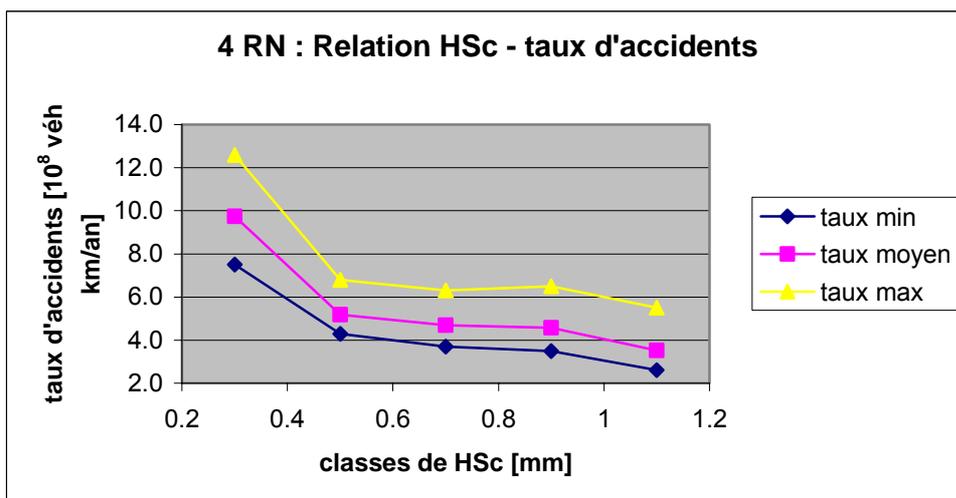


Figure 15: relation *HSc* – taux d'accidents pour les RN région Rhône – Alpes (210 km, 182 accidents).

Ces deux graphes montrent qu'il semble exister un seuil à partir duquel le taux d'accidents augmente de manière significative. Ce se situe entre 0.5 - 0.55 pour *CFT* et entre 0.4 - 0.5 pour *HSc*.

2.3 Route en site difficile

La route étudiée est longue de 13 km et contient deux voies. Le trafic y est de 9000 véhicules/jour dont 20% de poids lourds. L'itinéraire est passablement sinueux avec des virages de rayon de courbure très faible. L'étude a été réalisée entre 1987 et 1993 et les taux d'accidents sur chaussée mouillée ont été calculés pour les segments contenant des rayons de courbure inférieures à 350 m.

Les résultats sont présentés sur les graphiques suivants :

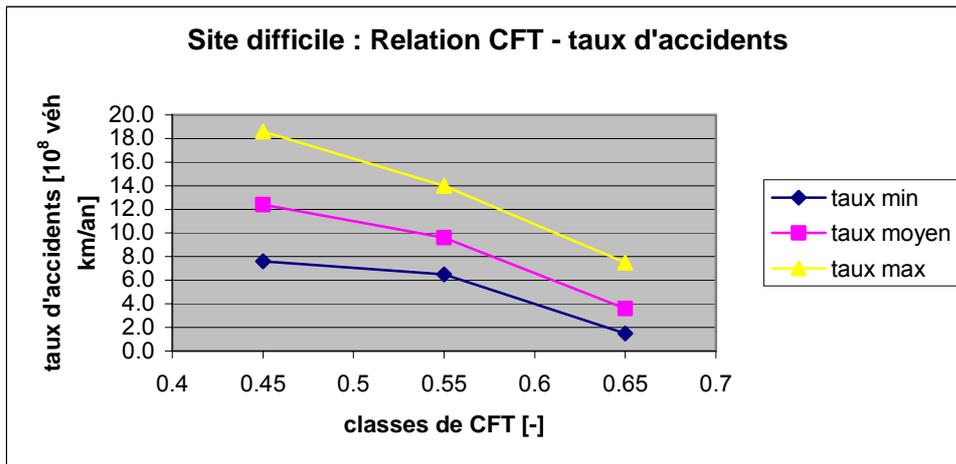


Figure 16: Relation CFT – taux d'accidents pour une route en site difficile (30 km, 41 accidents).

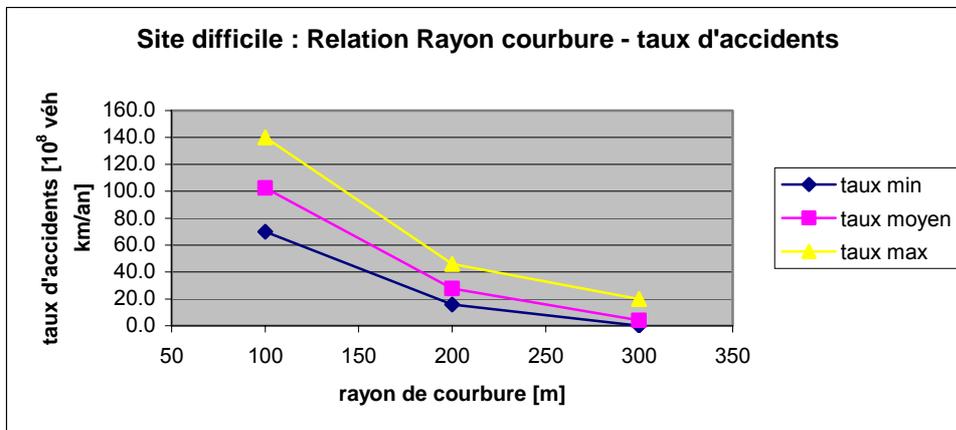


Figure 17: Relation rayon de courbure – taux d'accidents pour une route en site difficile (5.3 km, 38 accidents).

Ces taux sont beaucoup plus élevés que dans les deux premières études. Ceci signifie que les conditions de tracé ont une influence dominante sur la sécurité par rapport aux seules caractéristiques de surface. On constatera aussi qu'un rayon de courbure de 150 – 200 m marque un seuil qui marque une élévation importante du taux d'accidents.

2.4 Conclusion

L'incidence des caractéristiques d'adhérence uniquement sur le taux d'accident est bien entendu complexe à déceler puisque plusieurs facteurs entrent en jeu (*comportement de l'automobiliste, caractéristiques de la chaussée au sens large, conditions du tracé et caractéristiques du véhicule*). On pourrait tenter de séparer les facteurs *conditions du tracé* et *caractéristiques de la chaussée (ici glissance)* en comparant les études sur les RN et sur le site difficile puisque les conditions de trafic sont environ similaires (10000 et 9000 véhicules par jour), mais le manque d'informations (% poids lourds pour les RN et heures des accidents) ne le permet pas.

On retiendra néanmoins que :

Le taux d'accident tend à augmenter lorsque CFT ou HSc diminuent.

L'accroissement de ce taux n'est pas constant mais marque un fléchissement net en deçà de certaines valeurs.

3. ALLEMAGNE : ETUDE SUR LIEN ADHERENCE – ACCIDENT

Une travail de recherche a été effectué sur l'analyse des accidents survenus entre 1996 et 1998 sur les autoroutes de deux régions : Bayern et Nordrhein – Westfalen. Il a été observé premièrement que 30 à 45% des accidents se produisent sur chaussées humides alors que ces dernières existent seulement 10% du temps.

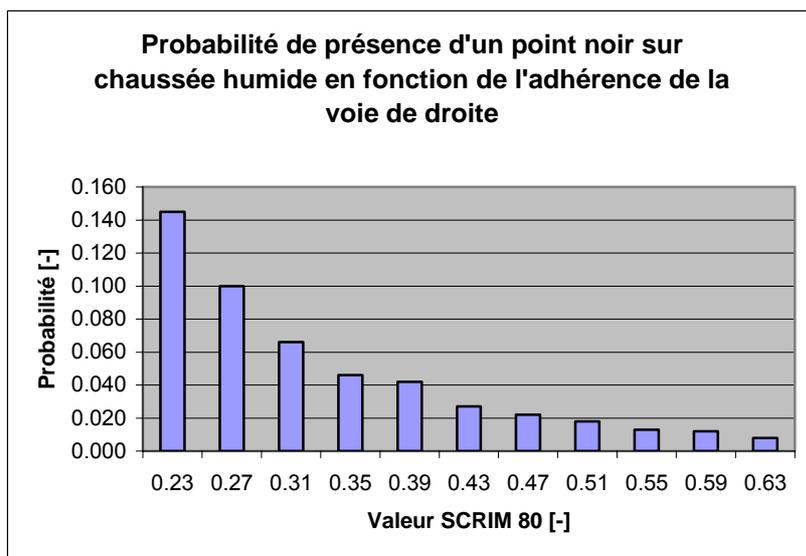


Figure 18: Probabilité de présence d'un point noir sur chaussée humide en fonction de la valeur SCRIM 80 de la voie de droite.

