

ORGANISME
NATIONAL DE
SÉCURITÉ
ROUTIÈRE

PROJECTIONS
DE
GRAVILLONS

*Bulletin n° 9
Mai 1964*

CDAT
15062

ÉTUDE DES PROJECTIONS DE GRAVILLONS PAR LES VÉHICULES AUTOMOBILES

H. LE GUEN,
Licencié ès sciences,
Ingénieur E.N.S.P.M.,
Chef de service essai banc-route
au Laboratoire de l'U.T.A.C.

L'étude des projections de gravillons par les véhicules automobiles, dont ce bulletin résume les méthodes et les principaux résultats, a été exécutée pour le compte de l'O.N.S.E.R. par l'Union Technique de l'Automobile, du Motocycle et du Cycle.

RÉSUMÉ

Les projections de gravillons ont été étudiées à l'aide de procédés cinématographiques permettant d'observer les trajectoires des gravillons. Les projections ont en outre été interceptées sur des panneaux collants fixés à l'arrière et sur le côté du véhicule, et sur le bas-côté de la route, de manière à permettre des analyses quantitatives.

Les études ont été limitées aux projections prenant directement naissance dans l'interaction entre les pneumatiques et le sol. Ces projections peuvent être longitudinales ou latérales.

Les projections longitudinales restent comprises dans un angle d'environ 20° à l'arrière des roues, dans un système d'axes liés au véhicule. Par rapport à des axes immobiles, les gravillons sont soulevés verticalement et non projetés en arrière.

Les projections latérales sont expulsées perpendiculairement au plan de la roue. Leur vitesse latérale est voisine de celle du véhicule.

Dans les deux cas les gravillons ne se déplacent donc pas dans le sens du mouvement des véhicules. Seule la vitesse du véhicule heurtant les gravillons peut fournir l'énergie nécessaire au bris du pare-brise. Cette énergie peut d'ailleurs être inférieure à celle requise pour les essais de réception, en raison de la localisation de contrainte résultant de la faible courbure des gravillons qui présentent des arêtes vives, ou parce que les tensions internes du pare-brise en réduisent localement la résistance.

Pratiquement on peut définir une zone dangereuse autour d'une voiture circulant sur une route fraîchement gravillonnée. Elle est nulle pour des vitesses inférieures à 50-60 km/h. Elle apparaît ensuite et s'étend à 2,5 m de part et d'autre du véhicule et 25 m en arrière pour une vitesse voisine de 100 km/h.

La perte de visibilité résultant de la rupture du pare-brise d'un véhicule n'occupe pas une place de première importance parmi les causes d'accidents routiers. Elle n'en constitue pas moins une gêne grave et par conséquent un facteur d'insécurité.

On sait que les ruptures les plus fréquentes se produisent sur des routes fraîchement revêtues de gravillons, lorsqu'un de ces gravillons, soulevé au passage d'un véhicule, vient heurter le pare-brise d'un autre véhicule proche.

L'utilisation de verres ayant un comportement au choc différent de celui des verres trempés, actuellement en usage, permettrait sans doute de réduire notablement les risques de perte de visibilité, mais ceux qui sont disponibles présentent en cas d'accident, l'inconvénient soit de se fragmenter en débris tranchants (verres feuilletés), soit d'être une cause supplémentaire de fracture du crâne (verres incassables).

Dans ces conditions, l'étude de la projection des gravillons par les véhicules automobiles reste d'actualité. Par quels mécanismes les particules solides existant à l'état libre sur la surface de roulement sont-elles mises en mouvement au passage de véhicules? Quelle est leur trajectoire? Comment la vitesse des véhicules se relie-t-elle à l'importance des projections; agit-elle sur la granulométrie des matériaux soulevés? Telles sont, parmi d'autres, les questions qu'il convient de poser, et auxquelles le présent rapport s'efforce de répondre.

En cette matière où les études sont rares, les observations qui vont être présentées ne sauraient autoriser des conclusions décisives sur tous les points. L'administrateur et l'usager pourront cependant en tirer des règles pratiques qui ne relèvent pas toutes, il s'en faut, du domaine de l'évidence.

I - LES DIFFÉRENTS TYPES DE PROJECTION

L'observation directe du phénomène permet de se rendre compte que les projections de gravillons ne naissent pas toutes selon le même mécanisme. Les figures n^{os} 1 à 3 mettent en évidence.

- 1) Un jet important de gravillons émis à partir de la surface de contact entre pneu et surface de roulement, dans le sillage de la roue.
- 2) Un éparpillement de gravillons qui paraît rayonner de toute la circonférence des pneus.
- 3) Des gravillons dégagés latéralement au niveau de l'aire de contact entre les pneus et la route.
- 4) Enfin des éléments dont la trajectoire paraît anarchique.

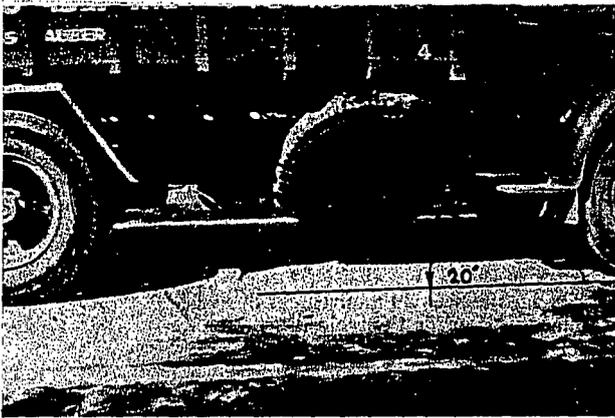


Figure 1 - Projection longitudinales par soulèvement.

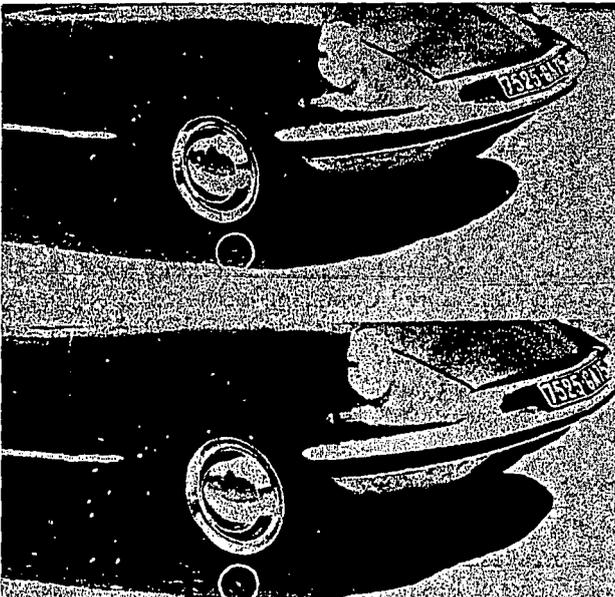


Figure 2 et 3 - Projections longitudinales radiales et projections latérales.

Ces derniers correspondent à des *projections indirectes*, les trajectoires initiales étant déviées à la suite d'un choc contre le véhicule lui-même ou contre un autre obstacle, ou après rebondissement sur la chaussée. De nature aléatoire, ces projections se prêtent difficilement à un examen systématique. Aussi ont-elles été exclues du champ de l'étude.

Les autres types de projections ont leur origine immédiate dans le mouvement même du véhicule et plus particulièrement dans l'interaction pneu-route. Ce sont des *projections directes*, dont l'étude implique qu'elles sont reproductibles et soumises à des lois relativement simples.

