

UNIVERSITE DE LIEGE.

---

*COURS DE CONSTRUCTIONS DU GENIE CIVIL.*

N° 26

---

**Les effets dynamiques de la circulation  
routière sur les immeubles.  
Leurs causes et leurs remèdes.**

par

F. CAMPUS,

Ingénieur A. I. Lg., A. I. Br. et A. I. M.,

Professeur, Directeur du Laboratoire du Génie civil  
de l'Université de Liège.

---

RAPPORT

*présenté au Troisième Congrès Belge de la Route*

Bruxelles — Septembre 1935.

---

# **LES EFFETS DYNAMIQUES DE LA CIRCULATION ROUTIERE SUR LES IMMEUBLES LEURS CAUSES ET LEURS REMEDES**

PAR

F. CAMPUS.

---

Le développement de la circulation pondéreuse et rapide sur les routes a, par ses conséquences constatées, posé une multitude de problèmes techniques et économiques, dont les solutions sont encore en pleine élaboration et évolution et qui continuent à entretenir la remarquable activité des spécialistes de la route renaissante. Dans le domaine de la voirie urbaine et suburbaine, les dégradations d'immeubles sous l'effet de la circulation automobile lourde et intense ont, depuis une vingtaine d'années, retenu l'attention à juste titre. Tous les aspects de la question sont de première importance.

Au point de vue économique, la valeur intrinsèque et le revenu des immeubles, accrus par l'activité des voies qu'ils bordent, sont menacés par les effets de cette activité. Le trafic, dont les intensités atteignent des maximums dans les agglomérations, constitue lui-même un facteur économique de premier ordre, qui trouve sa raison principalement dans les édifices dont il compromet l'existence ou, du moins, l'usage. Le nœud de la question réside dans la contradiction entre l'interdépendance étroite du trafic et de l'agglomération d'une part et les inconvénients de la circulation pour l'agglomération et vice-versa d'autre part. Cette contradiction se trouve d'ailleurs dans d'autres problèmes de voirie urbaine, tel par exemple celui de la réglementation de la circulation. La solution doit naturellement faire prévaloir le premier terme de la contradiction en s'attaquant au second; il ne pourrait y avoir de trafic dans un désert ni d'activité économique dans une agglomération interdite à la circulation. Je n'insisterai pas davantage sur cet aspect fondamental, non plus que sur certains autres connexes, touchant à la sécurité publique, à l'administration des villes, à l'hygiène et à l'agrément de la vie urbaine. Je me bornerai à peu près exclusivement au point de vue technique, qui peut seul apporter la solution satisfaisante définie ci-dessus.

Comme pour la plupart des problèmes posés par l'essor nouveau de la circulation routière, il s'agit essentiellement d'une nécessité d'adaptation. Les premières manifestations de la question étaient indubitablement les conséquences de l'imperfection des véhicules routiers, de la voirie et des immeubles riverains. Poser ainsi le problème, c'est indiquer sa solution et affirmer sa possibilité. Il est d'ailleurs apparent que son acuité a déjà subi une atténuation avérée. On a paré partout au plus pressé, en général par des mesures locales et fragmentaires. En inscrivant la question à son programme, le troisième Congrès belge de la Route a vraisemblablement voulu marquer qu'elle reste actuelle, mais qu'elle est suffisamment défrichée pour qu'une étude concluante puisse en être faite. C'est dans cet esprit que j'ai rédigé la présente communication, d'un point de vue assez général et dans le but de contribuer à l'élaboration de conclusions ou résolutions, dont je serais surpris qu'elles n'établissent pas des directives suffisantes pour notre pays, pour une longue période.

*Les réactions dynamiques du véhicule et de la route;  
l'énergie mise en jeu.*

Ce sont les causes actives des trépidations des immeubles et des dégâts qui peuvent en résulter.

Un véhicule qui circulerait sur une route idéalement lisse et indéformable, à vitesse constante, en mouvement uniforme, exercerait sur cette route des actions tangentielles et normales invariables, sans effets dynamiques. La seule déformation élastique ou réversible de la route suffirait déjà à faire naître, en principe, des effets dynamiques, en admettant même que cette déformabilité soit suffisamment faible pour ne pas altérer l'uni idéal de la route. En effet, en supposant le véhicule immobilisé dans une position instantanée, les actions qu'il exerce sur la route engendrent dans le terrain des pressions et des déformations dépendantes des propriétés de déformabilité du milieu.

Comme le véhicule se déplace, ce qui correspond au déplacement des zones d'action des forces de contact, les déformations et pressions internes qui en résultent se modifient avec ces déplacements et doivent donc donner lieu à des actions dynamiques, mettant en jeu les effets d'inertie de déformation du milieu.

Si les déformations sont faibles, au point d'être négligeables, ainsi qu'on l'a supposé ci-dessus, ces effets sont pratiquement inoffensifs, quoiqu'ils puissent être perceptibles, par exemple par

le frémissement d'objets métalliques légers, faisant office de résonateurs.

On conçoit que ces effets seraient, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus grands que la vitesse de déplacement du véhicule et son poids seraient plus élevés.

On conçoit aussi que les effets seraient d'autant plus prononcés que la déformabilité réversible du sol serait plus forte, faisant provisoirement abstraction des perturbations qui résulteraient dans l'uni de la route du fait des déformations. A ce point de vue, les terrains à la fois cohérents et déformables, contenant le plus souvent de l'eau sous pression hydrostatique, tels que les argiles, sont plus désavantageux que les terrains compacts ou meubles et secs peu déformables : roches, graviers, sables. Nous reviendrons plus loin sur ces caractères des sols.

Si, sur la même route idéalement unie, le véhicule précédemment considéré accélère ou freine, la situation se complique considérablement. Le mouvement varié du véhicule modifie la répartition dynamique des charges sur les essieux, ainsi que les réactions sur le sol. Si le véhicule est muni de ressorts élastiques, la partie suspendue est mise en oscillation. Des phénomènes analogues se produisent à tous les changements de courbure de la route en plan et en profil. Il en résulte une variation périodique des réactions des roues sur le sol.