Ce graphique est davantage à prendre qualitativement que quantitativement puisque cette notion de probabilité est délicate. On retiendra donc les éléments suivants :

Le risque de présence d'un point sensible est 5 fois plus faible pour un SCRIM 80 = 0.43 (valeur de garantie en Allemagne¹²) par rapport à un SCRIM 80 = 0.23.

A partir de la valeur de garantie, une augmentation de SCRIM 80 ne diminue que dans une moindre mesure la probabilité de présence d'une zone sensible.

3.1 Allemagne : valeurs seuils de la qualité antidérapante

En Allemagne, la ZVT Asphalt-stB 2001 et la ZTV Béton-StB 2001 (norme ZEB 2001) donnent les différents niveaux de glissance que doivent fournir les chaussées au cours de leur cycle de vie. Les étapes importantes mentionnées dans ces textes sont la réception de l'ouvrage et l'expiration du délai de prescription (Limite de garantie de l'ouvrage).

Les valeurs données par la ZEB sont les suivantes :

¹² La valeur de garantie correspond à la valeur minimale que doit avoir une chaussée humide à l'expiration du délai de prescription.

	<i>SCRIM</i> 40	<i>SCRIM</i> 60	<i>SCRIM</i> 80
Réception	0.60	0.53	0.46
Limite de garantie	0.56	0.50	0.43

Tableau 26: Valeurs *SCRIM* d'après la norme allemande ZEB.

Les valeurs indiquées correspondent à des mesures de *SCRIM* prises tous les 20 m avec une tolérance de 0.03.

Comme le niveau de glissance peut aussi être mesuré par d'autres appareils comme le *SRM*¹³ (CH, A) ou *SRT*¹⁴ le tableau suivant propose une corrélation entre ces deux méthodes.

	Valeurs ZEB			Transformation par calcul			
	<i>SCRIM</i>			<i>SRM</i>			<i>SRT</i>
	40 [km/h]	60 [km/h]	80 [km/h]	40 [km/h]	60 [km/h]	80 [km/h]	
Très bon	0.70	0.63	0.56	0.69	0.60	0.51	67
Cible	0.67	0.60	0.53	0.66	0.57	0.48	65
Bon	0.63	0.56	0.49	0.63	0.54	0.45	62
Satisfaisant	0.56	0.49	0.42	0.57	0.48	0.39	57
Avertissement	0.53	0.46	0.39	0.54	0.45	0.36	55
Non satisfaisant	0.49	0.42	0.35	0.51	0.42	0.33	52
Seuil	0.46	0.39	0.32	0.48	0.39	0.30	50
Insuffisant	0.42	0.35	0.28	0.45	0.36	0.27	47

Tableau 27: Corrélations *SCRIM* – *SRM* et *SCRIM* – *SRT*.

Selon le niveau de glissance observé sur un tronçon de route, la ZEB émet certaines recommandations :

<i>SCRIM</i> 80	Recommandations
-----------------	-----------------

¹³ Stuttgarter Reibungsmesser

¹⁴ Skid Resistance Test

> 0.39	Aucune mesure particulière.
0.32 – 0.39	- Période d'observation du tronçon au niveau de la diminution de la glissance. - Etude appliquée au sujet des cas d'accidents sur chaussée humide.
< 0.32	Appréciation de l'ingénieur sur les aspects suivants : a) Etude appliquée au sujet des cas d'accidents sur chaussée humide. Zone sensible (point noir) : Disposition de mesures réglementaires (signalisation) et/ou introduction de mesures architecturales (resserrement ou chicanes) ou constructives b) Vérification de la dynamique de roulement et le cas échéant prendre des mesures réglementaires, architecturales ou constructives.

Tableau 28: Recommandations de la ZEB en fonction du niveau d'adhérence observé.

4. SUISSE: ETUDE SUR LIEN ADHERENCE ACCIDENT

L'étude sur le lien entre le niveau d'adhérence et la fréquence des accidents a été menée par l'IVT par l'étude de la base de données des accidents et par une campagne de mesure du niveau d'adhérence grâce à leur appareil de mesure du frottement: le skkidomètre. Dans les lignes suivantes nous essayons de faire un rapport de synthèse de cette étude et des principaux enseignements.

Cette étude est divisée en deux parties bien distinctes: l'étude des Routes à Grand Débit et l'étude pilote concernant les routes cantonales ou plus exactement les points noirs du canton de Zürich.

4.1 Les Routes à Grand Débit

Pour les routes à Grand Débit la période d'analyse de la base de données des accidents de la route s'étend sur une période de 5 ans de 1994 à 1998. Sur ces mêmes routes une campagne de mesure de l'adhérence avec l'appareil SRM de l'IVT a été effectuée, couvrant 99% du réseau (mesures prises à 80 km/h et éventuellement à 60 km/h lorsque des vitesses supérieures ne pouvaient être atteintes)

Lors de l'évaluation combinée des données d'accidents et des valeurs d'adhérence mesurées sur le réseau ce qui suit a été analysé:

- Lien entre le taux d'accidents et l'adhérence
- Lien entre le taux d'accidents sur chaussées mouillées et l'adhérence
- Analyse des secteurs critiques avec valeurs d'adhérence inférieure à la valeur seuil proposée par la norme SN 640 511b
- Influence du tracé géométrique et de la topologie de la route sur le taux d'accidents
- Lien entre le taux moyen d'accidents sur route sèche et sur route mouillée et la densité de trafic.

Les principaux résultats sont reproduits ci-après.

Le lien entre la densité de trafic et le nombre d'accidents est remarquable et ce d'autant plus que la croissance des accidents sur chaussée sèche atteint des proportions impressionnantes par rapport aux accidents sur chaussée mouillée. C'est ce que traduit la figure suivante tirée de l'étude:

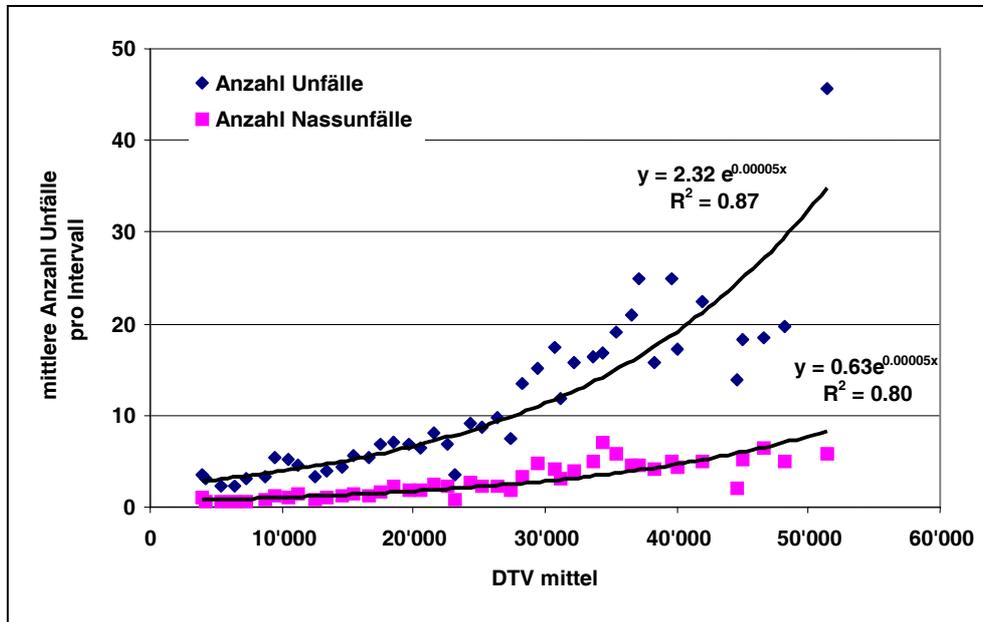


Figure 19: Relation entre le taux moyen d'accidents et le trafic

D'autre part il a également été constaté qu'il n'existe pas de lien direct entre le taux d'accidents et l'adhérence. En effet lors d'un accident une multitude de facteurs entrent en jeu et isoler le rôle de l'adhérence reste très difficile. L'étude a néanmoins souligné que les valeurs seuils pour l'adhérence sur ce type de route fixées par la norme suisse sont encore d'actualité et ne nécessitent pas une révision.