La description succincte des phénomènes, qui a été présentée en guise de commentaire des figures n^{os} 1 à 3 suggère une classification formelle qui sera adoptée dans la suite de l'exposé. Parmi les projections directes, nous distinguerons :

— les *projections longitudinales*, dont le début de trajectoire reste voisine du plan de la roue. Elles ont été subdivisées en projections que nous appellerons *tangentielles* et *radiales*. Les gravillons projetés tangentiellement (fig. 1) sont mis en mouvement dans l'interaction pneu-sol (1). Les projections radiales (fig. 2 et 3) mettent en jeu des gravillons entraînés par les sculptures du pneumatique, puis libérés sous l'effet de la force centrifuge.

— les *projections latérales*, c'est-à-dire les projections dans une direction perpendiculaire à la trajectoire du véhicule (fig. n^{os} 2 et 3, gravillon entouré d'un cercle).

Si ces distinctions correspondent bien à des mécanismes différents, il faut néanmoins prendre garde que les termes choisis ne doivent pas être pris dans leur sens géométrique strict : les projections tangentiennes n'empruntent pas des trajectoires rigoureusement tangentes au pneumatique; à l'inverse, les forces qui provoquent les projections radiales ont certainement une composante tangentielle. Enfin il n'y a pas de scission nette entre les différents modes de projection, plusieurs processus pouvant se combiner, de sorte que les projections latérales ne sont pas plus rigoureusement perpendiculaires à la trajectoire du véhicule que les projections longitudinales ne sont intégralement contenues dans le plan de la roue.

II - MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Les méthodes d'observation ont été choisies de manière à permettre d'étudier le mouvement des gravillons (trajectoire et vitesse) et la nature des projections (poids, granulométrie).

(1) Nous préférons cette formule vague à celle, plus expressive, de frottement et pincement. Elle montre mieux que nous ignorons la séquence exacte des processus mécaniques, extrêmement complexes, qui entrent dans le phénomène d'adhérence des pneus sur la surface de roulement.

Les trajectoires ont été enregistrées par prises de vues cinématographiques. Le laboratoire disposait de deux caméras.

— Caméra BELL et HOWELL 16 mm à cadence de prise de vues fixe de 128 images par seconde, à entraînement électrique. Sa vitesse de déroulement est régulière, ce qui permet d'utiliser la cadence d'image comme base de temps; mais c'est un matériel lourd, d'autant plus que sa mise en action exige une alimentation électrique par batterie d'accumulateurs.

— Caméra PATHÉ WEBO 16 mm portable à entraînement mécanique pouvant dérouler de 8 à 80 images-seconde. Dans cette caméra, la vitesse de déroulement dépend de la tension du ressort et n'est donc pas constante.

Différents angles de prises de vues ont été choisis afin de faciliter l'observation :

— Caméra au sol filmant le passage du véhicule.

— Caméra à bord d'un véhicule, filmant le véhicule qui le précède.

— Caméra fixée sur le côté d'un véhicule et filmant les roues de ce même véhicule.

Les difficultés n'en restent pas moins nombreuses. Ainsi, pour les prises de vues à poste fixe, il est nécessaire de disposer d'un fond neutre, faute de quoi les gravillons sont peu visibles sur les films. En pratique, après différents essais, la caméra a été placée aussi bas que possible sur le bord de la chaussée et un fond artificiel a été créé sur le côté opposé de la route au moyen d'une toile tendue. D'autre part, si l'on désire maintenir le véhicule dans le champ de l'objectif pendant tout le mouvement d'un gravillon, il est nécessaire de prendre un recul tel que les projections deviennent invisibles sur les photographies. Enfin, sur les routes étroites, les prises de vues doivent être orientées presque parallèlement à la route, dans des conditions de contraste très défavorables.

Les vues obtenues à partir d'un véhicule suiveur se sont en général révélées difficiles à exploiter : les images sont souvent mouvantes; leur cadrage peut, lorsque la chaussée est en mauvais état, être modifié au point que le véhicule photographié sorte du champ de l'objectif. Les difficultés de cadrage sont aggravées lorsque la route est sinueuse. Dans ce cas également les variations d'éclairément sont très sensibles, et les films sont tantôt surexposés, tantôt sous-exposés.

L'utilisation d'une caméra fixée au véhicule et filmant les roues de ce véhicule a donné de bons résultats pour l'étude des projections longitudinales, en dépit d'un inévitable manque de contraste.

Il est plus malaisé de trouver un angle de prise de vues convenant à l'enregistrement des projections latérales sans faire appel à des dispositifs complexes et sans risque d'endommager l'objectif de la caméra.

Aussi les films sont-ils plus délicats à interpréter dans ce cas.

Pour examiner la nature des projections, il était nécessaire d'imaginer une technique de récupération des gravillons.

Une méthode a été indiquée dans le rapport présenté à la Commission Économique pour l'Europe, Comité des transports intérieurs. Sous-comité des transports routiers. Groupe de travail de la construction des véhicules - IV^e session - (Document W/TRANS/W.P. 29/68 du 22 avril 1960).

Elle permet effectivement de recueillir des gravillons, mais la position de leur point d'impact n'est connue que d'une manière discontinue puisqu'ils sont récupérés dans un empilage de boîtes, et que certains d'entre eux peuvent échapper au piégeage. Pour améliorer cette technique et permettre de déterminer le plus exactement possible le point d'impact du gravillon, nous avons imaginé de placer sur sa trajectoire un panneau enduit d'une matière collante permettant de fixer le gravillon à l'endroit où il est intercepté.

Après avoir expérimenté différents produits (colle, résine de pin, glu, gélatine, button...), nous avons porté notre choix sur une pâte constituée d'oléates et de particules solides fines. Le gravillon frappant un panneau enduit d'une telle pâte sur une épaisseur d'environ 1 cm s'incruste plus ou moins profondément dans la pâte dont la consistance est suffisante pour que le caillou reste en place malgré des vibrations importantes. Cette pâte est en outre d'un épannage facile, adhère bien au bois, et demeure pratiquement insensible à la température et à l'humidité pen-

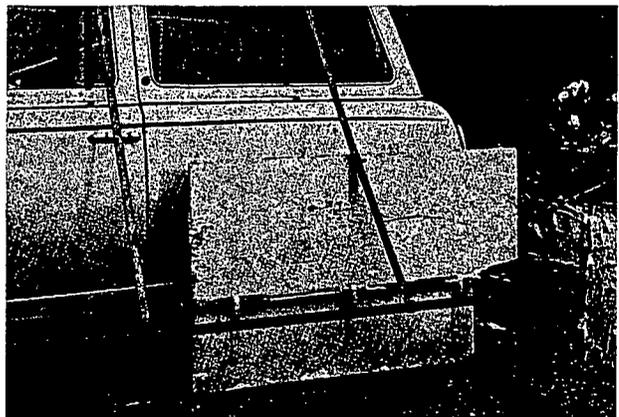


Figure 4 - Dispositif de récupération des gravillons : panneaux latéral et arrière fixés au véhicule.

dant un temps suffisamment long. Elle peut être aisément confectionnée à peu de frais.

Plusieurs panneaux ont été réalisés au cours des essais; deux d'entre eux étaient fixés au véhicule, un troisième était disposé sur le bas-côté de la route.

Des deux panneaux liés au véhicule (fig. 4), l'un était placé dans le sillage de la roue arrière gauche. Dans une première série d'essais, sa distance à l'axe de cette roue était de 1,20 m. Les variations de densité des projections dues aux accélérations et décélérations se sont révélées très sensibles. Aussi, pour mieux sélectionner les gravillons recueillis, le panneau a été reculé de 1,20 m à 1,80 m dans les essais suivants.

Il a également été monté sur un système basculant permettant la mise en place du système à une vitesse et sur une distance définies à l'avance.