Je me borne à ces indications sommaires, renvoyant pour plus de détails au rapport de M. W. C. D. Haarman, au IV<sup>e</sup> Congrès international de la Route, à Séville en 1923 (dont certaines formules sont à corriger, ainsi qu'il est exposé dans mon Cours de routes professé à l'Université de Liège et dans une étude de M. H. Hondermarcq, Ingénieur des Ponts et Chaussées, publiée en 1930 dans le Bulletin scientifique de l'Association des Elèves des Ecoles spéciales de Liège, n° 1) et à la belle étude de M. P. Puvrez (Contribution à l'étude de la suspension et de la tenue de route des véhicules, Bulletin de la Société belge des Ingénieurs et des Industriels, n° 4 et n° 5 de 1932).

Ces variations complexes des réactions du véhicule sur la route entraînent, par le mécanisme des déformations et des pressions précédemment défini, des effets dynamiques propagatoires susceptibles de se transmettre dans un certain rayon aux objets et constructions reposant sur le sol. Cependant, ces phénomènes seront aussi le plus souvent insignifiants, quoique perceptibles, et seront

influencés de la même manière que ci-dessus par les qualités mécaniques du sol.

On peut affirmer que si toutes les conditions étaient réalisées pour avoir une route idéalement unie et qui le reste sous les effets de la circulation, ce qui implique en tout état de cause un soubassement assez rigide, quels que soient les avatars du mouvement d'un véhicule et quels que soient son poids et sa vitesse, les effets dynamiques pouvant résulter des causes précitées, même perceptibles, ne pourraient affecter ni la sécurité ni le confort des immeubles riverains.

L'intensité fréquemment constatée des trépidations, allant jusqu'à produire de sérieuses dégradations, ne peut provenir que d'autres causes, qui sont le plus souvent les inégalités et les discontinuités des surfaces de roulement des routes, éventuellement combinées avec une déformabilité excessive du soubassement.

Il en résulte des réactions brèves, mais violentes, entre le véhicule et la route, qui sont des chocs et dont les effets sont multiples. Ils demandent à être examinés un peu plus longuement, en nous bornant d'ailleurs au point de vue qui nous occupe.

Comme il s'agit de phénomènes de vibration et de propagation d'ébranlements, il me semble que le facteur le plus synthétique à considérer est celui de l'énergie mise en jeu par ces phénomènes. La source de cette énergie réside dans le moteur du véhicule. L'expression la plus générale de la puissance instantanée nécessaire à un véhicule pour se mouvoir sur une route est

$$\rho \Phi = \left[ P f_1 + k \frac{P}{g} \gamma + \Lambda v^2 \pm P i + f_2 s P \varphi(v) \right] v$$

$\Phi$  désignant la puissance instantanée totale du moteur.

$\rho$  le rendement total à la jante.

$P$  le poids total du véhicule.

$f_1$  le coefficient de résistance à la traction sur route unie en palier.

$i$  l'inclinaison (positive en rampe, négative en pente).

$v$  la vitesse.

$g$  l'accélération de la pesanteur.

$\gamma$  l'accélération du véhicule.

$k$  un facteur numérique, peu supérieur à l'unité, tenant compte de l'inertie tournante des essieux.

$\Lambda$  le facteur global de la résistance de l'air du véhicule

$sP$  le poids non suspendu

$f_2 \varphi(v)$  le coefficient supplémentaire de résistance à la traction provenant des chocs dus aux inégalités de la route.

C'est ce dernier élément qui doit retenir notre attention.

Nous le rattacherons à la notion classique du coefficient de discontinuité ou de choc (voir Limasset, Cours de routes).

Si nous désignons par  $r$  le rayon des roues du véhicule, la vitesse angulaire de ces roues en cas de roulement sans glissement est  $\frac{v}{r}$  et le centre instantané de rotation du mouvement d'un essieu sur route unie est le point de contact de la roue et du sol. Le lieu de ce centre instantané de rotation est la trajectoire de la roue sur la route et, si celle-ci est unie, ce lieu est continu, le mouvement se fait sans choc. Toute aspérité ou toute discontinuité donne lieu à une discontinuité correspondante de la trajectoire du centre instantané de rotation; ce dernier passe instantanément d'une position à une autre à distance finie. Il en résulte un point anguleux dans la trajectoire du centre de la roue, un changement de direction de la vitesse de ce centre et une diminution de sa composante parallèle à la route.

Par conséquent, le choc entraîne une différence de forces vives proportionnelle à la différence des carrés des vitesses initiales et finales parallèles à la route. Comme ces vitesses sont entre elles dans un rapport simple, en vertu des relations géométriques résultant de la forme de la discontinuité de la route et en absence de déformation de contact entre la roue et l'obstacle, la perte de force vive peut s'exprimer pour chaque choc par  $\frac{\alpha}{2} \frac{s P}{g} \frac{v^2}{r^2}$

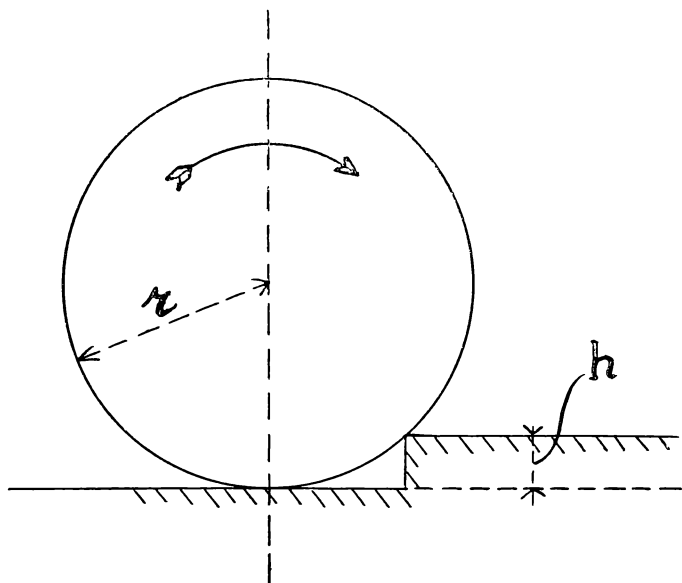
Il en résulte une résistance supplémentaire à la traction dont la valeur moyenne, pour un chemin parcouru de longueur  $l$ , s'exprime, en vertu du principe des forces vives, par

$$f_2 \frac{s P}{g} \varphi(v) l = \sum \frac{\alpha}{2} \frac{s P}{g} \frac{v^2}{r^2} = \frac{s P}{2 g} \frac{v^2}{r^2} \sum \alpha$$

d'où

$$f_2 \varphi(v) = \frac{1}{2g} \frac{v^2}{r} \frac{\sum \alpha}{lr} = \frac{\beta}{2g} \frac{v^2}{r}$$

