

Titre : Recherches techniques et mathématiques sur les routes, les voitures et les attelages

Auteur : Courtois, C.

Mots-clés : Véhicules à traction animale ; Routes ; Véhicules hippomobiles

Description : 1 vol. (87 p.) ; 22 cm

Adresse : Paris : Librairie scientifique-industrielle L. Mathias (Augustin), 1850

Cote de l'exemplaire : CNAM-BIB 8 Le 104

URL permanente : <http://cnum.cnam.fr/redir?8LE104>

RECHERCHES
TECHNIQUES ET MATHÉMATIQUES
sur
LES ROUTES, LES VOITURES ET LES ATTELAGES.

PARIS. — IMPRIMERIE DONDEY-DUPRÉ,
Rue Saint-Louis, 46, au Marais.

Le 104

RECHERCHES

TECHNIQUES ET MATHÉMATIQUES

SUR LES

ROUTES, LES VOITURES ET LES ATTELAGES,

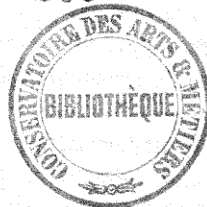
POUR SERVIR

à la solution de différentes questions relatives au roulage ;

PAR M. C. COURTOIS,

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSÉES

Directeur du Dépôt des Cartes et Plans du Ministère des Travaux publics



PARIS,

LIBRAIRIE SCIENTIFIQUE-INDUSTRIELLE

DE **L. Mathias** (AUGUSTIN)

15, QUAI MALAQUAIS

1850

AVANT-PROPOS.

L'industrie du roulage se rattache à tant d'intérêts, donne lieu à des questions si nombreuses et si variées, qu'elle fixe, depuis longtemps, l'attention du gouvernement et spécialement celle des ingénieurs et des savants. Comme cette industrie dépend en même temps des routes, des voitures et de la force motrice ou de celle des chevaux, on ne peut bien la connaître qu'en étudiant tout ce qui se rapporte à ces trois objets importants.

Dans ma longue carrière d'ingénieur, j'ai eu fréquemment à m'occuper de ces différents objets. Dans le cours de l'année 1845, j'ai déjà donné les moyens d'apprécier le travail que les chevaux peuvent faire en toute circonstance, sans excéder leur force ou sans altérer leur constitution, mais le défaut de loisir m'avait obligé de laisser à l'état de notes éparses les résultats d'une autre partie de mes recherches. Ayant pu de nouveau disposer de quelques instants, j'ai pensé qu'il pouvait être utile de coordonner et de publier les résultats qui se rapportent aux routes, aux voitures et à la force des attelages : tel est l'objet du travail que je présente aujourd'hui.

L'art de construire et d'entretenir les routes, pratiqué depuis les temps les plus reculés, semble avoir fait des progrès sensibles dans les trente dernières années; mais, il faut en convenir, les améliorations obtenues sont dues, en grande partie, à l'augmentation des fonds affectés annuellement à l'entretien des routes; en effet, ces fonds s'étant élevés de quinze à vingt-quatre millions, ont augmenté la puissance de bien faire et ont permis de donner à l'entretien des chaussées ces soins constants et réguliers

sans lesquels il n'est pas de bonnes routes. On trouve, d'ailleurs, consigné dans les anciens devis des états du Languedoc, et dans ceux des ponts-et-chaussées, les préceptes d'une saine pratique ; mais, après les invasions de 1814 et de 1815, lorsque les fonds d'entretien suffisaient à peine aux grosses réparations, on a bien été forcé de négliger l'application de ces préceptes. Vers 1828, ils paraissaient tombés dans l'oubli, lorsque M. Berthaux-Ducieux, alors ingénieur à Châlons-sur-Saône, est venu rendre aux procédés d'entretien toute leur importance ; depuis lors, l'augmentation successive du fonds d'entretien, la diminution du nombre des voitures pesantes, dans la direction des voies navigables et dans celle des chemins de fer, sont les causes qui ont surtout contribué à l'amélioration des routes.

Dans le travail que je vais exposer, j'ai eu souvent recours à l'ouvrage de M. Richard-Lowel-Edgeworth sur les routes et les voitures; le mémoire sur les routes et le roulage de M. Schwilgué, aujourd'hui inspecteur divisionnaire des ponts-et-chaussées, m'a fourni des données précises sur le poids des voitures et celui de leurs roues. J'ose espérer que ces recherches, tout incomplètes qu'elles sont, permettront de résoudre facilement différentes questions relatives au roulage : c'est dans ce but que nous leur donnons une publicité à laquelle elles n'étaient pas d'abord destinées.

RECHERCHES
TECHNIQUES ET MATHÉMATIQUES
SUR
LES ROUTES, LES VOITURES ET LES ATTELAGES,
POUR SERVIR À LA SOLUTION
DE DIFFÉRENTES QUESTIONS RELATIVES AU ROULAGE.

**I. DES ROUTES ET DE LEUR CHAUSSÉE, LEUR
CONSTRUCTION ET LEUR ENTRETIEN.**

1. Les routes en France constituent notre principal moyen de circulation.

Les canaux ouverts dans les trente dernières années ne sont pas encore assez fréquentés, ils ont d'ailleurs donné naissance à des produits dont le transport fait presque toute la valeur, en sorte que ces voies soulagent à peine les routes qui suivent la même direction.