L'autre panneau, d'abord rigidement fixé au véhicule, a ensuite été rendu basculant pour les mêmes raisons. Il a été placé sur le côté gauche du véhicule à hauteur de la roue arrière à 40 cm de la face externe de cette roue. Le dispositif présente l'inconvénient d'être encombrant, ce qui en proscrit l'utilisation sur une voie étroite ouverte à la circulation publique.

Le panneau disposé sur le bas-côté de la route avait une hauteur de 1,50 m. Sa longueur a varié au cours des essais. Lorsque les véhicules passaient devant le panneau, leurs roues les plus proches s'en trouvaient distantes d'environ 1,20 m.

Si le système a, dans son ensemble, donné satisfaction il convient toutefois de signaler qu'aux vitesses élevées, les projections longitudinales les plus basses ont été si violentes qu'elles ont déchiqueté la partie inférieure du panneau arrière. Les mesures effectuées sur les gravillons recueillis à ces vitesses ont donc été partielles.

Il restait à déterminer le lieu d'essai. Quelques tests préliminaires ayant permis de vérifier que l'absence de liant hydrocarboné modifiait les mécanismes des projections, les sections expérimentales ne pouvaient être choisies que sur des routes incluses dans un programme annuel d'entretien. Grâce à l'obligeance du Service des Ponts et Chaussées de la Seine-et-Oise, nous avons pu obtenir le programme de gravillonnage de plusieurs subdivisions du département. Pour des raisons de sécurité, ont été écartées toutes les sections situées en agglomération ou sur des voies de grande circulation. En définitive le choix s'est fixé sur le chemin départemental n° 198 près de Thiverval, dont le revêtement a été effectué avec des gravillons de granulométrie 8-15 mm, et sur la Départementale n° 53, à proximité de Villacoublay, où les gravillons employés répondaient à la norme de 3-8 mm.

La première section est étroite (environ 5 m de largeur) et sinueuse. Aussi les essais ont-ils été effectués à faible vitesse et avec un dispositif réduit ne comprenant pas le panneau latéral de récupération des gravillons, fixé au véhicule. Les prises de vues ont également été réduites et se sont d'ailleurs révélées peu exploitables, pour les raisons exposées précédemment. Cette première campagne a néanmoins permis de recueillir des données partielles sur les caractéristiques des gravillons projetés. L'expérience acquise a surtout été mise à profit pour améliorer les méthodes d'observation utilisées dans les campagnes suivantes.

III - RÉSULTATS DES ESSAIS

1. Projections longitudinales

Les projections radiales dues à l'action de la force centrifuge n'ont pas de directions privilégiées. En effet, les films montrent que les gravillons peuvent être libérés du pneumatique en un point quelconque

de la circonférence. On trouve donc des gravillons qui sont dégagés en avant du pneumatique aussi bien qu'en arrière. Toutefois, ces projections, qui sont très importantes à basse vitesse, diminuent au fur et à mesure que la vitesse de rotation de la roue augmente et disparaissent pratiquement au-dessus de 60 km/h : la force centrifuge devient alors supérieure à la force d'adhérence (pénétration du gravillon dans les sculptures ou collage sur le pneumatique par le liant hydrocarboné utilisé pour le revêtement routier). Ces gravillons sont en général rapidement arrêtés par les éléments de la caisse et retombent au sol sans vitesse. Cependant, il peut arriver que le gravillon soit reprojété à une hauteur pouvant être gênante, notamment lorsqu'il rebondit sur une arête ou sur le flanc de la roue.

La plus grande partie des projections longitudinales sur l'extérieur sont tangentielles. D'après les mesures effectuées sur des agrandissements de films au projecteur de profil l'angle maximum d'éjection des gravillons est de l'ordre de 25° et cet angle semble indépendant de la vitesse. La hauteur maximum de la projection de ces gravillons peut atteindre 1 m à 1,5 m suivant la vitesse de circulation et le poids du gravillon.

Les projections dues aux roues avant sont rapidement arrêtées par le soubassement de la voiture. Il en est en partie de même pour les roues arrière, mais néanmoins de nombreux gravillons sont libérés en arrière de la voiture.

La pression de gonflage des pneumatiques de la voiture d'essai a toujours été maintenue à 2,400 kg/cm² et la charge sur l'essieu arrière était de 630 kg. Dans ces conditions, dans un système lié au véhicule, la distance de projection paraît être d'une vingtaine de mètres, à la vitesse de 80 km/h. Cette distance n'a toutefois pu être déterminée avec précision car les images prises dans ce système (c'est-à-dire le véhicule paraissant immobile sur les images) ne contiennent pas toute la trajectoire des gravillons, sauf à prendre un recul tel que les gravillons deviennent invisibles sur les films, ainsi qu'on l'a déjà mentionné.

Mesurée sur ces mêmes images, la vitesse des gravillons au début de leur trajectoire apparaît sensiblement égale à la vitesse de la voiture et de sens contraire. Cette vitesse est mesurée par rapport au véhicule puisque rappelons-le, les images ont été prises en suivant dans le viseur le véhicule en mouvement. La netteté du véhicule par rapport au flou du fond suffirait à le montrer. Dans un système lié au sol, les gravillons projetés ne doivent donc être animés d'aucune vitesse horizontale appréciable; ils doivent simplement être soulevés. C'est ce qui a été vérifié au cours de la dernière campagne d'essais où les prises de vues à poste fixe ont été effectuées en maintenant la caméra immobile. Les figures nos 5 et 6 montrent les trajectoires types obtenues.

Ce résultat peut sembler surprenant : un observateur direct croit voir très nettement les gravillons projetés en arrière. En fait il s'agit d'une illusion d'optique,

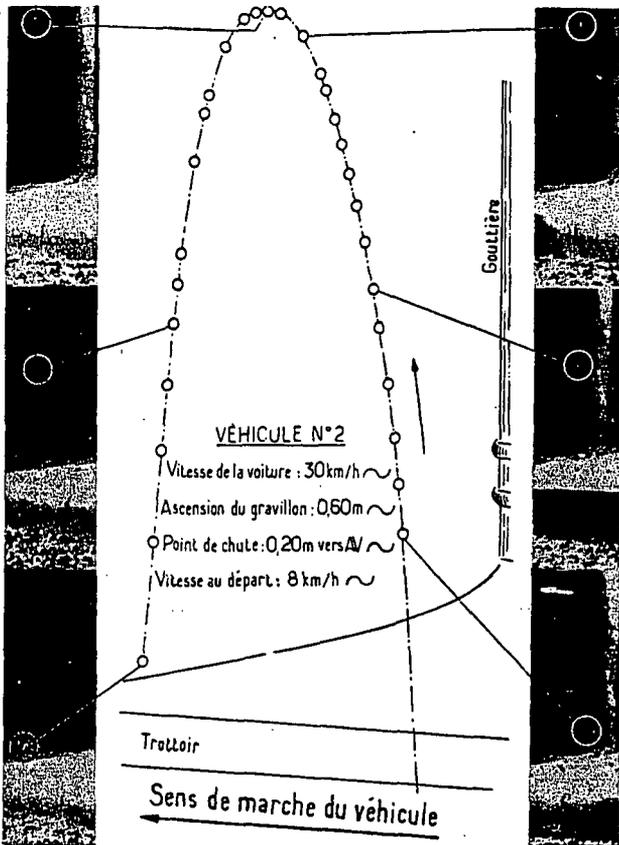
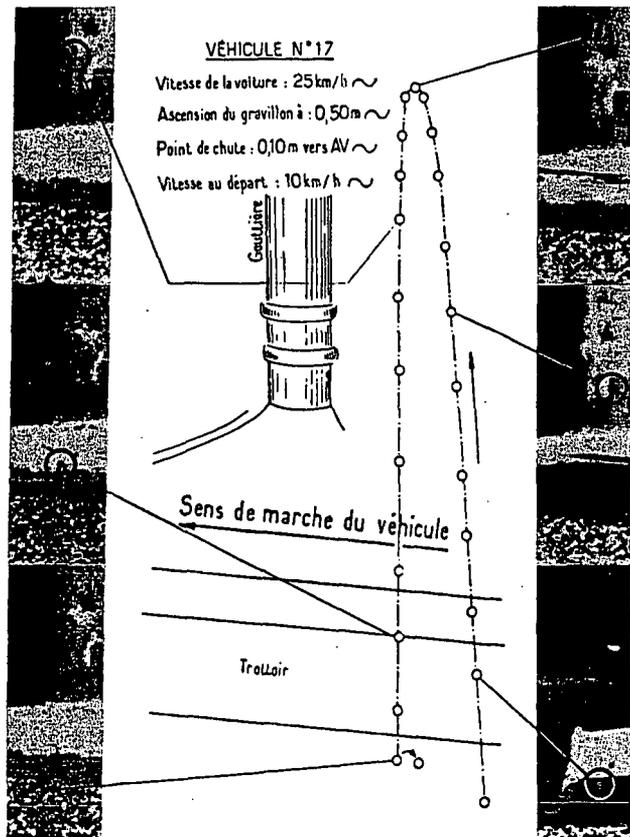