4.2 Etude pilote – routes cantonales

Cette deuxième étude concerne les routes cantonales du canton de Zürich. Dans ces routes une analyse des données d'accidents entre novembre 1997 et octobre 2002 a permis d'obtenir le nombre total d'accidents, le nombre d'accidents sur chaussée sèche et sur chaussée mouillée. De tous les tronçons étudiés ont été sélectionnés ceux ayant des valeurs supérieures à la moyenne dans un de ces domaines. Après cette première sélection on comptait 60 tronçons à risque qui pouvaient être qualifiés de point noirs. Parmi ces 60 tronçons 55 ont fait l'objet de mesures au skkidomètre à 40 km/h (sur les 5 non inclus atteindre cette vitesse n'était pas possible). Finalement sur ces 55 tronçons 44 avaient des données de comptage automatique de trafic.

L'étude des 55 tronçons a été faite de sorte à analyser:

- Le lien entre le nombre d'accidents et l'adhérence
- Le lien entre le nombre d'accidents sur chaussée mouillée et l'adhérence
- L'influence du tracé géométrique et de la topologie de la route sur le nombre d'accidents sur chaussée sèche et chaussée mouillée.

Dans les 44 tronçons où des données de trafic existaient l'étude a voulu analyser les mêmes liens mais en étudiant le taux d'accidents et non le nombre d'accidents. Ces deux

paramètres se différencient dans le sens où le taux d'accident est lié au trafic et permet d'avoir une meilleure appréciation de la fréquence des accidents.

Les résultats obtenus sur l'étude des liens soulignent aussi l'idée qu'il n'existe pas un lien direct entre l'adhérence et le taux d'accidents, que ce soit sur route sèche ou sur route mouillée. Dans la figure ci-dessous on met en évidence la relation entre le taux moyen d'accident et la classe d'adhérence des chaussées. On peut noter qu'il existe une faible corrélation entre ces deux paramètres et donc en conclure que l'étude d'accidentologie ne peut se borner au seul paramètre de l'adhérence.

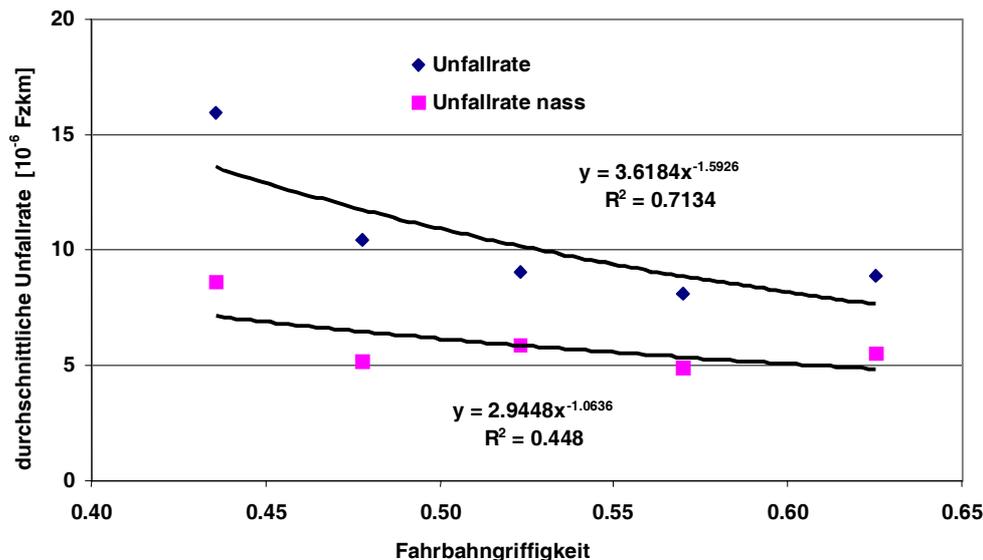


Figure 20: Corrélation entre le taux moyen d'accidents et la classe d'adhérence

L'étude a montré que beaucoup d'autres facteurs que l'adhérence jouent un rôle décisif dans l'apparition d'accidents. Pour essayer de déterminer ces facteurs une étude plus détaillée et surtout avec des tronçons statistiquement plus représentatifs est nécessaire. Néanmoins comme complément à cette étude le LAVOC a voulu faire une analyse cas par cas de ces points noirs pour essayer de faire ressortir des paramètres qui influencent également l'apparition d'accidents.

4.3 Etude complémentaire: cas par cas

En avril 2005 le LAVOC a complété l'étude par une campagne de récolte de données nécessaires et incontournables pour la compréhension et l'identification des paramètres entrant en jeu lors de l'apparition de tout accident. Les 55 tronçons étudiés par l'IVT ont donc fait l'objet d'une récolte d'informations supplémentaires telles que:

- Caractéristiques de la chaussée:
 - o Géométrie
 - o Visibilité/lisibilité
 - o Etat du revêtement
 - o Confort de conduite
 - o Marquage horizontal et vertical
- Les abords de la route

- Présence d'obstacles latéraux
- Type d'obstacles
- Distance des obstacles à la route
- Points singuliers
 - Nouveau revêtement
 - Géométrie modifiée entre temps
 - Remarques particulières dignes d'intérêt
- Aperçu visuel
 - Photo de tous les tronçons

La base de données est donc très importante puisqu'elle regroupe aussi toutes les données concernant les accidents, données fournies par l'IVT. Dans la figure suivante on peut voir de quelle manière a été présentée cette base de données pour faciliter l'étude.

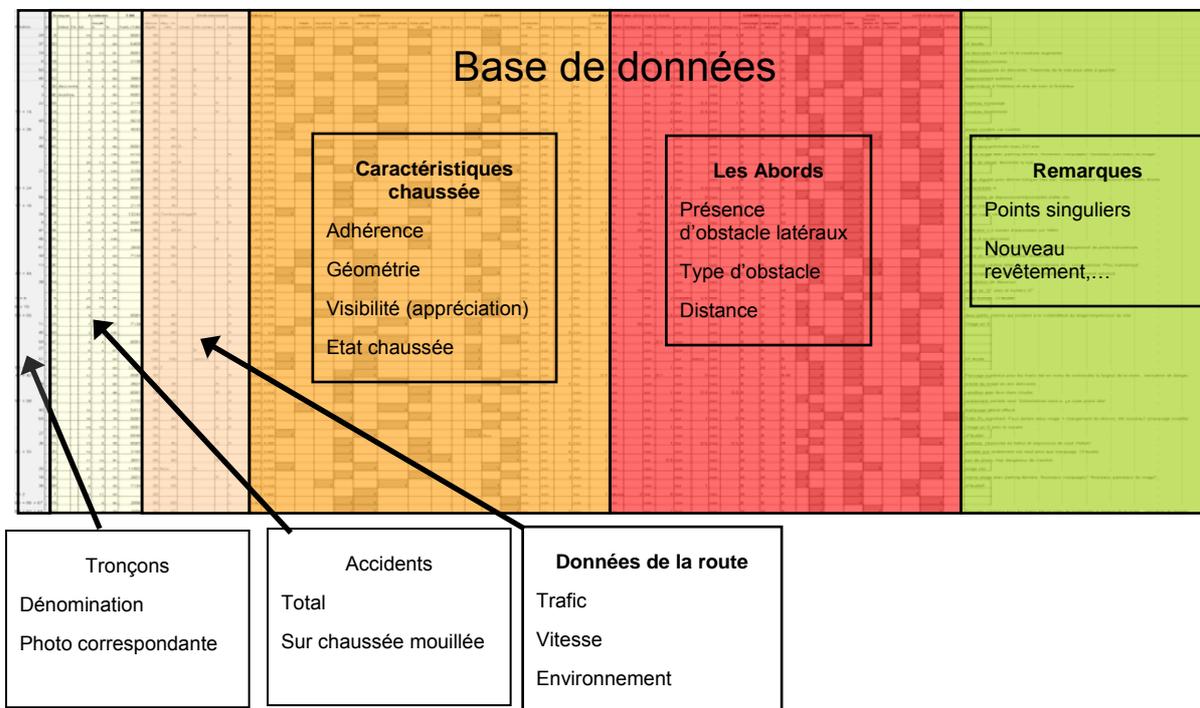


Figure 21: Base de données complémentaire

Avec cette base de données détaillée des tronçons sélectionnés par l'étude menée par l'IVT il a été possible de faire ressortir des cas spécifiques où le rôle de l'adhérence dans l'accident n'est pas un facteur déterminant. L'étude cas par cas a permis de faire ressortir 4 paramètres différents qui ont un rôle important lors de l'apparition d'un accident.