$\beta$  peut être appelé coefficient de choc, de discontinuité ou de rugosité, c'est un coefficient sans dimensions. La justification de l'appellation de coefficient de rugosité se déduit aisément du cas théorique simple schématisé à la figure 1, de la roue indéformable rencontrant un obstacle indéformable et abrupt, de hauteur  $h$  mo-



dérée par rapport au rayon de la roue. Par des raisonnements de géométrie élémentaire, on trouve aisément que

$$\alpha = h (2r - h) = \sim 2rh$$

d'où

$$\beta = 2 \frac{\sum h}{l}$$

Le terme de résistance à la traction s'écrirait donc

$$f_2 \varphi(v) s P = \frac{\beta}{2g} \frac{s v^2}{r} P = b v^2 P$$

b dépendant de  $\beta$ , qui caractérise l'état de la route, et de  $\frac{s}{r}$  caractéristique du véhicule.

La résistance totale à la traction en palier, mesurable par expérience, s'écrirait

$$P [f_1 + f_2 \varphi(v) s] = (a + b v^2) P$$

C'est le type de formule le plus répandu. Il existe cependant aussi des formules du type  $(a + bv) P$ , notamment une des plus anciennes, dite de Boramé et Julien ( $a=0.025$ ,  $b=0.0007$  pour les empierrements et pavages anciens). C'est que, en réalité, les raisonnements géométriques et dynamiques simples exposés ci-

dessus sont altérés par la déformation due au choc, qui affecte surtout les jantes élastiques ou pneumatiques et diminue les pertes de force vive (le pneumatique boit l'obstacle). C'est pourquoi j'avais plus généralement introduit la fonction  $\varphi(v)$ . Cependant, d'après des expériences américaines, la formule  $(a + bv^2)P$  serait préférable. Des expériences faites sur une voiture électrique dans la Caroline du Sud auraient donné, pour des vitesses  $v$  comprises entre 24 et 40 km/h. :

Sur routes lisses en béton et en asphalte  $a=0.01$   $b=0.00$ ;

Sur routes empierrées  $a=0.012$  à  $0.013$   $b=0.0000028$  ( $v$  étant exprimé km/h., comme dans la formule de Boramé et Julien, les résistances dans la même unité que les poids des véhicules).

La puissance instantanée correspondante est  $(a + bv^2)Pv$  dont la fraction  $Pbv^3$  seulement correspond aux chocs. D'après la formule de Boramé et Julien, ce serait  $Pbv^2$ . Une partie seulement de cette énergie est transmise au sol sous forme d'énergie vibratoire et propagatoire; une fraction est en effet absorbée par les déformations et vibrations de toutes les parties du véhicule : bandages, ressorts, etc. On ne peut déterminer par expérience quelle est la part absorbée par la route. La question est aussi trop complexe pour pouvoir être résolue rationnellement.

L'exposé très schématisé qui précède montre indubitablement que le coefficient  $b$  dépend non seulement de l'état de la route, mais aussi du véhicule, notamment par l'action des pneumatiques, de la suspension et par le diamètre des roues.

L'action énergétique des chocs sera d'autant moindre que les bandages seront plus élastiques, que la suspension sera meilleure et plus importante et que les roues seront plus grandes. Elle sera d'autant moindre que la route sera plus unie. Elle augmentera suivant une puissance de la vitesse comprise entre le carré et le cube, c'est-à-dire d'une manière rapide. Un des facteurs essentiels est donc la vitesse.

D'après la formule de Boramé et Julien, la puissance totale mise en jeu par la rugosité sur un empierrement ou pavage ancien, à la vitesse de 50 km/h., serait 1.75 t.km par heure et par tonne de poids de véhicule, soit 6.5 c.v. par tonne. Pour un véhicule du poids total de 10 tonnes, on atteindrait 65 c. v., puissance appréciable, même si une partie seulement est absorbée par la route.

Dans les mêmes conditions, la formule américaine donnerait pour l'empierrement 1.3 c.v. par tonne, soit 13 c. v. pour un véhicule de 10 tonnes. Quoique ce dernier résultat paraisse plus vrai-



semblable, je m'empresse de faire observer que ces valeurs numériques ne sont citées que pour illustrer des ordres de grandeur. Si la formule de Boramé et Julien est surannée et établie vraisemblablement pour des vitesses plus modérées, la formule américaine, pas plus qu'aucune autre, ne peut prétendre à représenter par des coefficients *ne variètur* l'innombrable multiplicité des cas, qui ne peut se résoudre que par autant d'expériences.

Je me propose uniquement de mettre en évidence l'action des divers facteurs et de montrer que les énergies mises en œuvre sont certes appréciables, mais cependant modérées. C'est cette énergie qui, se propageant par le sol jusqu'aux immeubles riverains, en compromet l'usage confortable, éventuellement l'intégrité, la sécurité et la durée.

C'est elle qu'il importe de réduire au minimum pour obtenir la meilleure, la vraie solution.

A remarquer que cette solution est favorable non seulement aux riverains, mais aussi aux exploitants de la route, qui se maintiendra mieux, et aux exploitants de véhicules, qui dépenseront moins de carburant et dont les engins seront aussi ménagés.

Elle doit assurer la satisfaction générale, sous réserve qu'elle soit également favorable au point de vue du financement des routes.