Figure 5 et 6 - Trajectoires-typiques des projections longitudinales tangentielles.



car l'œil se fixe sur le véhicule, le plus gros mobile, et voit donc des images dans des axes en mouvement par rapport au sol; dans ce système, les gravillons sont bien projetés en arrière du véhicule avec un angle de l'ordre de 25° .

Les résultats expérimentaux concordent d'ailleurs avec la théorie cinématique simplifiée du phénomène : le mouvement d'un point du pneumatique dans des axes fixes peut être assimilé à une cycloïde; le vecteur vitesse de ce point, à l'instant où il quitte le sol (fig. n° 7)

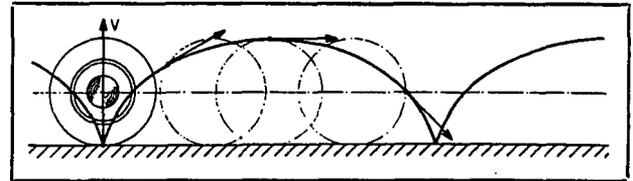


Figure 7 - Mouvements d'un point lié à la roue par rapport au sol.

est vertical et dirigé vers le haut. Le gravillon qui est entraîné dans ce mouvement a donc une trajectoire qui, au départ du sol, est sensiblement verticale et même dans certains cas inclinée dans le sens du mouvement du véhicule, s'il est libéré après que son point de contact avec le pneumatique a quitté le sol.

Bien entendu, il ne s'agit là que d'une explication sommaire. En particulier, en raison de l'élasticité des pneumatiques, la trajectoire des points de leur surface n'est pas une cycloïde parfaite. Il est également fait abstraction des forces complexes qui agissent probablement sur le gravillon alors qu'il est pressé entre le pneu et le sol. Le schéma présenté a cependant l'avantage de clarifier des constatations a priori surprenantes.

L'angle des projections, par rapport à l'horizontale, dans un système d'axes liés au véhicule, est de l'ordre de 18° , les projections les plus denses restant à l'intérieur d'un angle inférieur à 10° . Il paraît indépendant de la vitesse du véhicule, et correspond sensiblement au demi-arc sous-tendu par l'aire de contact du pneu avec le sol (fig. n° 8).

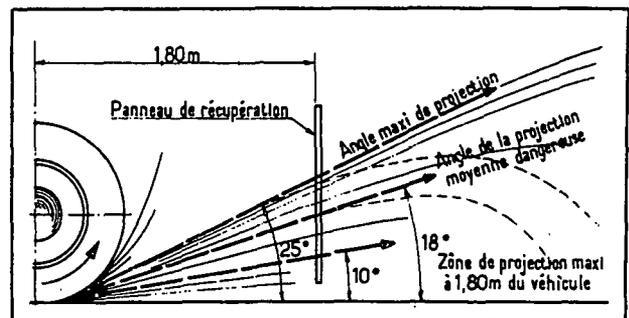


Figure 8 - Angle des projections longitudinales tangentielles.

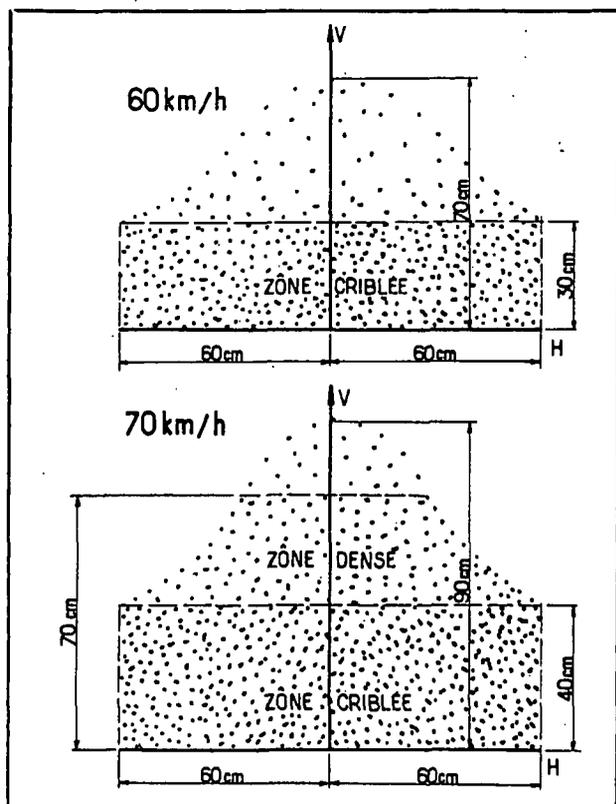
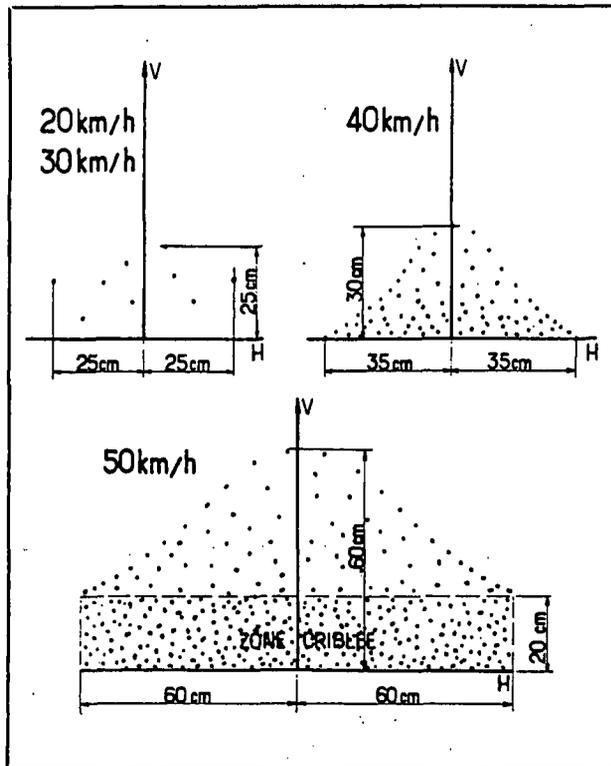


Figure 9 - Répartition des projections tangentielles en fonction de la vitesse.