Les chemins de fer en exploitation produisent déjà un effet sensible sur les routes qui suivent à peu près la même direction ; mais les nouveaux produits que font naître une circulation plus active et l'accroissement des richesses tendent à donner aux routes transversales un degré d'importance qu'elles n'avaient pas auparavant. La masse des objets à transporter par les routes, loin donc de diminuer, tend au contraire à s'accroître, et si plusieurs de ces voies sont soulagées, un plus grand nombre d'autres, longtemps sans importance, sont suivies par un rou-

lage actif apportant, soit aux canaux, soit aux chemins de fer, les produits que l'on peut transporter avec avantage sur chacun de ces nouveaux genres de communications.

Malgré l'amélioration et l'extension des voies navigables, malgré l'établissement des chemins de fer, les routes conserveront toujours une grande importance et leur conservation est un des objets les plus dignes de fixer l'attention du gouvernement. La recherche des mesures à prendre dans l'intérêt de la conservation des routes nous oblige d'entrer dans les détails qui vont suivre.

2. Une route, dans sa largeur, présente ordinairement une chaussée dans son milieu, accompagnée, de chaque côté, par une bande de terre, en sol naturel, que l'on appelle *accotement*; elle est ensuite bordée par des fossés ou par des talus, selon la hauteur du corps de la route au-dessus ou au-dessous du sol naturel.

Pour faciliter l'assèchement de la chaussée, on donne ordinairement à la route une forme convexe dont la courbure soit très-faible, car s'il est évident qu'un léger bombement facilite l'écoulement des eaux pluviales, on doit reconnaître que cet effet est limité et que la courbure ne peut jamais être assez forte pour qu'une ornière de 0,05 de profondeur puisse se vider spontanément. Le bombement, d'ailleurs, lorsqu'il est trop sensible, empêche une jante large de porter sur toute sa largeur et la réduit ainsi à la condition d'une jante étroite.

La surface d'une route doit donc avoir une courbure assez faible pour que les jantes des roues puissent s'y appliquer sur toute leur largeur. Mac Adam se borne à donner aux routes $1/66^{\circ}$ de pente trans-

versale, et il a reconnu que cette pente suffit généralement à l'écoulement des eaux.

Une légère pente longitudinale jointe à l'action du soleil et du vent, sont bien plus puissantes pour l'assèchement d'une chaussée, que l'effet produit par la faible courbure transversale qu'il est possible de donner aux routes; l'action du vent a surtout le double avantage de vaporiser l'eau en temps humide et d'enlever la poussière en temps sec.

3. Dans le sens longitudinal, il est nécessaire que l'inclinaison des routes ne soit pas supérieure à $3/100^{\text{es}}$ afin que l'effort du tirage n'excède pas la force des chevaux et que le même attelage, en réduisant sa vitesse, puisse continuer à traîner sur les rampes ou dans la montagne le véhicule qu'il traînait dans la plaine. Sur les rampes dont l'inclinaison est supérieure à $3/100^{\text{es}}$, on est obligé de donner du renfort à l'attelage; de plus, lors des pluies d'orage, les eaux ravinent les accotements et rendent ainsi l'entretien de la route plus difficile et plus dispendieux. L'intérêt du roulage et celui de la conservation des routes se réunissent donc pour proscrire les rampes d'une inclinaison supérieure à $3/100^{\text{es}}$.

4. La chaussée est une véritable fondation en maçonnerie d'une épaisseur assez considérable pour ne pas céder, en temps humide, sous la pression des voitures; elle doit par conséquent être composée de matériaux suffisamment résistants, non susceptibles d'être attaqués par la gelée ou d'être dissous par l'eau.

La largeur des chaussées varie en raison de l'importance de la route et du nombre des voitures qui peuvent s'y croiser en même temps.

Sur les chemins communaux, la chaussée peut être réduite à $2^{\text{m}},20$, sans de graves inconvénients.

Les chaussées à deux voies peuvent n'avoir que 4 mètres; mais pour une chaussée à trois voies, une largeur de 6 mètres est insuffisante; pour que trois voitures puissent se croiser facilement, la longueur des essieux oblige de donner 6^m,50 de largeur à la chaussée.

En France, sur la plupart des routes, les chaussées n'ont que 5 mètres de largeur, c'est trop pour deux voies et pas assez pour trois.

5. Les chemins de traverse, dépourvus de chaussée, sont impraticables pendant la saison des pluies et des neiges ou pendant tout l'hiver; mais ils se rétablissent fréquemment, dès le printemps, à l'aide du passage des voitures ou plutôt par l'action des roues. Ces chemins sont quelquefois tellement bons, pendant l'été, qu'ils rivalisent avec les routes et paraissent préférables pour les voitures légères; de ce fait résulte que, pendant les temps secs, les qualités d'une chaussée sont indépendantes de la nature des matériaux dont elle est formée, que ces qualités consistent uniquement à être *ferme et unie*. Plus une chaussée est ferme, moins elle oppose de résistance au roulage; plus elle est unie, plus le tirage est facile, plus le mouvement est par conséquent uniforme ou régulier.

On doit encore conclure de ce qui précède, qu'une chaussée, quelque bien construite qu'elle soit, n'est jamais aussi bonne que le sol naturel constamment sec; et que la condition la plus nécessaire au bon état d'une chaussée, consiste à être aussi sèche que la saison et les soins peuvent le permettre.

Si au-dessus d'un chemin en terre, non susceptible de se laisser pénétrer par les infiltrations, on établissait un toit pour mettre le sol à l'abri des

pluies, ce chemin sans chaussée, restant sec toute l'année, présenterait au roulage, à l'aide d'un faible entretien, une voie toujours facile et commode.