Géométrie et vitesse

Les tronçons 38 et 46 de la base de données correspondent à une même route principale. La route est en pente avec un trafic important et une vitesse élevée (80 km/h). Le tronçon 38 correspond à la descente alors que le tronçon 48 à la montée. Les photos permettent d'avoir un meilleur aperçu de la situation. Dans le sens en montée on peut noter un rétrécissement de la chaussée par un passage d'une route à deux voies à une route à une voie et la voie de descente se termine par des feux de signalisation.

La mesure d'adhérence dans ces deux tronçons a relevés des valeurs moyennes de 0.6 pour les deux tronçons, ce qui correspond à des valeurs bonnes et au-dessus des exigences de la norme [6]. Néanmoins le nombre d'accidents sur route mouillée est de plus de 60% dans les deux cas. Une explication plausible pour expliquer cette valeur est de considérer que la présence des feux au bout de la descente est un facteur qui augmente la sollicitation en adhérence (zone de freinage) surtout à des fortes vitesses. Pour la montée le rétrécissement du nombre de voies est aussi un facteur ayant une importance non négligeable dans l'apparition d'accidents.



Photo 4: Tronçon 38



Photo 5: tronçon 46

Géométrie et visibilité

L'étude détaillée du tronçon 2 montre des valeurs d'adhérence faibles et très proches des valeurs seuils imposées par la norme. Le nombre d'accidents est important avec 60% d'accidents en chaussée mouillée. Ceci est paradoxal car le lien entre adhérence et accidents n'est possible que si la chaussée est mouillée, une perte d'adhérence de la chaussée n'advient qu'en ces conditions car la chaussée sèche assure toujours un niveau d'adhérence convenable. Cependant la géométrie du tronçon et surtout la faible visibilité sous le passage supérieur sont des facteurs à prendre en compte. En effet la configuration même de la route est dangereuse avec la possibilité de tourner à gauche seulement quelques mètres après la sortie du passage inférieur. Plus que l'adhérence il faut souligner ici le rôle prépondérant de la configuration de la route pour l'apparition d'accidents. Les photos, prises de nuit, à l'entrée et à la sortie du passage inférieur montrent cette configuration.



Photo 6: Entrée sous le passage supérieur



Photo 7: Sortie du passage inférieur

Géométrie et adhérence

Le tronçon 56 étudié en détail est un virage avec une très forte courbure et où la vitesse limite est de 80km/h. Cette géométrie difficile est accompagnée d'une chaussée avec des valeurs d'adhérence moyennes voisines de 0.5 au skiddometer. Une donnée importante qui montre toute l'importance de l'adhérence dans ce type de configuration est que la totalité des accidents s'est produit en condition de chaussée mouillée.



Photo 8: Tronçon 56

Comme on peut le voir dans la photo la géométrie de la route "demande" une adhérence importante qui dans notre cas est le facteur prépondérant pour l'apparition d'accident.

Intersection et trafic

Dans cette étude cas par cas les configurations présentant le plus grand nombre d'accidents (chaussée sèche et mouillée) étaient les intersections. Cette remarque est logique puisque ce sont les zones à risque. Ce qui est plus surprenant est que les intersections avec des feux présentent aussi un assez grand nombre d'accidents. Dans la photo suivante on présente l'endroit ayant connu le plus grand nombre d'accident de toute l'étude. Comme on peut le remarquer il s'agit d'une intersection entre une route cantonale et une sortie/entrée d'autoroute. Le nombre élevé d'accidents pourraient s'expliquer par l'importance du trafic et la vitesse aux entrées et sorties d'autoroutes.



Photo 9: Entrée et sortie d'autoroute



Photo 10: route cantonale

Enseignements

Il est important de souligner que le rôle de l'adhérence est différent selon le type de géométrie de la route. Cette étude cas par cas va dans ce sens puisque deux configurations géométriques différentes avec des valeurs d'adhérence très proches ont une répartition entre accidents sur chaussée mouillée et chaussée sèches très différentes. C'est surtout ce paramètre qui est la base pour déterminer l'importance de l'adhérence pour l'apparition d'accidents. Mais il faut garder à l'esprit que cette étude cas par cas associée à l'étude générale menée par l'IVT ne peut répondre à toutes les questions concernant la relation entre adhérence et accidents. Pour pouvoir tenter de répondre il faut avoir une approche différente dès l'apparition de l'accident. En effet ce sont les informations recueillies lors de l'accident et dans les jours qui suivent qui sont fondamentales pour toute analyse. Aussi après cette première expérience sommes nous en mesure de proposer un nouveau cadre d'analyse qui devrait être mis en place lors de l'analyse d'un accident routier.

4.4 Nouveau cadre d'analyse

L'étude adhérence/accidents et l'étude complémentaire ont permis d'avoir un aperçu de la complexité à définir le rôle de l'adhérence dans l'apparition d'un accident. Ce rôle est d'autant plus complexe à déterminer que les informations sont insuffisantes et souvent peu objectives. Pour évaluer le rôle de l'adhérence dans l'apparition d'accident il est important de démarrer avec des informations importantes et, lorsque cela s'avère possible, objectives. Or, les informations plus importantes concernent l'accident et les circonstances de l'accident.

C'est pour cette raison que le relevé de l'accident fait par l'agent de police lors de l'événement a un rôle capital et doit permettre, tout en restant simple, d'obtenir un éventail d'information aussi large que possible.

Grâce à l'expérience acquise dans cette étude il est possible de faire une liste contenant les informations indispensables pour formuler un lien entre l'adhérence et l'apparition d'accident. Ces informations peuvent être vues selon deux angles différents mais complémentaires: le point de vue du gestionnaire de réseau et le point de vue de la sécurité routière.

Gestionnaire de réseau

L'information pour le gestionnaire de réseau concerne tout ce qui a attrait à la route et à son état aussi bien lors de l'accident qu'en règle général. Les informations importantes à noter sont donc:

- v L'identification de l'accident
 - Type d'accident: selon le type d'accident l'adhérence a un rôle plus ou moins marqué
 - Heure de l'accident et conditions climatiques: l'heure de l'accident est un paramètre important puisqu'il permet de savoir s'il s'agit d'une heure de pointe et par conséquent d'une zone temporelle où la probabilité d'apparition d'accident est plus élevé que d'habitude. Elle permet aussi de savoir si l'accident a eu lieu la nuit et couplé avec les conditions climatiques de connaître aussi les conditions exactes de l'accident
 - Point de choc: permet de déterminer s'il s'agit d'une zone à risque ou d'un problème très localisé selon la répartition des points de chocs dans la section.
 - Gravité de l'accident: c'est une information importante puisqu'un point noir avec énormément d'accrochages ne doit pas être traité de la même manière qu'une zone où les accidents sont moins nombreux mais plus graves.
 - Type de véhicule (auto, moto, camion,...): le besoin en adhérence des différents véhicules n'est pas le même d'où l'importance de faire cette identification
- v L'identification de la zone d'accident
 - Délimitation de la zone (avec un intervalle de $\pm 500\text{m}$): l'idée est de déterminer si la zone avant et après le point d'impact n'ont pas un rôle aussi bien dans l'apparition de l'accident que dans la gravité de celui-ci
 - Géométrie de la zone (virage, devers, pente,...): informations de base ayant aussi un rôle important lors de tout accident
 - Obstacles latéraux
 - Type de route
- v Indice de sollicitations (découle de la géométrie de la route)
 - Longitudinale (accélération, décélération, intersection): selon le type de section et de croisement les sollicitations sont plus ou moins marquées.
 - Transversale (virage): définie par le rayon de courbure
- v Défauts infrastructures
 - Mauvais raccordement
 - Défaut devers, visibilité
 - Orniérage évident

- v Caractéristiques de surface
 - Coefficient *SRT*
 - Drainomètre
 - Skidometer

Cette dernière partie est à effectuer dans le mois qui suit l'accident si celui-ci se trouve dans une zone où de nombreux accidents ont déjà été dénombrés. Ceci est possible du fait de la faible variation de ce paramètre dans le temps (pour une échelle temporelle relativement réduite)

Il est important de noter que les informations obtenues lors de l'accident ont une valeur très significative puisqu'elles représentent la vision "instantanée" de l'état de la route et de son environnement lors de l'accident. Toute information obtenue a posteriori n'est qu'une approximation de cet état.

Amélioration de la sécurité

Un autre type de vision de l'accident est celui qui vise à évaluer le niveau de sécurité de la route et/ou des véhicules y circulant.