### *Les inégalités des routes. — Leur enregistrement.*

On se préoccupe beaucoup, depuis quelques années, de relever d'une manière détaillée, les profils de la surface des routes, tant en long qu'en travers. Les renseignements qu'on en obtient servent à apprécier l'usure, la comparaison des bandages, l'adhérence, etc. Ils permettent aussi l'appréciation du coefficient de rugosité ou de discontinuité, par la somme des écarts indépendants par rapport à la surface moyenne, rapportée à une longueur déterminée de route (100 m. par exemple).

Les observations se font au moyen de *profilographes*, consistant essentiellement en une poutre assez rigide et assez longue qui sert de support à un palpeur vertical mobile, dont les déplacements horizontaux et verticaux sont relevés sur un tambour enregistreur. L'appareil enjambe la route s'il s'agit de relever des profils en travers; il s'appuie dessus s'il s'agit d'observer des profils en long.

Je n'insisterai pas davantage sur ces appareils, qui semblent bien mis au point et dont on trouve la description dans la plupart des traités modernes de routes.

On consultera aussi les travaux des Congrès internationaux de la Route; les bulletins de l'Association internationale permanente des Congrès de la Route et les travaux cités dans la bibliographie que l'on trouvera en fin du rapport. S'ils permettent une détermination directe des coefficients de rugosité ou de discontinuité de la circulation d'une section de route, ils ne donnent qu'un résultat plutôt indirect au point de vue des chocs et des effets.

Pour le but spécial de l'appréciation des effets dynamiques, il semble que l'on doive préférer une inscription de l'état de la surface de la route plus directement appropriée. On s'est servi de véhicules automobiles ou d'essieux remorqués susceptibles d'enregistrer le nombre ou l'intensité des chocs, séparément ou simultanément.

Ces équipements sont beaucoup plus complexes que les profilographes. Leur description n'est pas possible dans le cadre restreint de cette communication. Je renvoie à la bibliographie que l'on trouvera plus loin. Des appareils étaient visibles à l'Exposition de la Route, à Munich en 1934.

Les appareils les plus simples sont des compteurs de chocs. Ils peuvent être montés sur n'importe quelle voiture. Le « Viamètre » Maihak (Hambourg) est un compteur perfectionné qui totalise séparément les chocs différenciés par catégories d'amplitudes et indique les amplitudes maximum atteintes. On peut en déduire directement un coefficient de choc. Les professeurs Langer et Thomé, de l'Ecole polytechnique d'Aix-la-Chapelle, ont employé un dispositif plus compliqué, décrit dans un article publié dans un numéro spécial de Z. V. d. I. du 3 novembre 1928, consacré à l'automobilisme (voir bibliographie). Leur appareil a été mis au point par eux dans leur laboratoire d'automobilisme et de circulation routière.

Ces auteurs ont mesuré et étudié les chocs subis par les véhicules circulant sur les routes et les trépidations qu'ils communiquent au sol au moyen d'accéléromètres enregistreurs, construits spécialement par le laboratoire précité. Ces appareils comportent de petites masses pendulaires maintenues dans des positions de repos horizontales par des ressorts à tension réglée. Lorsqu'ils subissent de vives impulsions verticales par percussion, ils s'écartent de leur position de repos pour autant que l'impulsion subie

soit suffisante pour vaincre l'action du ressort (1). Ils interrompent ainsi un courant permanent et cette interruption produit le déclenchement d'un relais et une inscription sur une bande enregistreuse.

L'appareil comporte plusieurs accéléromètres doubles (impulsions positives et négatives) réglés pour diverses accélérations en progression arithmétique, et le nombre correspondant de styles inscrivant sur une même bande. Un chronographe inscripteur indique le temps.

Lorsque l'appareil subit un choc vertical, tous les accéléromètres réglés en vue d'une impulsion inférieure sont soulevés de leur contact et le choc est donc ainsi défini par une accélération comprise entre celles qui correspondent aux deux accéléromètres successifs dont l'un a bougé et l'autre est resté immobile. L'écart entre les limites peut être réduit par l'augmentation du nombre des accéléromètres.

Pour mesurer les chocs produits par les routes, on a utilisé un véhicule spécial à un essieu, remorqué par un camion. L'essieu porte des accéléromètres dont l'enregistreur est situé dans une cabine suspendue au véhicule, dont on peut faire varier les poids suspendus et non suspendus, les ressorts et les bandages.

Un tel véhicule, analogue à ceux utilisés par les compagnies de chemin de fer pour « ausculter » les voies, permet de comparer les divers revêtements de routes et de contrôler leur état d'entretien.

On caractérisera une route par le coefficient de choc mesuré pour une section de 100 m. par exemple. On trace une courbe caractéristique des accélérations des chocs (ordonnées) en fonction de leur fréquence (abscisses). On peut admettre globalement que les accélérations verticales sont proportionnelles aux amplitudes des saillies ou discontinuités indépendantes.

Le choc maximum peut être accidentel et ne peut donc servir de caractéristique. Au lieu de l'ordonnée moyenne (qui correspond au coefficient de discontinuité ou de choc précédemment défini), les auteurs proposent comme coefficient de choc l'accélération en  $\text{mm/sec}^2$  qui se produit 10 fois en un parcours de 100 mètres. Ils citent des observations faites sur diverses rues d'Essen, d'Aix-la-Chapelle et sur la piste d'essai de Brunswick.

---

(1) C'est le principe des accéléromètres de divers modèles imaginés par MM. Auclair et Boyer-Guillon, de l'Office national des Inventions, à Paris.

Les coefficients de choc sont très suggestifs et nettement favorables aux revêtements unis : béton asphaltique, tarmacadam, petits pavés, etc. Le béton ne paraît pas avoir été essayé à cette époque, mais bien dans des essais plus récents, avec des résultats très favorables.