Si l'angle des projections dépend peu de la vitesse, il n'en est pas de même de leur distribution à l'intérieur de cet angle, comme le montre la répartition de ceux qui ont été interceptés par le panneau arrière, et qui est reproduite sur les schémas de la figure n° 9. Au cours des essais le panneau se trouvait à 1,80 m de l'axe de la roue. Il était mis en place une fois que la vitesse choisie était atteinte et maintenue dans cette position sur une distance de 100 m.

Lorsque la vitesse croît, les phénomènes peuvent être décrit de la manière suivante :

Vitesse inférieure à 30 km/h

Les projections sont pratiquement nulles. On relève quelques gravillons isolés à des hauteurs au-dessus du sol inférieures à 25 cm.

40 km/h

Les gravillons récupérés sont plus nombreux mais restent isolés. La zone intéressée s'étend à 35 cm de part et d'autre du plan médian de la roue et à 30 cm au-dessus du sol.

50 km/h

On distingue deux zones très différentes :

- 1) Une zone basse sur toute la largeur du panneau, soit 60 cm de part et d'autre de l'axe et s'élevant à 20 cm au-dessus du sol dans laquelle les projections de gravillons sont suffisamment importantes pour avoir arraché la matière collante.
- 2) Une deuxième zone dans laquelle la densité des gravillons décroît pour devenir nulle à 60 cm du sol.

60 km/h

La zone inférieure s'élève jusqu'à 30 cm du sol. La hauteur maximum est de 70 cm.

70 km/h

La zone inférieure s'élève à 40 cm au-dessus du sol. La projection est ici suffisamment violente pour déchiqueter le bord inférieur du panneau support en bois compressé. La projection est encore dense à 70 cm au-dessus du sol; elle est nulle à 90 cm (voir fig. 10). La route utilisée ne nous a pas permis de faire des essais à des vitesses supérieures en raison du manque de visibilité pour pouvoir se lancer en toute sécurité. Ces essais montrent donc que la projection de gravillons ne devient importante qu'à partir de 50 km/h. En effet, à 40 km/h les projections atteignent 30 cm à 1,80 m de la roue, et il semble que d'après leur faible enfoncement dans la pâte leur force est insuffisante pour être projetés très loin.

Par contre, pour des vitesses supérieures, ces projections peuvent être dangereuses. Ainsi à 70 km/h la zone de projection dense atteint 40 cm de hauteur et les gravillons s'enfoncent jusqu'au support de la pâte. De plus, on a relevé des gravillons à 90 cm de hauteur. Il semble donc qu'à cette vitesse de circulation les gravillons projetés en arrière par la roue peuvent avoir une force suffisante pour s'élever à la hauteur d'un pare-brise (environ 1 m) à une distance importante.

La masse totale des gravillons ne peut être calculée avec précision étant donné que passé une certaine vitesse la projection est telle que la pâte sur le panneau est enlevée et qu'il n'est pas possible d'avoir la totalité

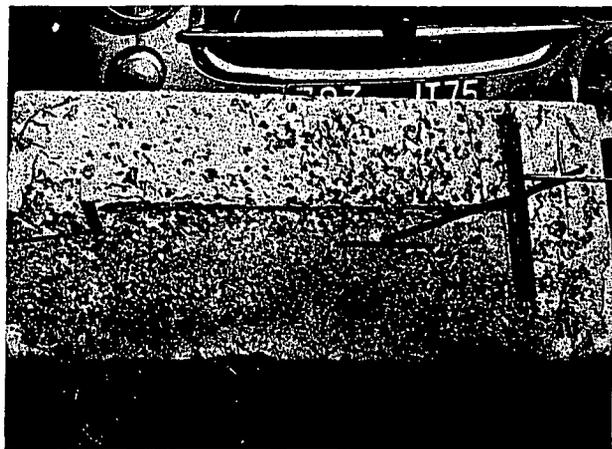


Figure 10 - Projections sur le panneau de récupération arrière.

des cailloux projetés. Cependant, d'après le poids des cailloux récupérés, on peut estimer qu'à partir de 50-60 km/h le poids des cailloux projetés en arrière du véhicule à une distance de 2 m est au minimum de l'ordre du kilogramme tous les 100 m parcourus et par roue.

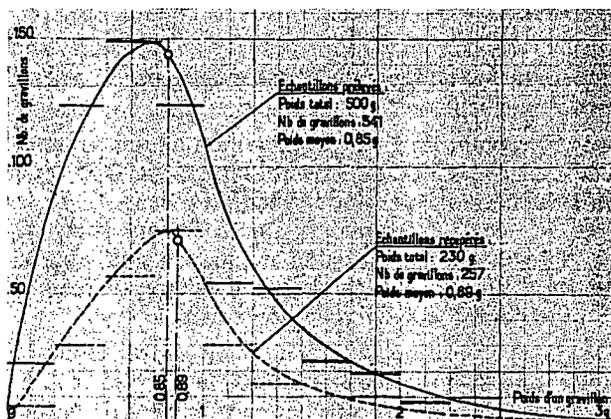


Figure 11 - Granulométrie des gravillons.

La vitesse ne semble pas, par contre, affecter la granulométrie des éléments projetés. Le poids moyen des gravillons récupérés sur les différents panneaux est de l'ordre de 0,8 g pour la première campagne d'essais et de l'ordre de 0,5 g pour la deuxième. Le gravillon le plus lourd pèse 3,9 g. La répartition détaillée de l'échantillon prélevé dans la première campagne est donnée sur la figure 11 et le tableau I. Elle est très voisine de celle d'un échantillon de référence prélevé sur la route, qui est également indiquée sur la figure 11. Il semble donc que les projections intéressent toute la masse des gravillons, sans opérer de sélection selon la granulométrie.

Tableau I. — Répartition des gravillons récupérés durant la première campagne d'essais.

Poids en grammes	Nombre de gravillons
0,00 à 0,25	6
0,25 à 0,50	30
0,50 à 0,75	57
0,75 à 1,00	75
1,00 à 1,25	29
1,25 à 1,50	15
1,50 à 1,75	23
1,75 à 2	10
2 à 2,25	8
2,25 à 2,50	3
3,50 à 4	1
Nombre de gravillons récupérés : 257 Poids total des gravillons : 230 g. Poids moyen d'un gravillon : 0,89 g. Poids du gravillon le plus lourd : 3,9 g.	

2. Projections latérales

Dans la classification adoptée pour les projections directes, nous avons admis l'existence de projections émises dans un plan perpendiculaire à l'axe du véhicule. En fait, si les photographies en suggèrent l'existence, il est plus difficile d'en obtenir une confirmation directe par l'examen des films. Peu de trajectoires ont pu être enregistrées, d'abord parce que le nombre de gravillons projetés latéralement est lui-même faible, ensuite parce que les conditions de prises de vues n'ont pas toujours permis de réaliser des films suffisamment nets. Enfin l'instant précis de la libération du gravillon est malaisé à observer en raison du manque de contraste des clichés.

Pratiquement, pour mettre en évidence les projections latérales, il est nécessaire de contrôler les conclusions suggérées par l'analyse de films en les comparant à celles qui se déduisent de l'examen des panneaux latéraux de récupération.

Supposons a priori que le gravillon ait une trajectoire dont la trace sur le sol soit perpendiculaire au plan

de la roue dans un système d'axes liés au véhicule (voir plan 10. a). Dans ce cas, en l'absence de toute autre force que celle qui lui a donné son impulsion initiale, sa trajectoire sera confondue avec la trace du plan vertical passant par l'axe de la roue, et son point d'impact P sera confondu avec O' (fig. 12 a).