- v Informations véhicules/conducteurs
 - Type de pneumatiques
 - ABS
 - Expérience, âge, état physique du conducteur
 - Connaissances véhicule
- v Environnement externe
 - Présence d'obstacles "distrayants" (publicité, ...)
- v Facteurs déterminant/aggravants
 - Paramètre déterminant (1 seul)
 - Facteurs aggravants (plusieurs)
- v 2 axes de réflexion possibles
 - Augmenter l'offre d'adhérence: meilleur revêtement, évacuation d'eau,...
 - Diminuer la demande: diminuer les sollicitations

Le facteur déterminant est bien évidemment très difficile à évaluer mais dans ce cas il s'agit d'avoir un avis externe (l'agent responsable de remplir le constat d'accident) sur la possibilité d'avoir un facteur déterminant. Par exemple il est possible d'imputer la faute à une distraction du conducteur ou à des conditions météorologiques particulièrement difficiles ou au trafic,.... Il s'agit de faire un choix consciencieux sur un seul paramètre déterminant tout en remarquant les conditions qui rentrent aussi en ligne de compte (paramètres aggravants). Il ne faut pas confondre avis avec jugement. Il ne s'agit pas de trouver la cause de l'accident mais d'identifier la cause *la plus probable* sans porter de jugement sur le conducteur ou sur le véhicule.

F. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les performances des chaussées en terme d'adhérence sont déterminantes pour réduire le risque d'accident. Le granulat utilisé dans la formulation des mélanges bitumineux doit présenter des caractéristiques parfois contradictoires quant à leur forme, microrugosité et état des arêtes.

L'étude des liens entre d'une part la formulation et le granulat et d'autre part l'adhérence et l'accidentologie permet de tirer des enseignements.

Les études en laboratoire et sur des planches d'essai en France montrent que le coefficient de polissage accéléré du granulat (CPA) doit être élevé pour améliorer la microtexture. Un bon CPA s'accompagne généralement d'une meilleure adhérence.

Les drainants et les revêtements à macrorugosité ne sont performants que s'ils sont liés à un grain petit soit des formulations 0/8 voire 0/6. La réduction de la surface de contact pneumatique/granulat constatée dans les fortes macrorugosités est ainsi compensée par un meilleur contact. Dans ce sens des arêtes vives des granulats n'améliorent pas forcément l'adhérence. L'étude sur l'incidence de l'arrondi et de la cubicité a montré que l'utilisation d'arêtes émoussées accompagnée d'un taux de cubicité à 80% permet d'avoir de meilleurs résultats de microtexture pour des performances de macrotexture semblables.

L'intérêt de mélange de gravillons de nature pétrographique différente (comme roche éruptive et roche calcaire) reste à approfondir mais est une piste pour l'utilisation de matériaux de quantités inférieures.

L'évolution de l'adhérence dans le temps suit généralement la règle suivante. Au cours de la première année de service, le coefficient de frottement augmente (décapage progressif du liant sur la surface de granulat) puis il redescend et se stabilise après quatre à cinq ans.

Le taux d'accident n'est pas directement lié à l'adhérence sur les routes à grand débit comme constaté sur les autoroutes du canton de Zürich. En Allemagne, il a été établi une corrélation entre valeur d'adhérence sur autoroute (mesure SCRIM) et probabilité de présence d'un point noir. Il est d'autre part constaté en France qu'en dessous d'un certain coefficient de frottement transversal et d'une valeur donnée de la macrotexture, il apparaît une notable augmentation du taux d'accident. Des rayons inférieurs à 200 m sont un facteur aggravant.

Un lien direct entre l'accidentologie et le niveau d'adhérence des chaussées ne peut pas être établi pour les autoroutes. Pour les autres routes l'étude complémentaire a montré que la concomitance de l'adhérence et d'une configuration géométrique donnée peut jouer un rôle important dans l'apparition d'accidents. En raison de l'hétérogénéité des tronçons étudiés les conclusions sont partielles. Néanmoins un cadre d'enquête rigoureux est proposé qui prend en compte à la fois le jugement du gestionnaire de réseau et celui du responsable de la sécurité.

Ce cadre d'enquête devrait être réalisé à plus grande échelle et sur une période de temps plus longue pour pouvoir tirer des conclusions et des recommandations sur des valeurs d'adhérence en fonction de la géométrie, du site et de la chaussée.

G. BIBLIOGRAPHIE

- [1] AIPCR, *Dictionnaire technique routier*, 7^{ème} édition, 1997
- [2] Laboratoire central des ponts et chaussées, *Méthode d'essai n° 50 Mesure de l'adhérence des chaussées routières et aéronautiques*, septembre 2002.
- [3] Lucas J., Begou P.-A., Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées n° 185, mai-juin 1993, *Description de la macrotecture et de la micortecture*, pp 63 – pp 74.
- [4] Norme EN 13036-1 *Caractéristiques de surface des routes et aéroports. Méthodes d'essai – Partie 1: Mesurage de la profondeur de macrotecture de la surface d'un revêtement à l'aide d'une technique volumétrique à la tache*, 2001
- [5] Norme SN 640 510b *Qualité antidérapante. Méthode de mesure*, 1985
- [6] Norme SN 640 511b *Qualité antidérapante. Appréciation*, 1984
- [7] Do M.-T., Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées n° 255, avril-mai-juin 2005, *Relation entre la microtecture et l'adhérence*, pp 117 – pp 136.

H. ANNEXES

1. FORMULATIONS DES PLAQUES

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	AB 11	80	K		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		20			
% cubicité du mélange désiré [%]		80			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	38				
2.0 mm [%]	43				
2.8 mm [%]	50				
4.0 mm [%]	58				
5.6 mm [%]	70				
8.0 mm [%]	85				
11.2 mm [%]	100				
A					
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-18
0/1.4 mm	---	---	---	---	5395
1.4/2.0 mm	80	0	708	0	6085
2.0/2.8 mm	80	0	991	0	7076
2.8/4.0 mm	80	0	1132	0	8208
4.0/5.6 mm	86	3	1575	123	9906
5.6/8.0 mm	86	4	1967	155	12028
8.0/11.2 mm	80	0	2123	0	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm ³]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	AB 11	50	K		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		20			
% cubicité du mélange désiré [%]		50			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
B					
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	38				
2.0 mm [%]	43				
2.8 mm [%]	50				
4.0 mm [%]	58				
5.6 mm [%]	70				
8.0 mm [%]	85				
11.2 mm [%]	100				
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-18
0/1.4 mm	---	---	---	---	5395
1.4/2.0 mm	63	2	557	151	6085
2.0/2.8 mm	70	10	660	330	7076
2.8/4.0 mm	81	1	693	439	8208
4.0/5.6 mm	86	5	943	755	9906
5.6/8.0 mm	86	5	1179	943	12028
8.0/11.2 mm	84	3	1232	891	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	MR 11	80	K		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		20			
% cubicité du mélange désiré [%]		80			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
C					
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	19				
2.0 mm [%]	21				
2.8 mm [%]	25				
4.0 mm [%]					
5.6 mm [%]	30				
8.0 mm [%]	65				
11.2 mm [%]	100				
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	654
0/1.4 mm	---	---	---	---	2034
1.4/2.0 mm	80	0	283	0	2972
2.0/2.8 mm	80	0	566	0	3538
2.8/4.0 mm	-	-	---	---	---
4.0/5.6 mm	86	3	656	51	4245
5.6/8.0 mm	86	4	4590	362	9198
8.0/11.2 mm	80	0	4953	0	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	MR 11	50	K		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		20			
% cubicité du mélange désiré [%]		50			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
D					
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	19				
2.0 mm [%]	21				
2.8 mm [%]	25				
4.0 mm [%]					
5.6 mm [%]	30				
8.0 mm [%]	65				
11.2 mm [%]	100				
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	654
0/1.4 mm	---	---	---	---	2034
1.4/2.0 mm	63	2	223	60	2972
2.0/2.8 mm	73	10	359	207	3538
2.8/4.0 mm	-	-	---	---	---
4.0/5.6 mm	86	3	401	307	4245
5.6/8.0 mm	86	7	2696	2257	9198
8.0/11.2 mm	84	3	2874	2079	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	AB 11	80	B		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		22			
% cubicité du mélange désiré [%]		80			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
E					
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	38				
2.0 mm [%]	43				
2.8 mm [%]	50				
4.0 mm [%]	58				
5.6 mm [%]	70				
8.0 mm [%]	85				
11.2 mm [%]	100				
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-156
0/1.4 mm	---	---	---	---	5533
1.4/2.0 mm	80	0	708	0	6085
2.0/2.8 mm	80	0	991	0	7076
2.8/4.0 mm	80	0	1132	0	8208
4.0/5.6 mm	80	0	1698	0	9906
5.6/8.0 mm	80	0	2123	0	12028
8.0/11.2 mm	80	0	2123	0	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	AB 11	50	B		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		22			
% cubicité du mélange désiré [%]		50			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
F					
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	38				
2.0 mm [%]	43				
2.8 mm [%]	50				
4.0 mm [%]	58				
5.6 mm [%]	70				
8.0 mm [%]	85				
11.2 mm [%]	100				
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-156
0/1.4 mm	---	---	---	---	5533
1.4/2.0 mm	71	13	451	256	6085
2.0/2.8 mm	77	11	585	405	7076
2.8/4.0 mm	78	10	666	466	8208
4.0/5.6 mm	82	12	922	776	9906
5.6/8.0 mm	77	2	1358	764	12028
8.0/11.2 mm	75	15	1238	884	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