Les résultats des mesures effectuées au moyen de ces appareils compliqués dépendent au premier chef des dispositions particulières et du mode d'emploi. Il faut donc des précautions scrupuleuses pour assurer la comparabilité et, finalement, la définition des conditions de mesure peut soulever de grandes discussions. Par le fait même qu'ils sont influencés par le mode d'emploi, ces appareils donnent des indications qui peuvent être plus caractéristiques de la réalité des effets dynamiques. Par l'intervention des pneumatiques et des ressorts, les très petites inégalités sont absorbées, les inégalités trop rapprochées ou non indépendantes ne sont pas séparées, mais enregistrées par un effet global; par contre les oscillations d'une certaine durée du véhicule et les effets de superposition ou d'interférences peuvent être enregistrés d'une manière propre, sans rapport avec des accidents correspondants de surface.

En d'autres termes, par suite de la complexité des phénomènes vibratoires dont un véhicule est l'objet, les courbes que l'on relève constituent une sorte d'interprétation dynamique de l'état de la route, qui n'est pas comparable en détail aux relevés d'un profilographe. Ce dernier appareil est donc beaucoup plus objectif, mais moins suggestif.

Par contre, les enregistreurs de chocs sont totalement arbitraires ou conventionnels et, de ce fait, discutables. Ces imperfections, inhérentes à la difficulté de la question, constituent vraisemblablement les raisons pour lesquelles ces appareils servent encore plutôt aux recherches qu'à l'inspection pratique.

La discontinuité des routes est, pour la plupart des revêtements modernes, liée à la déformation de ces revêtements, qui sont en général unis initialement. Les déformations réversibles ne sont guère à prendre en considération, ainsi que nous l'avons dit ci-dessus, sauf éventuellement pour une route peu perfectionnée construite sur un terrain tout à fait marécageux, ce qui exigerait d'ailleurs une construction toute spéciale et ne permettrait pas une circulation à la fois pondéreuse et rapide. Il y a lieu de considérer surtout les déformations d'usure et les défoncements.

Au point de vue du coefficient de discontinuité ou de choc, l'usure n'agit défavorablement que par son inégalité. L'auscultation d'un revêtement à divers âges permet, eu égard à la nature et à l'importance du trafic, de caractériser la plus ou moins grande uniformité de son usure. L'usure uniforme ne correspond pas nécessairement à une usure faible. Par exemple, les empièvements calcaires silicatés s'usent uniformément, mais assez considérablement, plus que des empièvements ordinaires en pierres dures, dont l'usure est très irrégulière (nids de poules). Quoique de nature différente, on peut assimiler aux déformations d'usure les ondulations de certains revêtements, qui favorisent d'ailleurs l'usure irrégulière ultérieure.

Les défoncements constituent des déformations permanentes sous l'effet des charges du trafic; ils proviennent de l'insuffisance de résistance de la fondation ou du sous-sol de la route. Ils donnent lieu à de grandes irrégularités (flaches), provoquant des chocs isolés considérables, dont les conséquences sont d'ailleurs une usure irrégulière ultérieure.

Ces déformations, comme les précédentes, peuvent être relevées périodiquement par des auscultations, ce qui permet un véritable contrôle objectif et enregistré de l'état des routes, en vue de leur entretien.

Parmi les discontinuités de la voirie urbaine, signalons les taques d'égouts et autres éléments analogues, les voies de tramways et surtout les aiguillages et les croisements de voies. La circulation des tramways sur ces appareils de voie engendre des chocs très importants, dont les effets sont aussi appréciables que ceux des véhicules automobiles lourds. Lorsque ces appareils produisent des irrégularités accusées de la surface de roulement, ils provoquent d'ailleurs aussi des trépidations intenses sous l'effet de la circulation des automobiles.

Toutes les expériences conduisent à la conclusion que le facteur prédominant pour l'intensité des actions dynamiques de la circulation est l'irrégularité des revêtements de routes, caractérisée par le coefficient de discontinuité ou de choc.

#### *La transmission des ébranlements par la route et le sol.*

Par les réactions multiples et interagissantes qui se produisent entre une route discontinue et un véhicule pondéreux suspendu, circulant à une vitesse assez grande, il se produit donc des effets dynamiques caractérisés par une irrégularité et une complication accusées.

L'énergie absorbée par la route et le sol s'y propage en ondes d'ébranlement, qui constituent à vrai dire de minuscules séismes.

On m'excusera volontiers, j'espère, de ne pas m'aventurer dans le domaine de la séismologie, dont je connais si peu que rien. Je me borne à évoquer cette science à dessein, pour me dispenser de plus amples commentaires sur la complication théorique et réelle des phénomènes dont le sol ébranlé est le siège. Ajoutez-y les effets de l'hétérogénéité de la route, du sol et de toutes les conditions du problème, qui ne sont même pas définissables en termes concrets.

Cela suffit, je pense, pour faire comprendre et admettre qu'on ne peut avoir une idée sommaire et globale des phénomènes que par la voie expérimentale. Des recherches et publications très importantes ont été faites à ce sujet en différents pays.

Parmi leurs auteurs, je citerai MM. Auclair et Boyer-Guillon en France, le séismologue de Quervain en Suisse, les professeurs Langer et Thomé en Allemagne, le Dr Ariano en Italie, etc. Pour plus de détails, je renvoie à la bibliographie. Je me référerai notamment aux observations communiquées par MM. Langer et Thomé dans le mémoire déjà cité.

Pour mesurer les trépidations, on a disposé des accéléromètres en bordure des routes et fait circuler divers véhicules pondéreux, à diverses vitesses et à diverses distances des appareils. On a constaté que les accélérations croissent *à peu près paraboliquement en fonction de la vitesse* pour un même véhicule et décroissent hyperboliquement en fonction de la distance. Les véhicules hippomobiles lents, de poids moyen, à bandages métalliques, causent les mêmes trépidations que les camions automobiles les plus lourds, à bons bandages élastiques, à 30 km. à l'heure. Les trépidations causées par les véhicules lourds à bandages pneumatiques, à 45 km. à l'heure, sont sensiblement inférieures aux précédentes. Les auteurs comparent leurs résultats à ceux d'observations séismographiques. Les résultats sont compatibles, mais il semble que l'emploi des accéléromètres soit préférable à celui des séismographes, qui enregistrent les déplacements de pendules. L'accélération s'en déduit par double différentiation et peut s'exprimer par une formule simple lorsque l'on admet que les déplacements périodiques sont sinusoïdaux. Mais, en réalité, ils ne le sont pas et l'on peut constater aisément que les harmoniques d'ordre élevé, malgré leur faible amplitude, peuvent augmenter considérablement les accélérations.