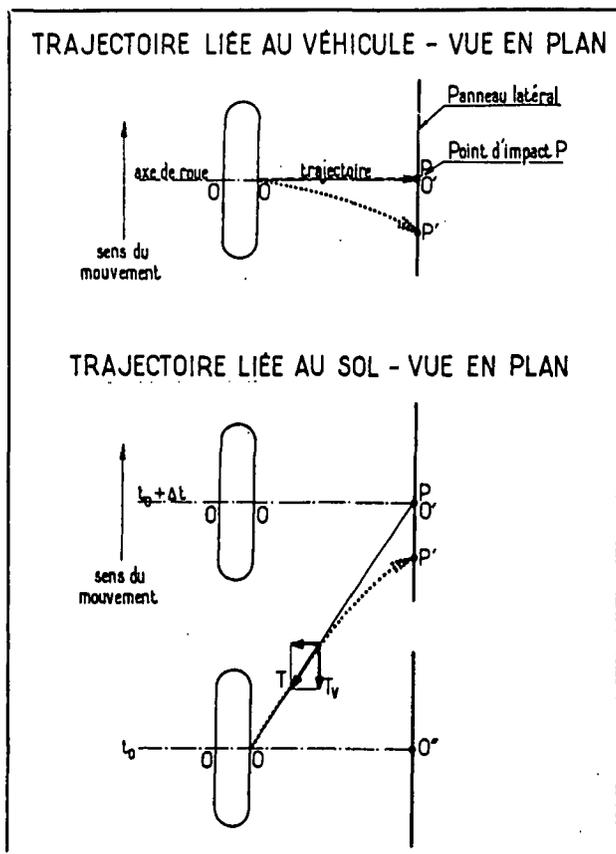


Figure 12 (a et b) - Schéma de la trajectoire des projections latérales.

En fait, par rapport à des axes immobiles (fig. 12 b), le gravillon est animé d'une vitesse dont la composante parallèle à l'axe de la route est voisine de celle du véhicule. La résistance de l'air dans lequel il se déplace est donc loin d'être négligeable; la composante T_v de cette force aérodynamique parallèle au mouvement du véhicule et dirigée vers l'arrière, incurve la trajectoire du gravillon (tracés en pointillés sur la figure n° 12) de telle sorte que son point d'impact sur le panneau latéral vient en P', à l'arrière de O'.

Bien que la traînée aérodynamique des gravillons ne puisse être calculée avec précision, la position des points d'impact déterminée expérimentalement est compatible avec l'hypothèse que certains gravillons sont projetés dans un plan perpendiculaire à la roue, dans un système lié au véhicule.

Malgré les réserves exprimées au début de ce chapitre, la projection au ralenti des films obtenus avec

la caméra à poste fixe, en position immobile ou en maintenant le véhicule dans le viseur, permet de confirmer cette première conclusion et de préciser les différents paramètres définissant la trajectoire-type

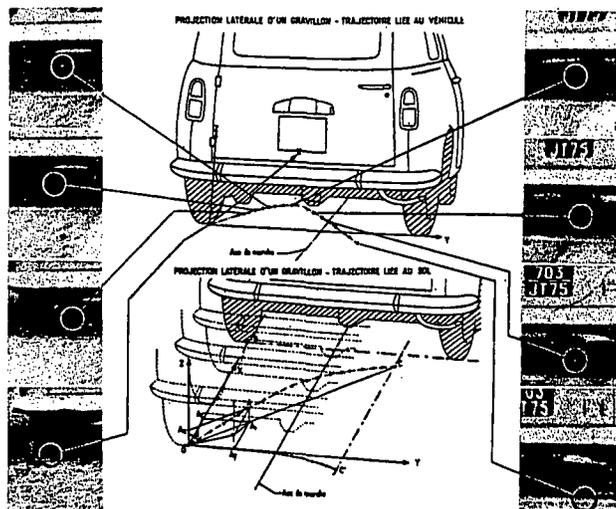


Figure 13 - Relevé expérimental de la trajectoire des projections latérales.

des projections latérales. La figure 13 (partie inférieure) montre le relevé sur l'écran d'une telle trajectoire, tracée dans un système d'axes liés au sol. Le relevé est, bien entendu, en perspective.

Le schéma supérieur de la même figure montre la trajectoire du gravillon, tracée dans un système d'axes liés au véhicule. Quelques photos témoins tirées du film illustrent cette trajectoire.

Sur le relevé de la figure 13 on a représenté les axes d'un trièdre trirectangle oxy de référence défini comme suit :

- Origine O étant le point de départ du gravillon.
- Axe ox , dans le plan de la route parallèle à l'axe de la route et dans le sens du mouvement.
- Axe oy , dans le plan de la route et perpendiculaire à ox .
- Axe oz , vertical perpendiculaire au sol (plan oxy) en o.

L'échelle sur les différents axes est donnée par des repères pris sur la voiture (vitesse du véhicule, son empattement, hauteur du pare-choc) et par la vitesse de déroulement du film.

Soit C le point de chute du gravillon au sol. La projection sur le sol de sa trajectoire est donc OC. Dans un système d'axes en mouvement, C vient en C' tel que CC' égale OB représentant le chemin parcouru par la voiture. On constate immédiatement que C' est en arrière de Oy, axe perpendiculaire au plan de la roue comme on l'a vu précédemment.

Soit A une position du gravillon sur sa trajectoire tel que l'arc OA puisse être assimilé à une droite et A' la projection de A sur le sol. Les coordonnées de A sont A_x, A_y, A_z représentées sur la figure 13. Elles peuvent

être calculées par référence aux échelles portées sur le graphique :

$$\begin{aligned} A_x &= 40 \text{ cm} \\ A_y &= 29 \text{ cm} \\ A_z &= 12 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Connaissant les coordonnées du point A, on peut calculer également la vitesse initiale du gravillon. Toujours dans le cas étudié, on a trouvé que la vitesse moyenne du gravillon pendant les cinq premières images, soit pendant $5/80$ s était de l'ordre de 15 m/s . La vitesse du véhicule était au moment des prises de vues de l'ordre de 50 km/h , soit 14 m/s . On peut donc dire que la vitesse moyenne du gravillon est légèrement plus grande que celle du véhicule.

Il est possible également de mesurer l'angle formé par la trajectoire du gravillon avec le plan de la roue.

Dans ce cas particulier, on a trouvé $\theta = 78^\circ$ avec la verticale. Cet angle peut varier considérablement comme le prouve la position des points d'impact relevés sur les panneaux mobiles et fixes. Les variations sont liées aux conditions de projection des gravillons et à la vitesse du véhicule. Voici, en effet, les observations faites sur le panneau latéral fixé au véhicule, à 30 cm du bord extérieur de la roue, au cours d'essais à vitesse croissante.

Vitesse inférieure à 50 km/h

On relève quelques gravillons très dispersés situés en arrière de l'axe de la roue et à des hauteurs faibles d'environ 30 cm .

50 km/h

La projection de gravillons devient importante et s'étend très largement à l'arrière de la roue.

60 km/h

La forme de la projection est donnée sur le schéma joint (fig. 14). Les gravillons atteignent le panneau à 20 cm en arrière de l'axe de la roue, à 80 cm de hauteur (fig. 15).

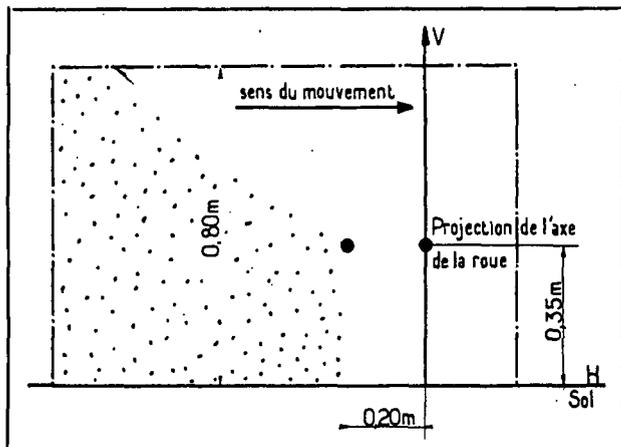


Figure 14 - Schéma de répartition des projections latérales sur le panneau de récupération lié au véhicule.