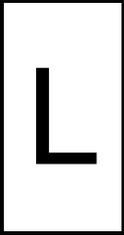
Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	MR 11	50	B		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		22			
% cubicité du mélange désiré [%]		50			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
G					
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	19				
2.0 mm [%]	21				
2.8 mm [%]	25				
4.0 mm [%]					
5.6 mm [%]	30				
8.0 mm [%]	65				
11.2 mm [%]	100				
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	602
0/1.4 mm	---	---	---	---	2086
1.4/2.0 mm	71	13	181	102	2972
2.0/2.8 mm	77	11	334	232	3538
2.8/4.0 mm	-	-	---	---	---
4.0/5.6 mm	82	12	384	323	4245
5.6/8.0 mm	77	2	3170	1783	9198
8.0/11.2 mm	75	15	2889	2064	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	MR 11	80	B		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		22			
% cubicité du mélange désiré [%]		80			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	19				
2.0 mm [%]	21				
2.8 mm [%]	25				
4.0 mm [%]					
5.6 mm [%]	30				
8.0 mm [%]	65				
11.2 mm [%]	100				
H					
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	602
0/1.4 mm	---	---	---	---	2086
1.4/2.0 mm	80	0	283	0	2972
2.0/2.8 mm	80	0	566	0	3538
2.8/4.0 mm	-	-	---	---	---
4.0/5.6 mm	80	0	708	0	4245
5.6/8.0 mm	80	0	4953	0	9198
8.0/11.2 mm	80	0	4953	0	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
BALMHOLZ	AB 11	50	K		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		22.5			
% cubicité du mélange désiré [%]		50			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	38				
2.0 mm [%]	43				
2.8 mm [%]	50				
4.0 mm [%]	58				
5.6 mm [%]	70				
8.0 mm [%]	85				
11.2 mm [%]	100				
I					
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-192
0/1.4 mm	---	---	---	---	5569
1.4/2.0 mm	59	3	594	114	6085
2.0/2.8 mm	61	2	806	185	7076
2.8/4.0 mm	63	2	891	241	8208
4.0/5.6 mm	75	5	1092	606	9906
5.6/8.0 mm	76	10	1286	836	12028
8.0/11.2 mm	75	15	1238	884	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
BALMHOLZ	AB 11	80	K		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		22.5			
% cubicité du mélange désiré [%]		80			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	38				
2.0 mm [%]	43				
2.8 mm [%]	50				
4.0 mm [%]	58				
5.6 mm [%]	70				
8.0 mm [%]	85				
11.2 mm [%]	100				
J					
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-192
0/1.4 mm	---	---	---	---	5569
1.4/2.0 mm	80	0	708	0	6085
2.0/2.8 mm	80	0	991	0	7076
2.8/4.0 mm	80	0	1132	0	8208
4.0/5.6 mm	80	0	1698	0	9906
5.6/8.0 mm	80	0	2123	0	12028
8.0/11.2 mm	80	0	2123	0	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
BALMHOLZ	AB 11	50	B		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		25.5			
% cubicité du mélange désiré [%]		50			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [%]	7.5				
1.4 mm [%]	38				
2.0 mm [%]	43				
2.8 mm [%]	50				
4.0 mm [%]	58				
5.6 mm [%]	70				
8.0 mm [%]	85				
11.2 mm [%]	100				
K					
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-416
0/1.4 mm	---	---	---	---	5793
1.4/2.0 mm	65	12	507	200	6085
2.0/2.8 mm	63	4	772	218	7076
2.8/4.0 mm	58	7	954	178	8208
4.0/5.6 mm	54	3	1565	133	9906
5.6/8.0 mm	63	4	1655	468	12028
8.0/11.2 mm	50	5	2123	0	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

Origine des granulats	Couche de roulement	Fraction cubique [%]	Type de concasseur		
ARVEL	AB 11	50	G		
Quantité mélange désirée [g]		15000			
% filler dans 0/1.4 mm [%]		24.8			
% cubicité du mélange désiré [%]		50			
% liant sur enrobé [%]		5.66			
Composition granulométrique désirée					
0.09 mm [f%]	7.5				
1.4 mm [f%]	38				
2.0 mm [f%]	43				
2.8 mm [f%]	50				
4.0 mm [f%]	58				
5.6 mm [f%]	70				
8.0 mm [f%]	85				
11.2 mm [f%]	100				
Fraction	Fraction cubique	Fraction non cubique	Mélange		
	% cubiques mesurés	% cubiques mesurés	quantité cubique [g]	quantité non cubique [g]	Quantité totale
filler pur	---	---	---	---	-362
0/1.4 mm	---	---	---	---	5739
1.4/2.0 mm	78	16	388	320	6085
2.0/2.8 mm	58	8	832	158	7076
2.8/4.0 mm	70	11	748	384	8208
4.0/5.6 mm	50	0	1698	0	9906
5.6/8.0 mm	64	11	1562	561	12028
8.0/11.2 mm	50	0	2123	0	14151
Quantité de liant =		849	[g]		
Masse volumique réelle =		2.473	[g/cm3]		

2. RÉSULTATS DES ESSAIS SUR PLAQUE

Microtexture SRT

Plaque	Nombre de cycles de polissage					
	0	5	10	20	30	40
A	60	63	60	58	61	58
B	60	64	60	58	60	59
C	57	60	56	55	60	55
D	55	66	61	59	58	59
E	60	64	64	60	61	60
F	61	65	60	57	59	59
G	66	65	60	57	60	57
H	66	65	59	57	59	56
I	65	64	61	60	62	59
J	65	64	60	59	60	59
K	69	65	61	60	60	60
L	70	65	64	60	62	60
max	70	65	64	60	62	60
min	55	60	56	55	58	55

Macrotexture HSv

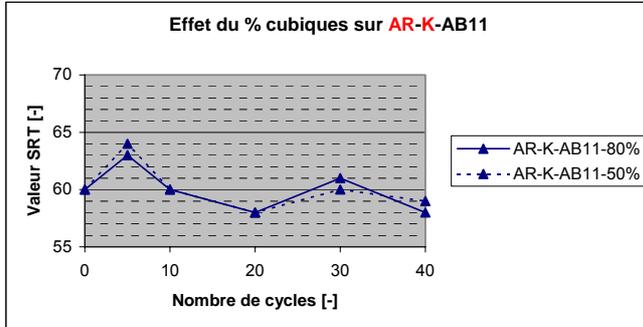
Plaque	Nombre de cycles de polissage					
	0	5	10	20	30	40
A	0.65	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
B	0.65	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
C	1.6	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
D	2.9	2.6	3.2	3.5	3.5	3.5
E	0.63	0.7	0.65	0.65	0.75	0.75
F	0.53	0.63	0.63	0.65	0.7	0.75
G	2.9	2.2	2.6	2.6	2.6	2.6
H	2.6	2.6	3.2	3.2	3.2	3.2
I	0.6	0.63	0.7	0.65	0.8	0.75
J	0.63	0.63	0.63	0.7	0.8	0.8
K	0.6	0.63	0.63	0.65	0.7	0.8
L	0.6	0.63	0.63	0.7	0.7	0.75