Les accélérations relevées sont comparables à celles de tremblements de terre assez destructeurs, mais les effets sont considérablement moins accusés, à cause de l'étendue très limitée de leur action et de la décroissance rapide des trépidations à partir de l'épicentre, correspondant à la faible énergie mise en jeu. Ces trépidations peuvent néanmoins être très désagréables et même causer des dégradations appréciables, quoique nullement comparables à celles des tremblements de terre.

Ces expériences et celles d'autres auteurs confirment grosso-modo les conclusions générales du raisonnement concernant l'influence de la vitesse et la signification caractéristique de l'énergie mise en jeu.

D'autre part, la décroissance hyperbolique en fonction de la distance correspond à la dispersion de l'énergie dans une masse rapidement croissante, ainsi qu'à un certain amortissement. Le facteur de dispersion est certes prédominant, mais il ne sera naturellement pas identique pour tous les types de routes; les revêtements monolithiques auront à ce point de vue des caractéristiques différentes de celles des revêtements à éléments isolés.

Dans les revêtements monolithiques, la rigidité interviendra également, non seulement au point de vue de la dispersion et de la transmission de l'énergie, mais aussi au point de vue de son partage entre le véhicule et le sol.

L'amortissement intervient dans une mesure qui dépend de la déformabilité et surtout du frottement interne du terrain. A ce point de vue, les terrains meubles secs non cohérents ou peu cohérents : sables, graviers, sont les meilleurs. Les fondations épaisses en enrochements, pierres cassées, graviers ou sables sont favorables. Les terrains rocheux compacts, les argiles, les terrains marécageux ou tourbeux, sont les moins favorables. L'eau sous pression hydrostatique dans les terrains est très défavorable; elle transmet instantanément les énergies communiquées, presque sans résistance. Dans ce cas, les effets peuvent se transmettre très loin, tandis que dans certains terrains meubles à grand frottement, ils sont éteints à très petite distance.

Une question controversée est celle de l'orientation et de la localisation des trépidations. On observe des accélérations verticales et des accélérations horizontales. Les expériences sont en désaccord au sujet de l'importance relative de ces composantes;

cela semble provenir surtout des conditions diverses d'expérience. Il y a même désaccord au sujet de la zone de transmission. Wittig estime que la propagation a lieu surtout en surface et s'atténue avec la profondeur, alors que, d'après des expériences anglaises, une excavation interposée entre l'épicentre et l'appareil d'observation serait sans influence.

Sans doute y a-t-il lieu de tenir compte encore ici des circonstances diverses de l'expérience. Il est très vraisemblable que, dans une route revêtue et surtout pour un revêtement monolithique, la transmission superficielle doit être privilégiée.

En toute hypothèse, l'épicentre d'un choc de circulation étant en surface, à l'aplomb d'un point voisin l'intensité des effets dynamiques doit décroître avec la profondeur. On n'a d'ailleurs guère effectué d'observations qu'en surface.

Un revêtement de route transmet naturellement mieux les vibrations qu'un sol meuble. Des jardinets séparant les maisons de la route atténuent donc les effets, autant par augmentation de la distance que par moindre transmission et plus grand amortissement.

Les observateurs sont d'accord pour constater que, dans certains cas, les vibrations peuvent rester perceptibles à d'assez grandes distances, surtout si elles sont entretenues. Les laboratoires de physique situés dans les grandes villes décèlent, par les instabilités de leurs appareils les plus sensibles, des trépidations incessantes, même la nuit, alors que les causes perturbatrices sont certes à grande distance.

Des observations faites au moyen d'un galvanomètre très sensible, placé sur un plancher en béton armé de l'Institut de Chimie et de Métallurgie, en construction au Val Benoit, à Liège, ont permis de déceler des frémissements au passage de trains, de tramways et d'autobus ou d'autos à plusieurs dizaines de mètres de distance, en dépit de la très grande rigidité de la construction et de sa fondation profonde. Ces effets étaient comparables à ceux de la marche normale d'un homme au voisinage immédiat de l'appareil et étaient d'ailleurs très faibles, mais perceptibles, par suite de la sensibilité extrême de l'appareil d'observation. Le terrain est aussi de nature marécageuse.

#### *Le véhicule, sa suspension et ses bandages.*

Nous avons vu que la vitesse est un facteur prédominant, dont l'effet est rapidement croissant. Cependant, cette croissance n'est pas toujours également rapide; l'exposant diminue au delà d'une



certaine distance et il est aussi moindre pour les bandages pneumatiques que pour les autres. D'autre part, les expériences ont été effectuées à des vitesses qui ne dépassaient pas 40 km/h. Il peut exister des régimes critiques de vitesse, réagissant d'ailleurs avec l'amortissement. Il n'est donc pas certain que les effets soient amplifiés aux très grandes vitesses.

L'action du poids est aussi imprécise. La partie non suspendue du poids agit d'une manière très variable, dépendant de la vitesse et de la flexibilité ainsi que de l'amortissement des ressorts. En d'autres termes, le poids suspendu est à peu près indifférent, si la capacité de déformation de la suspension et des bandages est suffisamment grande. L'importance de la suspension est ainsi évoquée; elle agit par sa déformabilité et son amortissement, c'est-à-dire sa capacité d'absorber des impulsions et de l'énergie.

La nature des bandages a fait l'objet des expériences les plus nombreuses, suscitées par les industries intéressées. Elles ont été suffisamment multiples et diverses pour pouvoir inspirer confiance; la plupart d'entre elles ont d'ailleurs été effectuées par des savants éminents et reconnus. Ces expériences et leurs résultats sont assez connus; je me borne à renvoyer pour plus de détails aux études citées dans la bibliographie. Il en résulte une supériorité incontestable des pneumatiques et des semi-pneumatiques sur les bandages pleins, ceux-ci devenant vraiment détestables et assimilables aux bandages ferrés lorsqu'ils sont fortement usés, de telle sorte que leur élasticité est quasi nulle. Les véhicules à traction hippomobile à jantes ferrées sont nuisibles autant que les autres véhicules à partir de la vitesse de 6 km/h.; les bandages pleins deviennent très défavorables à partir de la vitesse de 15 km./h. En résumé, l'élasticité des véhicules, suspension et bandages, est un facteur essentiel du problème.