Les eaux pluviales et l'humidité dont le sol se pénètre, sont donc les causes qui obligent à recouvrir le sol par le massif en maçonnerie que l'on appelle une chaussée. Ce massif devant offrir au roulage, en toute saison, une surface unie et ferme, ne peut avoir ces qualités sans satisfaire à plusieurs conditions que nous allons faire connaître.

Pour que la surface de la chaussée resté unie en toute saison, il est d'abord nécessaire que les eaux pluviales ne puissent pénétrer dans le sol et le détrempent, ce qui rendrait la route impraticable, même aux voitures légères. Considérée sous ce rapport, la chaussée abrite le sol et fait office d'un véritable toit.

Comme la forme des chaussées dépend principalement de leur genre de construction, nous allons entrer à ce sujet dans quelques détails.

1. DE LA CONSTRUCTION DES CHAUSSÉES.

6. Les procédés de construction des chaussées ont souvent varié depuis 1720, époque où l'on a commencé à s'occuper sérieusement de l'amélioration des routes; mais aujourd'hui ces procédés se réduisent à quatre et donnent lieu à quatre genres différents de chaussées, qui sont :

Les chaussées en pavés, qui sur les routes nationales de France ont une étendue de 8,000 kilomètres;

Les chaussées d'empierrement, dites de Trésaguet, qui sont composées de différentes couches de pierres de grosseur inégale;

Les chaussées d'empierrement, dites à la Mac-Adam,

composées de plusieurs couches de pierres de grosseur sensiblement égale et de $0^m,04$ de côté au plus ;

Les chaussées en gravelage, composées de gravier, n'ayant jamais moins de $0^m,04$ d'épaisseur.

7. Tout le monde sait que les chaussées pavées sont composées d'une couche de pierres dures, reposant sur une couche de sable ou de gravier fin. Chaque pierre, ordinairement en grès, a la forme d'un cube ou d'un parallépipède rectangle dont l'épaisseur varie de $0^m,15$ à $0^m,22$, suivant l'importance de la route et le prix de cette nature de matériaux.

Les pavés sont posés régulièrement à joints contrariés dans le sens de l'axe, et de manière à former des bandes transversales légèrement bombées et aussi unies que possible.

8. Les empièremments ordinaires, ou suivant le système de l'ancien ingénieur Trésaguet, sont formés de pierres d'inégale grosseur ; ils se composent 1° d'une première couche de pierres irrégulières de $0^m,16$ à $0^m,20$ d'épaisseur, lesquelles sont posées sur le sol, par leur face la plus plane, de manière à présenter vers le haut des angles plus ou moins saillants, dont on remplit les vides avec des pierres cassées à la grosseur de $0^m,06$ à $0^m,07$ de côté ; 2° d'une seconde couche de $0^m,10$ d'épaisseur, en pierres cassées à la grosseur de $0^m,04$ de côté au plus ; 3° enfin, d'une couverture formée de débris de carrières, dont les dimensions soient assez faibles pour pénétrer dans les interstices des pierres de $0^m,04$. Chaque couche est d'ailleurs soumise à un certain nombre de passages d'un cylindre compresseur, afin de faciliter la liaison des matériaux et de rendre la chaussée aussi compacte qu'il est possible.

Ce mode de construction est à peu près l'inverse de celui des chaussées en pavés; car ici les grosses pierres reposent sur le sol par leur face plate, et sont recouvertes par les petites pierres, tandis que les pavés ont leur face en dessus et reposent sur une couche de sable ou de menus graviers.

9. Lorsque le sol est compacte et à peu près imperméable, on peut appliquer avec avantage le procédé que l'on doit à Mac-Adam; ce procédé consiste à construire la chaussée par couche de 0^m,08 à 0^m,40 d'épaisseur en pierres cassées d'égale grosseur et de 0^m,04 de côté au plus. Cette dimension de 0^m,04 de côté a l'avantage de réduire à 0^m,02 la plus forte saillie que puisse présenter la surface d'une chaussée, les roues des charrettes ayant généralement 1 mètre de rayon, une saillie de 0^m,02, ou de $\frac{1}{50}$ du rayon est franchie sans résistance sensible.

Pendant la confection de la chaussée, on a soin de soumettre chaque couche à un certain nombre de passages du cylindre compresseur, et, lorsque la dernière couche est posée, on a l'attention de la recouvrir de débris de carrière, de manière à faire disparaître les inégalités.

10. Lorsque les graviers sont les seuls matériaux que l'on puisse se procurer pour la construction d'une chaussée, on est bien obligé d'en faire usage; cela a même peu d'inconvénients lorsque les graviers sont très-durs ou très-résistants, comme le sont en général ceux d'une nature siliceuse; mais il faut éviter, autant qu'on le peut, de construire des chaussées en graviers calcaires, toujours très-menus, surtout lorsque ces chaussées doivent être suivies par le grand roulage; car nous ne tarderons pas à reconnaître que, pendant la mauvaise saison, il est impos-

sible de maintenir en bon état les chaussées en graviers calcaires.

41. En résumé, quel que soit le mode de construction des chaussées en empièchement, il est nécessaire que leur surface soit en toute saison unie et ferme ; on atteint sûrement ce but en composant la couche supérieure de pierres cassées à la grosseur de 0^m,04 de côté au plus, d'une nature sèche et non gélive, bien nettoyée ou sans mélange de terre, d'argile ou autre substance ayant de l'affinité pour l'eau. Cette couche étant recouverte de détritits et soumise au passage du cylindre compresseur, les pierres qui la composent se lient, s'agrégent de manière à former un massif compacte dont la surface unie et ferme devient impénétrable à l'eau. Si, de plus, le massif a assez d'épaisseur ou si le sol est à peu près imperméable, la chaussée ne peut plus être altérée par les vicissitudes du temps, et les dégradations qu'elle éprouve sont uniquement dues à l'action du roulage.