3. ANALYSE DETAILLÉE DES RESULTATS

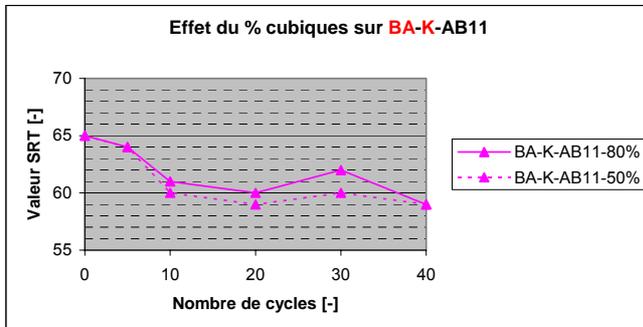
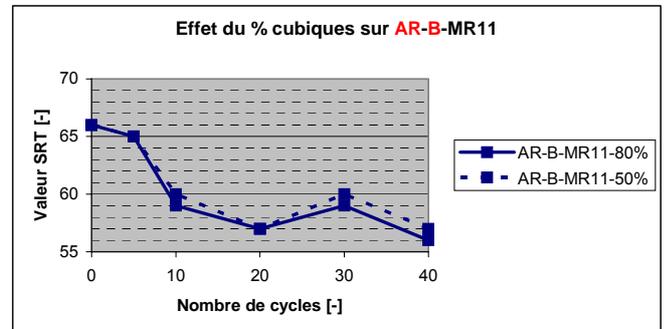
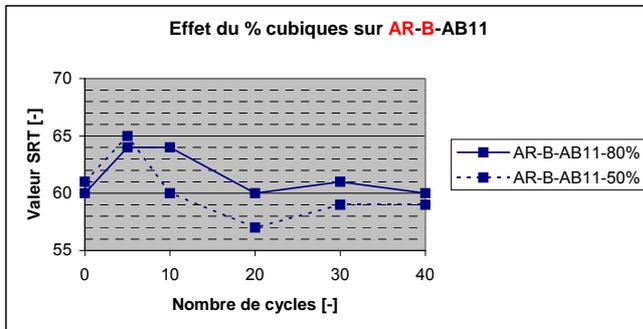
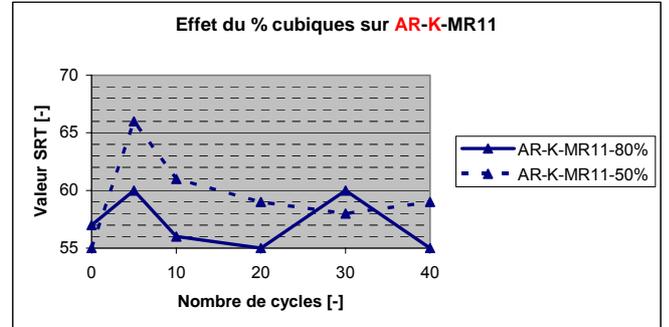
Annexe A

Effet % cubiques sur la microtexture

AB 11



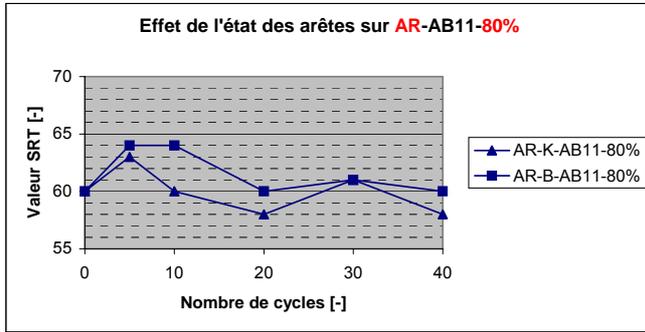
MR 11



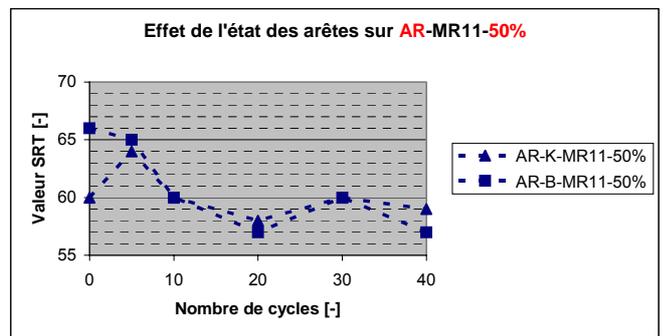
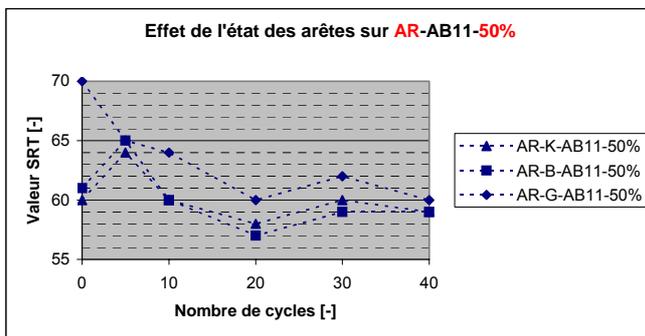
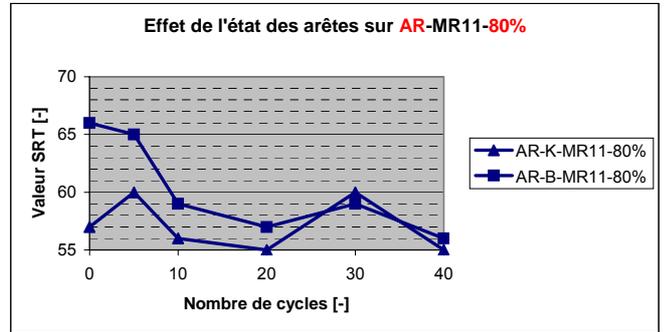
Annexe B

Effet état des arêtes sur la microtexture

AB 11



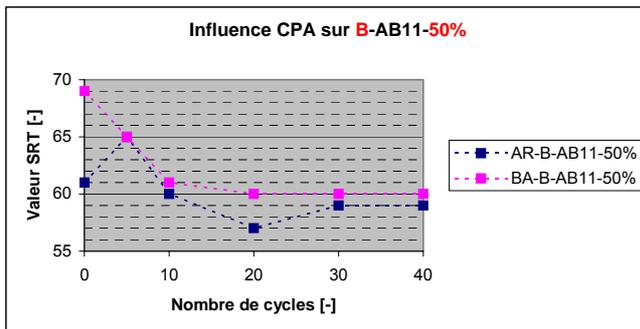
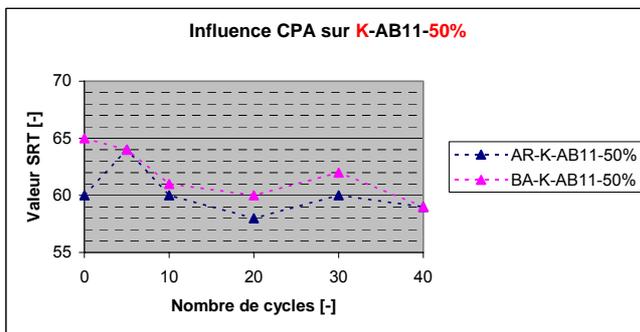
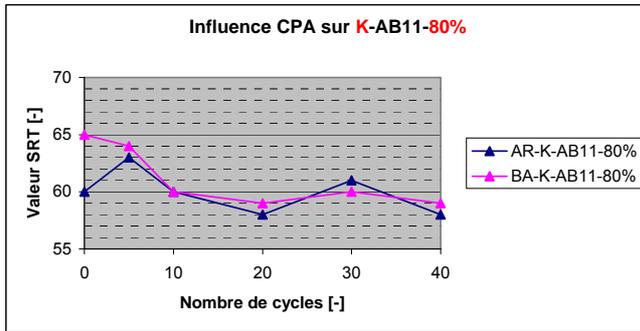
MR 11