#### *Les immeubles, leurs vibrations et leurs dégradations.*

Ces éléments de la question sont les moins définis. L'observation des vibrations des constructions est pleine de difficultés; on ne connaît pas la signification exacte des résultats. Les constantes propres des appareils, la manière de les disposer, beaucoup de facteurs influencent les résultats. Pour ce qui est des dégradations, l'élément subjectif est quasi inévitable et d'ailleurs, les définitions objectives font défaut. Pour pouvoir tirer un enseignement des constatations, il manque généralement un constat initial et un registre d'observations périodiques. L'influence des

vices cachés de la construction, des malfaçons, de la vétusté, du défaut d'entretien ou d'autres causes accidentelles, est indéterminable.

Les expériences concordent pour établir que les amplitudes des vibrations sont toujours très faibles, trop faibles semble-t-il pour endommager un édifice bien construit. Dans la plupart des édifices, on a constaté que la marche rapide d'un homme produisait dans les planchers des vibrations plus intenses que celles dues aux effets de la circulation.

Les mesures d'accélération verticales et horizontales ont souvent donné des chiffres considérables qui, d'après les échelles empiriques d'intensité des tremblements de terre, seraient très destructeurs, alors que les effets observés sont nuls.

Il n'y a évidemment pas de rapport à établir entre les données relatives aux tremblements de terre et les trépidations dues à la circulation; les amplitudes sont beaucoup plus faibles, l'énergie mise en jeu étant minime comparativement.

En réalité, il est peu probable que les trépidations dues à la circulation aient jamais pu entraîner la ruine complète d'un immeuble suffisamment stable par lui-même. Des fissures de murs, cloisons et dallages, des chutes de crépis, carrelages et plafonnages, des dérangements de menuiseries, canalisations, etc., peuvent être éventuellement occasionnés par les trépidations, sans que celles-ci en soient généralement les seules causes, mais le plus souvent ont contribué à ces effets avec des causes intrinsèques.

Les cloisons creuses légères, les hourdis creux sont assez exposés à ces accidents, de même que les planchers ordinaires, sur gîtages faibles ou vétustes; d'une manière générale les vieilles maisons, mal ou peu profondément fondées, imparfaitement liaisonnées dans leurs divers éléments : murs, planchers, escaliers, posés les uns sur les autres sans liaison autre que le frottement, ou de rares et précaires ancrages.

Toutes les solutions de continuité donnent lieu à des battements sous l'effet des vibrations, à des effets d'inertie et, à la longue, à des déformations. Les vibrations atténuent le frottement et affaiblissent les liaisons.

Les fondations profondes et solides sont favorables, de même que les zones de recul (jardinets devant les maisons) et les cours anglaises, eu égard aux observations précédentes relatives à la transmission par le sol. En Allemagne, certains bâtiments ont été isolés jusque près du niveau des fondations par des murs de sou-

tènement indépendants, séparant le bâtiment de tout contact avec le sol autre que par les fondations profondes.

Les vibrations les plus fortes devraient être observées dans les caves ou le rez-de-chaussée. Il n'en est pas toujours ainsi, certains planchers donnent des effets d'amplification. Par contre, les observations établissent une distinction nette entre les anciens immeubles, à éléments discontinus, et les constructions à ossatures et planchers monolithes, dont les vibrations sont faibles s'ils sont construits suivant les règles de l'art. L'acier et le béton armé concourent à ces constructions; l'on n'a pas observé les effets néfastes des trépidations sur la liaison des armatures du béton armé, que l'on avait craint autrefois, lors des premières expériences.

En résumé, un immeuble bien construit et résistant n'a guère à craindre de dégradations par les trépidations. Seulement, si l'état de la voirie et la nature du trafic sont tels qu'ils engendrent de fortes trépidations, il en résulte un désagrément considérable d'occupation et cet inconvénient est à lui seul assez grave pour justifier que les causes des trépidations soient supprimées. Certains dérangements peuvent avoir de graves conséquences : fuites de gaz, fissures de cheminées, court-circuits.

### *Principes à recommander*

#### *lors de la construction de nouveaux revêtements de chaussée.*

Je me place au point de vue suivant. Je suppose que les bandages pleins usagés sont proscrits, dans l'intérêt même de la circulation. Le but à réaliser est de permettre la circulation sans limitation de poids ni de vitesse qui ne soit exigée par des raisons inhérentes à la circulation elle-même. Les principes à recommander pour répondre à ce but sont très simples; ils réalisent l'absence de trépidations notables par suppression de leurs causes. Ces principes ont ceci d'avantageux, c'est qu'ils se confondent avec tous les principes modernes d'une bonne construction des routes et d'une bonne exploitation automobile, sans y ajouter de nouveaux desiderata.

Ces principes sont :

1° *Qualité excellente du sous-sol*, qui doit être résistant, perméable, sec, meuble à grand frottement. Si le sol n'a pas naturellement ces qualités, on fera un coffre profond, éventuellement de 1 m., que l'on remplira de cendrées, graviers, pierres cassées, gros sable, bien consolidés. Une telle préparation est notamment

recommandée dans l'argile, jusque sous les accotements (1). On veillera pour le moins à un drainage certain. Sur un terrain rocheux, une couche d'interposition meuble à grand frottement est aussi recommandable.

2° *Fondation inébranlable.* — Si c'est un enrochement, il faut lui donner une grande épaisseur, encore ne peut-on guère être assuré de sa stabilisation immédiate. Les fondations en béton seront d'épaisseur suffisante (20 cm. ou plus) et de qualité suffisante. Naturellement, tout est proportionné à l'importance et à la nature du trafic. Mais il y a lieu de se méfier de certaines fondations en béton maigre qui méritent à peine ce nom, si encore elles ne contiennent pas plus de terre que de chaux ou de ciment.