Les dégradations dont il vient d'être question, pour ne pas s'accroître dans un plus grand rapport que celui qui résulte de l'action du roulage, doivent être réparées par des soins constants et journaliers, qui font partie de l'entretien des routes dont nous allons nous occuper.

2. ENTRETIEN DES ROUTES ET DE LEUR CHAUSSÉE.

42. L'entretien d'une route comprend l'entretien du corps de la route et celui de la chaussée.

L'entretien du corps de la route consiste dans la réparation des accotements après chaque hiver, afin de leur rendre la forme plane et unie qu'ils doivent avoir, mais qu'ils perdent ordinairement dans la sai-

son des pluies, époque où le sol détrempe par les eaux, ayant perdu toute consistance, se laisse sillonner par les roues et conserve même l'empreinte du passage des animaux.

Cet entretien comprend en outre le curage des fossés qui sont nécessaires pour assurer l'assèchement de la route.

Les deux opérations dont nous venons de parler se font au commencement du printemps et occasionnent une dépense peu considérable qui dépend principalement des intempéries, de la nature du sol, de son exposition, et est à peu près indépendante de la fréquentation de la route.

13. L'entretien de la chaussée consiste à réparer les dégradations qu'y cause nécessairement le passage des voitures, et à la maintenir aussi unie et aussi sèche que faire se peut, et par conséquent à ne tolérer ni flaches, ni ornières, ni boue; cet entretien se réduit donc à enlever la boue et la poussière, et à combler avec de nouveaux matériaux les flaches et les ornières, à mesure qu'elles se forment.

Sur les chaussées pavées, il faut relever les pavés enfoncés et remplacer ceux qui sont usés ou détériorés.

Sur les chaussées en empierrement et en gravelage, il faut enlever les débris des pierres broyées et les remplacer par de nouveaux matériaux.

14. Depuis vingt ans les routes se sont sensiblement améliorées, en partie par le perfectionnement du procédé d'entretien, en partie par la suppression du poids énorme que le tarif de 1806 accordait aux voitures dont les roues avaient des jantes de 0,22 et 0,25; mais surtout par l'augmentation du budget d'entretien des routes et aussi par les transports con-

sidérables qui s'effectuent sur les canaux et sur les chemins de fer.

Après les invasions de 1814 et de 1815, et jusque vers 1825, les fonds affectés à l'entretien des routes étant à peine suffisants pour les grosses réparations, l'entretien journalier des chaussées était alors fort négligé.

En 1823, M. Cordier, dans l'ouvrage qu'il a publié à cette époque, faisait observer que les fonds affectés aux travaux des routes, étant bien au-dessous des besoins, servaient au rétablissement des parties détruites qu'on remettait à neuf, et que l'on renonçait ainsi à un entretien *régulier et journalier*, le seul économique et profitable.

En 1828, M. Berthaux-Ducreux, ingénieur en chef des ponts-et-chaussées, aujourd'hui en retraite, attira le premier l'attention des ingénieurs sur les améliorations dont le système d'entretien des chaussées était susceptible ; il a ainsi contribué, pour une bonne part, à l'adoption des procédés qui aujourd'hui sont appliqués avec succès sur les chaussées en empierrement. C'est lui qui a fait proscrire les répandages généraux, c'est lui qui a fait comprendre que des soins vigilants et journaliers pouvaient seuls maintenir les chaussées en bon état, et qu'il était par conséquent nécessaire d'augmenter le nombre des cantonniers, car avant lui ces ouvriers avaient des cantons trop étendus pour suffire à leur entretien.

Aujourd'hui que les canaux et les chemins ont rendu le roulage moins considérable, que les chaussées sont moins écrasées sous le poids énorme de quelques voitures, et que les fonds affectés à l'entretien des routes sont en rapport avec les besoins, il est plus facile de maintenir les chaussées en bon état.

15. Les chaussées éprouvent ou peuvent éprouver trois sortes de dégradations ; elles cèdent fréquemment, pendant la mauvaise saison, sous le poids des roues, et produisent les affaissements que l'on appelle *flaches* ; les pierres de la couche supérieure sont fréquemment écrasées sous la pression des roues, et finissent par produire les trous et les ornières que présentent les cantons négligés. Enfin les pierres de la même couche qui résistent à l'écrasement, sont usées à la longue par le passage des roues.

Les dégradations qui proviennent de l'écrasement des pierres, peuvent d'ailleurs devenir considérables par le passage d'un petit nombre de chevaux attelés à de lourdes voitures, car, depuis les travaux de Coulomb, on a reconnu que les dégâts occasionnés aux routes par les voitures pesamment chargées augmentent dans une proportion beaucoup plus forte que l'accroissement du chargement.

M. Cordier a constaté qu'une voiture chargée de 8,000 kil. a pu causer dans un jour des dommages qui se sont élevés à la somme énorme de 500 fr. En 1812, dans le département de l'Escaut, un convoi d'artillerie, pour le passage duquel on avait ouvert les barrières de dégel, par ordre de l'empereur, a causé, dans la traversée du département, un dommage évalué à 6,000 fr.