Annexe C

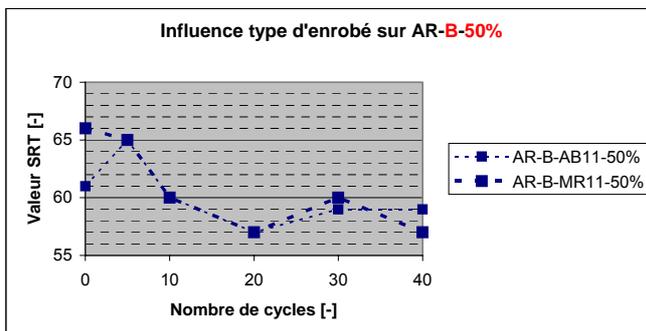
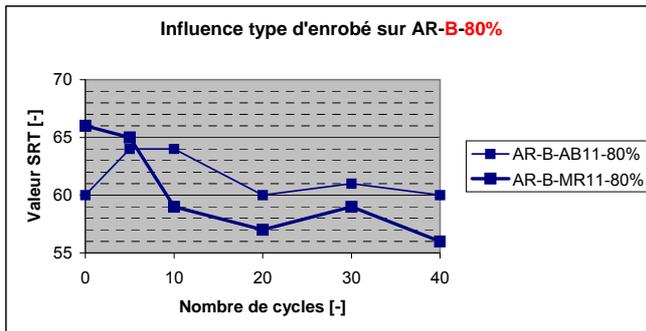
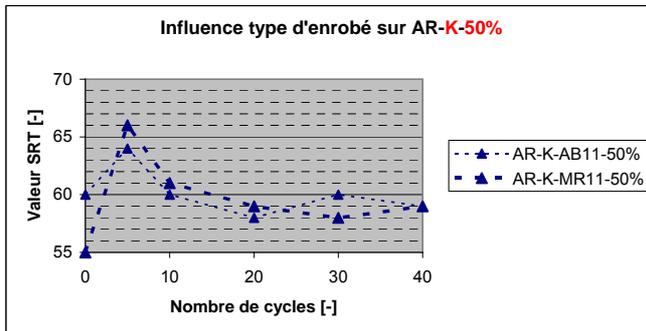
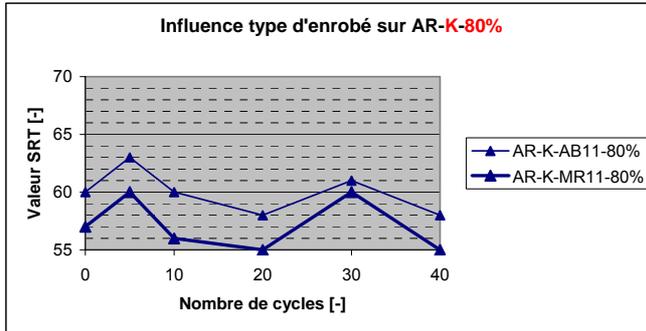
Etude de sensibilité: influence du CPA sur la microtexture

AB 11



Annexe D

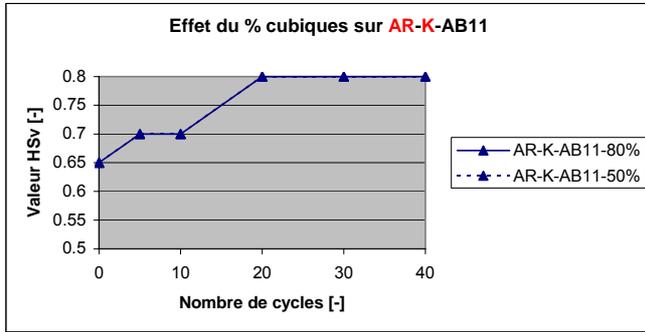
Etude de sensibilité: influence du type d'enrobé sur la microtexture



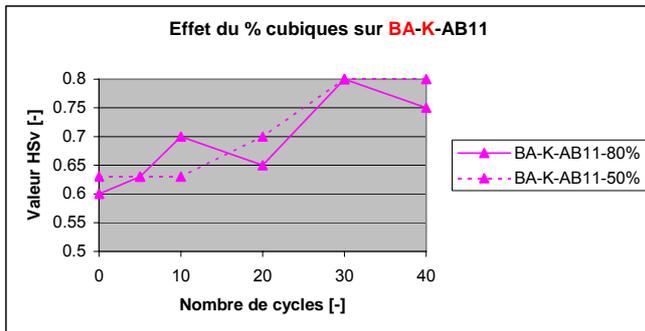
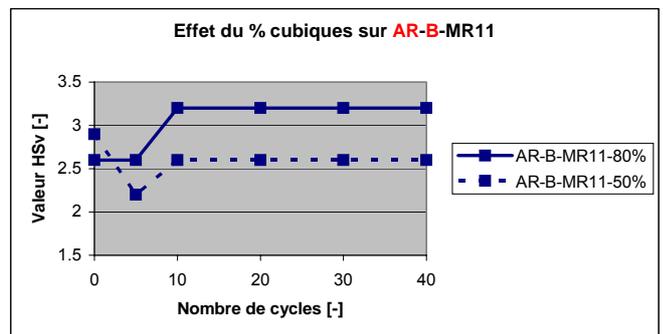
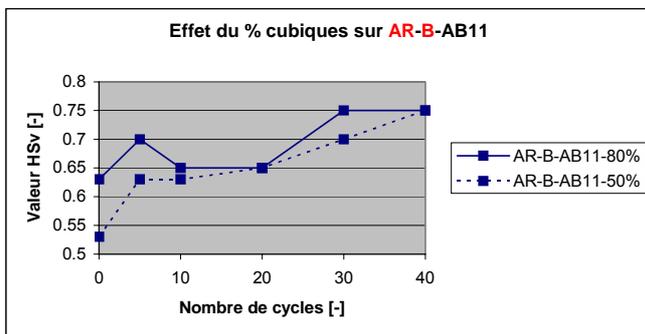
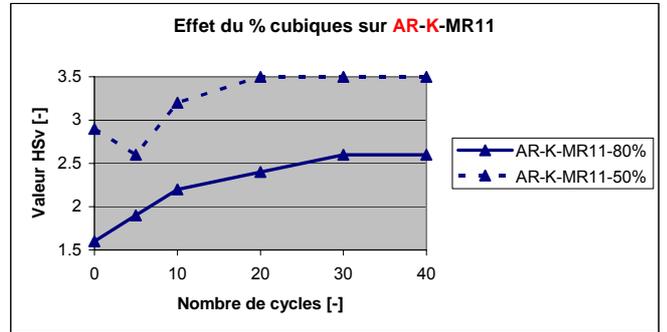
Annexe E

Effet % cubiques sur la macrotexture

AB 11



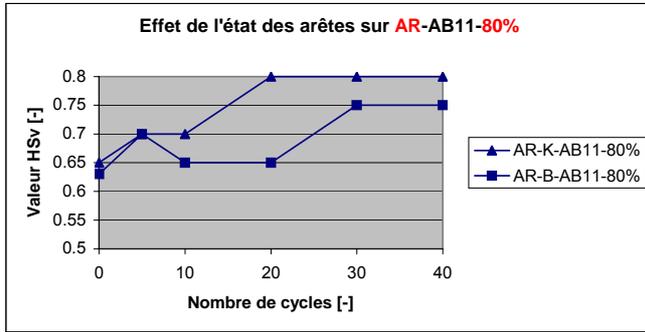
MR 11



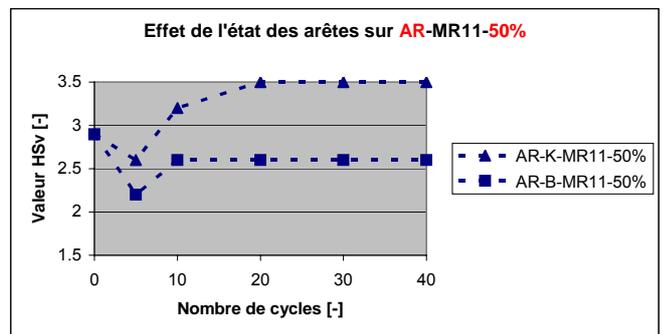
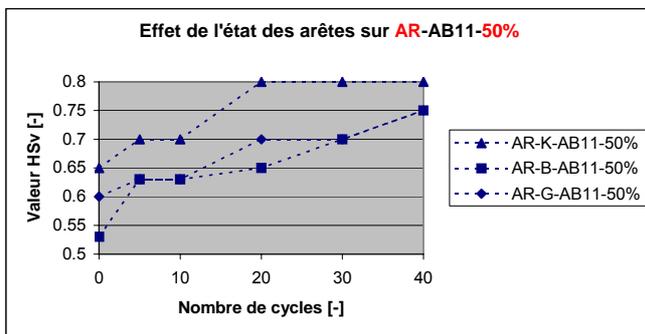
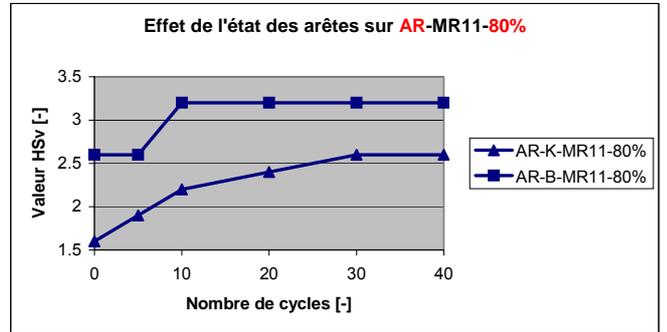
Annexe F

Effet état des arêtes sur la macrotexture

AB 11



MR 11



Annexe G

Etude complémentaire: compensation entre valeur CPA et forme