3° *Couche de roulement et d'usure unie et homogène, s'usant uniformément et ne se déformant pas.*

Beaucoup de revêtements modernes satisfont à ces conditions, quoique la perfection désirable exige beaucoup de précautions (ondulations des routes à liants plastiques, joints des routes en béton). Les routes monolithiques sont particulièrement adaptées, de même que les empierrements bien faits et bien enduits, si ce revêtement convient à la circulation. Les pavages doivent nécessairement s'adapter aux progrès des autres revêtements et rechercher une surface suffisamment unie, par la précision de la taille, la qualité de la roche, le soin de la pose et le rejointoyage au bitume ou au ciment.

Surface unie ne signifie pas surface lisse et glissante. Il y a des surfaces unies non dérapantes et rien n'est plus glissant que certains pavages à têtes de chat. Il faut que les revêtements restent unis en service, le plus longtemps possible et sans grands frais d'entretien, ce qui implique une qualité élevée et un entretien soigneux et permanent.

*Pour ce qui est des véhicules,* ils devront être bien suspendus et pourvus de bandages aussi élastiques que possible. Les poids et vitesses ne seront limités que d'après les besoins de la circulation ou la résistance de la route et des ponts. Les mêmes précautions que ci-dessus seront prises pour réduire au minimum les effets dynamiques sur les ponts.

---

(1) On évitera aussi de la sorte les dérangements de la route sous l'effet du gel, voir 4<sup>e</sup> Congrès international de la Route à Séville 1923, rapport de M. Dahlberg (Suède).

*En ce qui concerne les immeubles :*

1° Ils seront fondés inébranlablement et profondément;

2° Une zone de recul les éloignera assez de la voirie, ce qui réserve l'avenir en vue des nécessités éventuelles d'élargissement des chaussées;

3° Eventuellement, une cour anglaise ou un mur de soutènement isolera du sol les parois latérales des parties enterrées des bâtiments;

4° Les bâtiments seront autant que possible monolithiques; ils seront construits solidement et selon toutes les règles de l'art;

5° Les immeubles vétustes et amortis seront reconstruits d'une manière moderne.

*Solutions permettant d'atténuer les vibrations*

*sans dépenses notables dans le cas d'un revêtement existant.*

Il y a peu de choses à faire s'il s'agit d'une vieille chaussée raboteuse bordée de vieilles maisons, seul cas à considérer, car il englobe tous les autres et est à peu près le seul qui puisse correspondre au problème posé.

Il n'y a rien à faire aux immeubles, qu'à les reconstruire éventuellement. Mais ce n'est pas recommandable; c'est par la route que l'amélioration doit commencer. En ce qui concerne les véhicules, on peut limiter la vitesse, le poids et imposer la suspension et les bandages élastiques. Cela correspond à des charges notables pour les exploitants des véhicules.

En ce qui concerne la route, le mieux serait de la reconstruire selon les principes exposés précédemment. Mais cela ne se fera pas sans dépenses notables. Des dépenses modérées ne permettent rien de très durable : des tentatives de donner au revêtement un uni artificiel et temporaire, par des enduits hydrocarbonés, des tapis plastiques minces, des remplissages de joints de pavages. J'ai vu appliquer certaines de ces solutions en Belgique et à l'étranger; les effets n'en duraient parfois pas six mois. Il y a donc lieu d'envisager, dans le poste des dépenses, les facteurs durée, renouvellement et entretien. Je ne suis pas sûr que la reconstruction de la route ne sera finalement pas plus avantageuse, eu égard à l'importance du trafic. Il me semble que c'est une question de cas concret.

Pour terminer, j'exprime l'espoir que, d'année en année, l'importance du problème des trépidations des routes ira en diminuant suivant le rythme du progrès de la voirie urbaine et qu'il finira par n'être plus qu'accidentel.

---

## BIBLIOGRAPHIE.

- 1) LE GAVRIAN. — Les chaussées modernes.
- 2) Ing. D<sup>r</sup> RAFFAELE ARIANO. — La route et les transports routiers. — Libraire de l'enseignement technique L. Eyrolles, Paris 1933. (Ouvrage spécial excellent, très documenté, contenant une abondante bibliographie).
- 3) LANGER et THOMÉ. — Stosshaftigkeit von Strassen und Verkehrserschütterungen durch Strassenfahrzeuge (Z.V. d. I. 3-11-28).
- 4) Vibrations of roads and buildings, par J. A. HYDE et H. R. LINTERN. (Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 227. — Communication du 22-1-29).
- 5) E. MONTEIL. — Die Schweizerischen Untersuchungen der Bereifung von Motorlastwagen (Büchler & C<sup>o</sup>, Berne 1927). (Essais de de Quervain).
- 6) Sur l'usure des routes par les camions, par BONFILS (Annales des Ponts et Chaussées, Paris 1922, fasc. 3 et 5).
- 7) Bodenerschütterungen durch Kraftfahrzeuge, par ESSERS et KAPPES. (Automobilrundschau, 15-3-27).
- 8) Die zerstörenden Einwirkungen des Lastkraftwagenverkehrs auf die Gebäude, par WITTIG. (Verkehrstechnik, 2-12-30).
- 9) Les accéléromètres AUCLAIR & BOYER-GUILLON (Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, novembre 1921).
- 10) Les vibrations des routes et des immeubles au passage des véhicules lourds, par AUCLAIR & BOYER-GUILLON. (Recherches et Inventions, 1-5-25).

11) Strassenfahrbahn und Fahrzeug, par KNIPPING, GÖLZ & MITTMEYER. (Z. V. d. I., 30-12-33).

12) Messung der Stosshaftigkeit von Fahrzeugen, par LANGER & THOMÉ. (Z. V. d. I., 27-10-34). (Abondante bibliographie).

13) Schall- und Schwingungsdämmung im Hochbau. (Z. V. d. I., 22-4-33).

14) Gebäudeschwingungen durch Erdbeben und Verkehr (Z. V. d. I., 2-6-34).

---