M. Tarbé, dans le rapport de la commission instituée en 1814, pour reviser le tarif des voitures de roulage, s'exprimait ainsi :

« On ne peut trop répéter que ce ne sont pas les » chargements modérés, quelque multipliés qu'ils » soient, qui défoncent les empierrements et boule- » versent les pavés, mais bien les chargements ex- » traordinaires de quelques voitures dont le poids,

» toléré par la loi existante, peut dépasser celui de
» douze tonneaux de mer. »

Il est vrai que des expériences faites avec soin, par M. Arthur Morin, colonel d'artillerie, prouvent que pendant les sécheresses de l'été, les dégradations produites par des chargements considérables sont à peine sensibles. On sait, en effet, que ce n'est pas pendant l'été que les forts chargements peuvent causer des dommages aux chaussées ; car, dans cette saison, un chemin de terre est souvent aussi bon qu'une route. Pour que des expériences de ce genre soient concluantes, il faut qu'elles aient lieu pendant la mauvaise saison, c'est alors qu'il faut opérer lorsque l'on veut apprécier les dégradations que les forts chargements occasionnent aux chaussées.

M. Morin a d'ailleurs reconnu que, dans l'intérêt de la conservation des chaussées, il convenait de limiter le chargement des voitures à 3,500 kil. par train. Cet habile expérimentateur a encore reconnu qu'un chargement est excessif lorsqu'il s'élève à 450 kil. par centimètre de largeur de la bande des roues.

16. Les quantités de matériaux qui, dans la période annuelle, sont usés, broyés ou détériorés par le roulage, dépendent certainement du nombre des voitures et de celui des chevaux qui passent sur la chaussée ; mais la somme de ces quantités n'est pas proportionnelle à la fréquentation, car elle dépend de la saison pendant laquelle circulent le plus grand nombre des voitures et surtout les voitures les plus pesantes. Pour un même nombre de chevaux attelés à des voitures uniformément chargées, les dommages seront plus considérables après un dégel que pendant les mois d'avril et de septembre, époque où la chaussée, sans être très-sèche, n'est

pas imprégnée d'humidité. La quantité des matériaux broyés peut d'ailleurs être considérable, à la suite du passage d'un petit nombre de chevaux attelés à des voitures pesamment chargées.

47. Les frais de l'entretien d'une chaussée résultent par conséquent de la quantité des matériaux usés ou détériorés par le passage des voitures, et lorsque les pierres ont de faibles dimensions ou sont d'une faible résistance, la quantité des matériaux broyés dépend plus du poids ou du chargement des voitures que de leur nombre.

Sur les chaussées en empièchement, les frais d'entretien sont évidemment proportionnels aux quantités de matériaux usés et broyés qu'il faut remplacer par de nouveaux matériaux afin que la chaussée conserve sa forme et son épaisseur; aussi est-ce à tort que quelques ingénieurs ont pensé que l'on pouvait diminuer la dépense en fourniture de matériaux en augmentant la dépense en main-d'œuvre, car lorsqu'une chaussée est bien entretenue, ces deux dépenses doivent être dans un rapport constant.

II. DE LA RÉSISTANCE QUE LES CHAUSSÉES DOIVENT OPPOSER AUX PRESSIONS QU'ELLES ONT A SUPPORTER.

48. Les chaussées doivent être construites pour résister aux pressions et même aux chocs qu'elles ont à supporter; or ces pressions tendent à produire deux effets distincts, car elles peuvent affaisser le massif, lorsqu'il repose sur un sol compressible, et elles usent et broient trop souvent les pierres qui forment la couche supérieure du massif.

Toute chaussée doit donc pouvoir opposer aux pressions et aux chocs exercés par les véhicules et leur attelage deux résistances distinctes : la première est la résistance propre du massif; elle dépend en même temps de la compressibilité du sol et de l'épaisseur de la chaussée qui, considérée sous ce rapport, est une véritable fondation sur laquelle l'édifice est roulant.

L'autre résistance dépend principalement du volume et de la nature des matériaux dont est formée la couche supérieure de la chaussée.

Ces deux résistances, qui sont indépendantes l'une de l'autre, varient avec les intempéries; car en temps sec, la résistance du massif paraît être illimitée, tandis que cette résistance s'affaiblit lorsque le fond se laisse pénétrer par l'humidité : de même les pierres de la couche supérieure de la chaussée s'écrasent moins facilement en temps sec, lorsqu'elles sont enchâssées et liées avec le massif, que lorsqu'elles sont imbibées d'eau et surtout lorsque la pluie et le dégel les ont totalement désagrégées.

Nous allons nous occuper de chacune de ces résistances et indiquer les moyens de leur assurer l'énergie nécessaire à la conservation de la chaussée.

1. DE LA RÉSISTANCE DU MASSIF.

149. La résistance du massif est ce que l'on peut appeler la résistance absolue de la chaussée, car lorsque la pression est assez forte pour la vaincre, le massif s'affaisse, puis se disjoint, et si la fréquentation continue, il se défonce, et la chaussée finit par être entièrement bouleversée. Les circonstances dont nous venons de parler ne se présentent en

France que sur d'anciennes chaussées abandonnées, car, sur les routes soumises à un entretien régulier, les mesures législatives prises jusqu'à ce jour, bien qu'insuffisantes pour assurer complètement la conservation des chaussées, servent cependant à prévenir leur bouleversement.

20. La résistance du massif varie peu avec la nature et les dimensions des matériaux qui entrent dans sa construction. Sur un mauvais sol, elle dépend principalement de l'épaisseur de la chaussée; on conçoit, en effet, qu'une chaussée en maçonnerie d'une grande épaisseur dont la face supérieure serait unie et sensiblement horizontale, aurait une résistance absolue indépendante de la nature du sol sur lequel elle repose; cette résistance serait illimitée et comparable à celle des fondations de nos grands édifices.