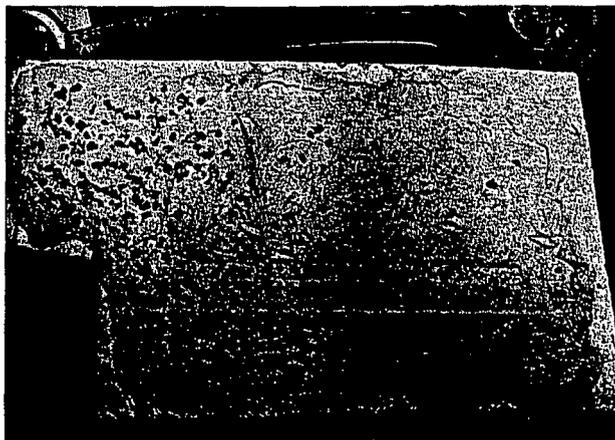
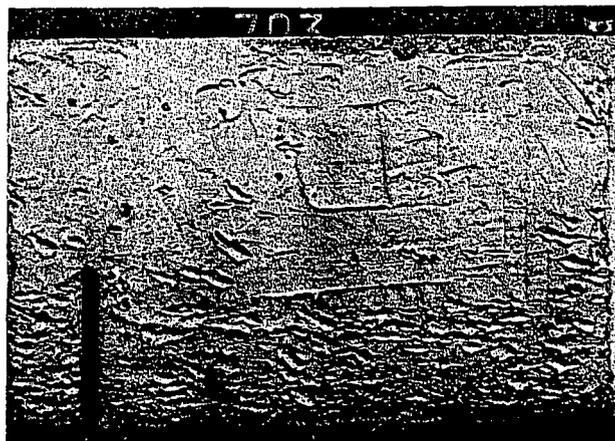


Figure 15 - Répartition des projections latérales :
En haut : vitesse : 60 km/h En bas : vitesse : 70 km/h .

70 km/h

La forme de la projection est identique à la précédente, mais la densité est plus grande surtout dans la zone inférieure (fig. 15).

Parallèlement, des relevés ont été effectués sur le panneau monté sur le bord de la route. Les chiffres donnés ci-dessous se rapportent à une longueur de panneau de 1 m et à 6 passages.

- $V = < 50 \text{ km/h}$:
Aucune projection.
- $V = 50 \text{ km/h}$:
1 gravillon à 20 cm du sol.
- $V = 60 \text{ km/h}$:
5 gravillons dont 1 à 75 cm du sol.
- $V = 70 \text{ km/h}$:
4 gravillons dont 1 à 80 cm du sol.
- $V = 80 \text{ km/h}$:
9 gravillons dont 3 à 95 cm du sol.
- $V = 90 \text{ km/h}$:
6 gravillons dont 2 à $1,10 \text{ m}$ du sol.
- $V = 100 \text{ km/h}$:
12 gravillons dont 2 à $1,50 \text{ m}$ du sol.
- $V = 110 \text{ km/h}$:
8 gravillons dont 2 à $1,25 \text{ m}$ du sol.

De ces essais il résulte donc que les projections latérales à grande distance ne prennent de l'importance qu'au-dessus de 50 km/h et qu'à ce moment 1 à 2 gravillons par mètre parcouru sont projetés à une hauteur et à une distance suffisantes pour atteindre un pare-brise. La hauteur exprimée en cm à une distance de 1,20 m de la roue est sensiblement représentée par le même nombre que la vitesse du véhicule exprimée en km/h.

En rapprochant les résultats des différentes méthodes d'observation, on peut reconstituer approximativement le schéma des projections latérales : projections très denses atteignant environ 50 cm de hauteur et 1 m de part et d'autre de la route; au-dessus et au-delà, la densité des projections diminue rapidement. Mais étant donné que nous avons observé des gravillons à 1,5 m du sol, nous pouvons admettre que certains d'entre eux, 2 pour 6 passages ou encore 1 tous les 3 m, peuvent atteindre une hauteur supérieure à 1 m à une distance de 1,20 m de la roue projectrice et ceci pour des vitesses de circulation supérieures à 70 km/h. En dessous de cette vitesse, il ne semble pas qu'un gravillon puisse atteindre une hauteur suffisante pour frapper un pare-brise.

La granulométrie des projections latérales ne semble pas différer de celle des projections longitudinales, ni de celle des gravillons répandus sur la route. Mais, au total, leur importance est bien moindre que celle des projections longitudinales; le poids des gravillons récupérés sur le panneau latéral lié au véhicule ne dépasse pas 250 g tous les 100 m parcourus, à une vitesse supérieure à 50 km/h, alors qu'il a été évalué à 1 kg pour les cailloux interceptés par le panneau arrière.

IV - FACTEURS LIÉS AUX PROJECTIONS

Les observations décrites précédemment font clairement apparaître l'influence de la vitesse du véhicule sur l'importance des projections émises. Elles montrent également que, les gravillons n'étant pas animés d'une vitesse appréciable parallèlement à l'axe de la route, l'énergie nécessaire au bris d'un pare-brise ne peut être fournie que par la vitesse du véhicule accidenté.

D'autres facteurs, que l'étude permet seulement d'entrevoir, doivent également être considérés. Ainsi en est-il de la structure des pneumatiques et de leur pression de gonflage : au cours des essais, on a pu observer que les véhicules lourds travaillant sur le chantier ne projetaient pratiquement pas de gravillons bien qu'ils eussent à rouler sur le revêtement fraîchement réalisé. Or on sait que leurs pneumatiques sont gonflés à haute pression et surtout que les sculptures de ces pneumatiques sont plus profondes et plus larges que celles des pneus à basse pression.

De ce fait, un gravillon qui peut s'insérer dans le pneu à basse pression ne peut que se coller sur le pneu à haute pression et, par suite, dans le premier cas, la

vitesse de départ du gravillon sera beaucoup plus grande que dans le deuxième. Ainsi les projections directes dues à la force centrifuge sont pratiquement inexistantes dans le cas du pneu à haute pression pour lequel il ne subsiste que le soulèvement dû à l'interaction pneu-sol.

D'autres facteurs sont liés aux caractéristiques des gravillons répandus et aux conditions du revêtement. L'importance des projections diminue évidemment avec la prise du revêtement et au fur et à mesure que le nombre de véhicules ayant circulé augmente : lors de la première campagne d'essais faite par temps frais et humide et avec une circulation faible, les projections étaient encore notables 48 h après la pose du revêtement; bien que très faibles et non utilisables pour nos essais, elles n'étaient pas encore nulles 5 jours après le répandage. Par contre, dans la deuxième campagne pour laquelle les conditions de pose étaient plus favorables (temps sec et chaud) et la circulation relativement importante, les projections étaient pratiquement nulles 48 h après la pose. Les différences de granulométrie peuvent d'ailleurs expliquer en partie ces variations.

La granulométrie, précisément, est un facteur important sinon de la densité des projections, du moins de leur nocivité. Sur le premier point, les essais effectués n'apportent pas d'éléments décisifs : ils ont donné des résultats comparables au cours des campagnes successives alors que le calibrage des gravillons était différent (8-15 et 3-8). L'importance des projections était du même ordre dans les deux cas. Il convient toutefois de signaler que des observations directes faites sur des routes gravillonnées avec un calibre plus petit ont paru donner naissance à des projections peut-être aussi fournies, mais retombant plus rapidement.