Les chaussées romaines, celles dont l'épaisseur était d'un mètre environ, présentaient une résistance absolue considérable et bien supérieure aux pressions qu'elles avaient à supporter. On doit se garder de donner aux chaussées cet excès de résistance, car, étant superflu, il absorbe sans nécessité des capitaux considérables dont il est toujours facile de faire un meilleur emploi.

24. Lorsque des circonstances exceptionnelles exigent qu'une chaussée soit soumise à des pressions extraordinaires, pour diminuer les dommages qu'elle peut éprouver, il faut faire en sorte que cela ait lieu par un temps sec, car on sait que, pendant les sécheresses, un chemin en terre est parfois préférable à une bonne chaussée, et que, dans cette circonstance, il peut supporter d'énormes pressions sans se défoncer.

En 1825, on a transporté sur la route de Paris à Lyon la statue équestre de Louis XIV, qui, avec son fardier, pesait 33,600 kil. Si ce transport avait eu lieu dans la saison des pluies, il eût évidemment causé des dommages considérables; mais comme il a été opéré à la fin de septembre, époque où le sol est généralement sec, les chaussées ont eu peu à souffrir du passage de cet énorme fardeau.

22. Si le sol sur lequel repose le massif était constamment sec, il ne tarderait pas à devenir incompressible sous l'action du roulage, et l'épaisseur de la chaussée pourrait sans inconvénient être réduite à 0^m,15, et même à 0^m,10; mais il est rare que le sol puisse rester parfaitement sec toute l'année, l'humidité des accotements et les eaux que reçoivent les fossés pénètrent fréquemment jusqu'au fond du massif; dans cette circonstance, il ne suffit plus que la chaussée fasse office de toit, il faut de plus que, reposant sur un sol plus ou moins compressible, elle résiste par sa masse comme peut le faire une fondation, ce qui oblige à donner au massif une épaisseur d'au moins 0^m,25, souvent de 0^m,40, et quelquefois plus.

23. Dans la plupart des cas, une épaisseur de 0^m,25 doit suffire, mais il ne peut exister de règle générale pour cet objet, et il faut reconnaître que l'épaisseur des chaussées doit varier avec la nature du sol ou plutôt avec sa consistance dans la mauvaise saison et avec les pressions que les chaussées ont à supporter, en sorte que l'observation peut seule déterminer la loi de cette variation.

Dans le département du Nord et dans la Belgique, où le sol est très-perméable et où les chaussées pavées ont une épaisseur insuffisante, chaque année, à

l'époque du dégel, on est obligé de suspendre la circulation du grand roulage pendant quinze jours ou trois semaines, sous peine de voir les chaussées défoncées et les pavés bouleversés.

2. DE LA RÉSISTANCE DES ÉLÉMENTS DE LA COUCHE SUPÉRIEURE DES CHAUSSÉES.

24. Le roulage exerçant continuellement son action sur la couche supérieure des chaussées, pour que cette couche puisse résister à l'action des voitures et de leur attelage et n'éprouve pas d'autre dommage que l'usure inévitable due au frottement de roulement, il est nécessaire que les éléments ou les pierres dont elle est formée puissent résister aux pressions et aux chocs qu'elles ont à supporter, et, par conséquent, que le poids ou le chargement des voitures soit réglé d'après la résistance des pierres que l'on emploie généralement dans la construction des chaussées. C'est pour avoir négligé de prendre cette mesure si simple ou de subordonner le poids des voitures à la résistance des matériaux que les pierres de nos chaussées sont journellement broyées par l'action du roulage.

25. Pour déterminer la résistance limite dont il vient d'être question, il est nécessaire d'entrer dans quelques détails sur les pierres qui servent à la construction et à l'entretien des chaussées. Ces pierres sont, quand on en a le choix, d'une nature granitique, volcanique, siliceuse et argileuse, telles que les granits, les porphyres, les basaltes, les grès, les schistes; mais comme de tels matériaux ne se trouvent en France que dans les pays de montagnes, on est obligé, sur la majeure partie des routes, de faire

sur quelques points, sont totalement dépourvues de toute espèce de pierres propres à l'entretien des chaussées. Ainsi, les pierres qui offrent le plus de résistance se trouvent dans les pays de montagnes, précisément dans les lieux où les rampes des routes imposent des limites naturelles aux chargements des voitures et favorisent l'assèchement des chaussées. Dans les pays de plaines, au contraire, qui en France forment plus des trois quarts de l'étendue du territoire, où les chaussées s'assèchent difficilement et où les chargements du roulage sont toujours excessifs, on ne rencontre que des pierres calcaires souvent peu résistantes, quelquefois même on ne trouve que de menus graviers.

Comme la résistance des pierres dépend, non-seulement de leur nature, mais encore de leurs dimensions et de la manière dont elles sont employées, pour avoir égard à ces diverses circonstances, nous chercherons à apprécier la résistance relative des pierres dans chaque espèce de chaussées.

§ 1. *Résistance relative des pierres dans les Chaussées pavées.*

27. Un pavé de grès ordinaire ayant la forme d'un cube de 0,22 de côté, peut supporter sans s'écraser une pression de 48,000 kil. Cette résistance étant bien supérieure à la pression que peut exercer une voiture de roulage, il en résulte que si le sol sur lequel repose une chaussée pavée était toujours parfaitement sec, et par conséquent incompressible, cette chaussée n'aurait jamais à souffrir des chargements excessifs des voitures du roulage, elle ne pourrait ni s'affaisser, ni se détériorer, elle resterait toujours ferme et sensiblement unie ; mais les terrains

qui paraissent les plus fermes, étant rarement imperméables, deviennent compressibles pendant la mauvaise saison ; alors les parties qui supportent le poids des voitures, s'affaissent d'une manière plus ou moins sensible et la surface de la chaussée qui transversalement avait la forme d'un arc de cercle, finit par présenter une courbure convexe vers le milieu, accompagnée de deux courbures latérales légèrement concaves. Lorsque les affaissements latéraux sont faibles, et se sont opérés régulièrement, la chaussée peut sans inconvénient conserver pendant plusieurs années la forme que l'on vient de décrire.

28. Comme les pavés peuvent supporter, pendant la plus grande partie de l'année, de fortes pressions sans inconvénients graves, il en résulte que si toutes les chaussées étaient pavées, le roulage pourrait être libre ; la seule mesure à prendre, dans l'intérêt de la conservation des chaussées, consisterait à restreindre, dans certaines localités et aux époques de dégel, la circulation des voitures de roulage. Mais les carrières de grès sont rares, et comme les chaussées pavées coûtent toujours fort cher à établir, on est obligé de préférer les empierrements qui forment plus des sept huitièmes de toutes les chaussées que la France possède.

§ 2. *Résistance relative des pierres dans les Chaussées d'empierrement.*

29. La plus grande partie des chaussées étant construites et entretenues avec des pierres calcaires d'une résistance peu différente de celle du calcaire qui figure au tableau des résistances sous le nom d'oolithique de deuxième qualité, il en résulte que la

pression exercée par le poids des voitures devrait toujours être moindre que celle sous laquelle ces pierres sont écrasées. Il est d'ailleurs évident que si les pierres dont il s'agit résistent à la pression, les pierres d'une résistance plus considérable seront à plus forte raison préservées de l'écrasement.

30. La grosseur des pierres qui servent à l'entretien des chaussées est limitée. D'après les devis et cahier des charges, ces pierres doivent pouvoir passer en tous sens par un anneau de six centimètres de diamètre; c'est-à-dire que, si elles pouvaient avoir la forme d'un cube, les plus grosses n'auraient que 0,04 de côté : or, un cube de cette dimension en pierre oolithique sèche ne serait écrasé que sous une pression de 1600 kil. Si donc toutes les pierres de la couche supérieure d'un empierrement avaient cette forme et cette dimension, elles pourraient supporter une pression de 1400 à 1500 kil.; mais aucune de ces pierres ne présentera la forme cubique : les unes seront plates; d'autres auront la forme pyramidale, avec des angles aigus, et la plupart auront des dimensions moindres que 0,04; enfin, lorsqu'elles seront humides, on peut à peine évaluer à 400 kil. la pression que la majeure partie d'entre elles sera en état de supporter.

31. On fera sans doute observer que les pierres qui forment la couche supérieure de l'empierrement, étant enchâssées ou étant liées avec le massif, présenteront plus de résistance que si elles étaient isolées, et que l'on ne doit pas craindre de leur faire supporter une pression plus forte que celle qui produirait l'écrasement d'une pierre libre et isolée. A cela nous répondrons que ce n'est pas lorsque la couche supérieure d'un empierrement est composée de pierres

liées entre elles que le roulage cause le plus de dommage, mais bien lorsque les pluies continues et le dégel ont désagrégé les éléments de cette couche. Dans ces fâcheuses circonstances, qui se présentent chaque année et qui durent pendant un temps plus ou moins long, les pierres étant seulement juxtaposées, chacune d'elles résiste comme si elle était seule, et ne tarde pas à être broyée lorsqu'elle est soumise à une pression plus considérable que celle qu'elle peut supporter. D'ailleurs, il ne s'agit pas d'établir un juste équilibre entre la résistance des pierres et la pression des roues des voitures; on doit, au contraire, faire en sorte que cette pression soit, en toute saison, moindre que la résistance des pierres; et pour atteindre ce but, il faut régler le poids des voitures d'après la moindre résistance des pierres généralement employées à l'entretien des chaussées.

L'intérêt de la conservation des chaussées d'empierrement s'oppose donc à ce que chaque pierre de la couche supérieure puisse être soumise à une pression supérieure à 400 kil.

§ 3. *Résistance relative des graviers qui entrent dans la construction de certaines Chaussées.*

32. Lorsque les graviers sont très-durs, tels que ceux d'une nature siliceuse, les chaussées en gravillage résistent aussi facilement à la pression des voitures que les meilleurs empierrements; mais il n'en est pas de même lorsque les graviers sont d'une nature calcaire, surtout lorsque leur épaisseur est à peine d'un centimètre; car alors ils sont broyés sous la pression des voitures les plus légères. Quel que soit le soin que l'on apporte à bien entretenir une chaussée,

sée en graviers calcaires, il sera toujours impossible de maintenir cette chaussée en bon état pendant la mauvaise saison; les chaussées de cette nature sont toujours couvertes de boue pendant l'hiver, et de poussière pendant l'été; elles sont véritablement le lieu de la fabrication d'une quantité considérable de ciment calcaire, que les cultivateurs s'empressent d'employer à l'amendement des terres.

Les graviers calcaires ayant, en général, des dimensions trop faibles pour résister aux pressions qu'exercent les voitures de roulage, ils ne devraient jamais constituer le massif d'une chaussée; et il est bien à désirer que les chaussées ainsi construites soient remplacées par des empierrements d'une autre nature.

33. En résumé, la résistance relative des pavés est toujours assez considérable pour que les chaussées construites avec ces pierres résistent facilement aux plus fortes pressions qu'exercent les voitures de roulage.