La nocivité des gravillons projetés est liée à leur masse et à la courbure de leurs arêtes. Au cours des épreuves de réception, les verres pour pare-brise sont soumis à un essai de rupture dans lequel une bille de 3 mm de diamètre tombe sur l'échantillon d'une hauteur déterminée. La rupture ne doit pas se produire pour une hauteur de chute inférieure à 0,75 m. En assimilant les gravillons à des cailloux sphériques, on trouve que l'énergie communiquée à un gravillon moyen de calibre 3-5 est environ 20 fois plus petite que l'énergie minimum correspondant à l'essai de réception. Elle est encore 5 fois plus petite dans le cas d'un gravillon 8-15. Mais les échantillons prélevés dans les stocks de gravillon à répandre contenaient aussi des gravillons d'un poids voisin de 4 g ayant encore les caractéristiques dimensionnelles du gravillon de 8-15 et il est vraisemblable qu'il s'y trouvait des gravillons d'un poids encore plus élevé, le Cahier des Charges admettant une tolérance de 3 % par rapport aux limites spécifiées. De tels gravillons peuvent avoir une énergie suffisante pour briser un pare-brise.

D'autre part, ces comparaisons supposent que les gravillons sont parfaitement sphériques. En réalité ils présentent des arêtes vives dont le rayon de courbure est inférieur à celui de la bille utilisée dans les essais de réception. Des relevés effectués au projecteur de profil ont montré que les rayons de courbure des arêtes des gravillons varient dans de grandes proportions. Des rayons de courbure de l'ordre de 2/10 de mm sont néanmoins fréquents. En reprenant alors les essais de rupture avec des billes de diamètre décroissant on trouve que pour une bille ayant la même courbure que les gravillons, la hauteur de chute nécessaire au bris de l'échantillon est seulement de 0,20 m. L'énergie disponible est 16 fois plus petite que dans l'essai normalisé. On voit donc dans quelles conditions la rupture du pare-brise par des gravillons est possible, même à des vitesses relativement réduites : il suffit qu'un gravillon touche le pare-brise par une pointe.

Toutefois, la probabilité pour qu'un gravillon d'un poids suffisant frappe un pare-brise dans une position favorable à la rupture reste faible et ne peut expliquer la totalité des ruptures de pare-brise constatées sur les routes fraîchement gravillonnées. Il est vraisemblable que dans de nombreux cas un affaiblissement général ou localisé du pare-brise contribue à permettre la rupture par des gravillons ayant une énergie faible. Cet affaiblissement peut être provoqué de différentes manières et notamment dans les cas suivants :

— Affaiblissement local, par exemple zone de séparation de trempe dans le verre BISECURIT ou défaut de construction.

— Contrainte permanente due au montage ou à une déformation de la carrosserie par un choc.

— Contrainte dynamique due au mouvement des roues et à la carrosserie ou au travers de la suspension.

— Contrainte due à des dilatations de carrosserie. Il ne nous a pas encore été possible de vérifier systématiquement ces différents points, mais cependant nous indiquerons qu'une enquête nous a permis de constater que plusieurs conducteurs ayant vu leur pare-brise se briser ont reconnu que le véhicule avait été accidenté peu de temps auparavant.

CONCLUSIONS

En résumé, il apparaît que les ruptures de pare-brise par des projections de gravillons impliquent la contribution de nombreux agents : — celle, d'abord, des conducteurs, qui choisissent la vitesse de leur véhicule. De cette vitesse dépend la densité des projections, pour le véhicule « émetteur », et l'énergie de choc, pour le « véhicule-récepteur ». C'est sur cette influence de la vitesse que les essais conduisent aux conclusions les plus précises, qui seront reprises plus loin.

— celle, ensuite, des gravillons : leur masse intervient dans l'énergie du choc; leur degré d'acuité détermine des variations du niveau d'énergie nécessaire pour provoquer la rupture du pare-brise. Mais si l'absence d'arêtes vives est une qualité de ce point de vue, elle a des conséquences fâcheuses pour la glissance de la chaussée.

— celle, enfin, du véhicule. Les caractéristiques des pneumatiques, la position des roues sous la caisse de la voiture sont des facteurs qui agissent directement sur les projections; d'autre part l'état de tension du pare-brise lui-même, lié par exemple à la température et aux déformations du véhicule, commande sa susceptibilité aux chocs.

En définitive, c'est le conducteur, qui, de tous ces agents, est le plus adaptable. C'est à son usage que sont ici résumés les faits qui le concernent le plus directement :

- 1) Contrairement à ce qui est généralement admis, les gravillons ne sont pas projetés en arrière du véhicule, mais soulevés verticalement avec une tendance à décrire une trajectoire dans le sens de la marche du véhicule. Ceci implique que, seule la vitesse du véhicule suiveur peut apporter l'énergie nécessaire au bris de son pare-brise par un gravillon soulevé par le véhicule le précédant.
- 2) La distance de projection ou plus exactement la distance parcourue par la voiture pendant la durée du soulèvement du gravillon est de l'ordre de 20 à 25 m pour les projections arrière et de 2 à 3 m pour les projections latérales.
- 3) La hauteur des projections arrière et latérale dépasse 1 m à partir de 60-70 km/h.
- 4) La qualité des gravillons ne semble pas avoir d'importance sur les projections tout au moins dans la gamme des granulométries étudiées.
- 5) Les gravillons projetés ont une granulométrie moyenne, identique à celle des gravillons constituant le revêtement.
- 6) La quantité totale de gravillons projetés est de l'ordre de 30 à 40 kg par kilomètre parcouru, à la vitesse de 60-70 km/h.

On peut donc, d'après ces essais, définir une zone « dangereuse » autour d'une voiture en circulation sur une route fraîchement gravillonnée. On admettra a priori qu'un gravillon peut être dangereux s'il atteint une hauteur supérieure à 75 cm, hauteur minimum de la base d'un pare-brise actuel. Dans ces conditions, la zone dangereuse peut être considérée pratiquement comme nulle pour des vitesses inférieures à 50-60 km/h, au-dessus, elle s'accroît progressivement pour atteindre 2,5 m de part et d'autre du véhicule et environ 25 m en arrière pour des vitesses de l'ordre de 100 km/h.

*

SUMMARY

The purpose of the study is to determine how gravels are projected by vehicles passing on the road and can break the windshield of following vehicles. Cameras have been used to record the trajectory of the gravels. In addition, pebbles have been collected on boards coated with glue, which were attached to the back and the side of the car or erected on the edge of the road. Some pebbles deviate from their direct trajectory, after hitting some part of the vehicle. Their study has not been attempted. The main direct projections fall into two categories : gravels are rushed out behind the wheel or their are ejected sideways.

In a system of axis linked to the moving vehicle, rear projections are contained in an angle of about 20 degrees. Their speed is equal to the vehicle speed. Therefore, in relation to the ground gravels jump vertically.

Side projections seem perpendicular to the wheel. Here again their speed, which compares with the speed of the vehicle, has no component parallel to the road axis.

In both cases it can be shown that the amount of energy required to break a windshield is provided by the speed of the following vehicle. This amount may be less than required for glass tests : pebbles have sharp angles whose curvature is much less than the radius of the standard ball used for such tests. Internal tensions in the windshield may also locally weaken its resistance.

For practical purposes, it is possible to define a zone of danger around a vehicle speeding on a newly gravelled pavement. Such zone is non-existent for speeds less than 30-40 mph. It extends as far as 8 feet sideways and 75 feet to the rear of the car when the speed reaches 65 mph.

*