Les chaussées d'empierrement ayant leur couche supérieure formée de pierres de faibles dimensions, dont la résistance est souvent très-limitée, puisque chacune d'elles ne doit jamais avoir plus de 0,04^m de côté, et que la plupart ont souvent beaucoup moins, il est nécessaire, pour assurer la conservation des chaussées, que chaque pierre ne puisse être soumise à une pression supérieure à 400 kil.

Quant aux chaussées en gravelage, lorsque leurs éléments sont d'une nature siliceuse, elles résistent aussi bien que la plupart des empierrements; mais lorsque les graviers sont d'une nature calcaire, comme les chaussées ne peuvent alors être maintenues en bon état pendant la mauvaise saison, il est

à désirer que ces matériaux soient proscrits et remplacés par d'autres plus résistants.

Après avoir indiqué les moyens d'apprécier la résistance absolue des chaussées et la résistance relative des éléments dont elles se composent, nous allons nous occuper de l'action du roulage sur les chaussées.

III. ACTION DU ROULAGE SUR LES CHAUSSÉES.

34. Le roulage étant le résultat du mouvement que les chevaux impriment aux voitures, son action sur les chaussées dépend d'abord de l'état de la voie, elle dépend ensuite des voitures et de leur attelage.

Lorsqu'une chaussée solidement établie a sa surface unie et ferme, et est fréquentée par des voitures convenablement chargées, alors les roues cheminent sans l'enfoncer ni la défoncer, et roulent sans chocs, temps d'arrêt ni ressaut; mais si la chaussée présente des inégalités ou flaches et des aspérités dues à la saillie des pierres dont elle est construite, une partie de la force vive que possède chaque roue est détruite par les chocs contre ces aspérités; de plus l'intensité du tirage s'accroît en pure perte, soit pour franchir des aspérités, soit pour sortir des flaches dans lesquelles chaque roue est obligée de descendre.

Comme ces effets sont indépendants des voitures, et qu'on peut facilement les prévenir, en ne tolérant, sur les chaussées ni aspérités ni flaches nous supposerons, dans ce qui va suivre, que la surface des chaussées est ordinairement unie et ferme.

1. ACTION DES VOITURES SUR LES CHAUSSEES.

35. Toute voiture en mouvement ne porte sur la chaussée que par ses roues, en sorte que, si l'on fait d'abord abstraction de l'attelage, l'action d'une voiture sur une chaussée se réduit à celle de ses roues, laquelle dépend en même temps de leur charge, de leur forme et de leur mouvement.

Le poids ou la charge des roues, lorsqu'elle excède une certaine limite, est la cause la plus active de la dégradation des chaussées; après cette cause vient celle qui dépend de la forme des roues et principalement de celle de la bande; enfin la dernière cause est due au mouvement de la roue qui par le frottement de roulement produit l'usure inévitable mais très-lente de la couche supérieure de la chaussée.

36. Lorsque pendant la mauvaise saison une roue pesamment chargée chemine sur une chaussée, elle peut donner lieu à trois effets distincts. Le premier est un tassement plus ou moins sensible du massif de la chaussée, produisant une flache, lorsqu'il est accidentel, ou un affaissement longitudinal et continu, si la pression due au poids de la roue est supérieure à la résistance absolue du massif.

Le second effet que produit une roue pesamment chargée est l'écrasement des matériaux, qui a toujours lieu lorsque la pression qu'exerce la roue est supérieure à la résistance des pierres dont la chaussée est formée.

Le troisième effet est l'usure inévitable causée par le frottement de roulement due au mouvement des roues, et qui a même lieu lorsque ces roues sont faiblement chargées.

L'action des voitures sur une chaussée peut donc produire trois effets distincts, car elle peut enfoncer la pierre dont la chaussée est formée, les broyer, ou simplement les user. Nous distinguerons ces trois effets sous les noms de dégradations, de détériorations et d'usure.

On peut sinon s'opposer entièrement aux deux premiers effets, au moins les réduire considérablement.

Pour réduire le premier, il suffit de fixer une limite au chargement des voitures ou de mettre ce chargement en rapport avec la résistance absolue des chaussées, et lorsque la mauvaise saison affaiblit notablement cette résistance, comme cela a lieu sur certaines chaussées pavées aux époques de dégel, il faut à ces époques restreindre la circulation.

Pour réduire le second effet, on établit un certain rapport entre la largeur des jantes et les poids autorisés, afin de répartir la pression sur une plus grande surface.

Quant au troisième effet, lorsqu'il résulte du mouvement seul, il ne saurait être réduit; mais les deux premiers effets, en augmentant les inégalités de la chaussée, peuvent l'accroître d'une manière sensible. Lors donc que les deux premiers effets n'auront pas lieu ou seront réduits, le troisième s'atténuera naturellement.

37. Si pendant la mauvaise saison, à l'époque où les éléments de la couche supérieure de la chaussée sont désagrégés, on fait cheminer une voiture à roues minces ou à jantes étroites et pesamment chargée, alors les jantes, faisant office de coins, écartent les pierres presque aussi facilement que si elles venaient d'être posées. Ces jantes creusent ainsi des ornières dont la profondeur dépend du poids du chargement

et de l'épaisseur de la couche désagrégée. On prévient facilement cet effet en proscrivant les roues dont les jantes sont trop minces ou d'une épaisseur qui diffère peu de la grosseur des pierres.

Si les bandes des roues au lieu d'être parfaitement cylindriques sont coniques, comme celles de quelques voitures, alors la circonférence intérieure de la bande, qui est celle dont le rayon est le plus grand, se développe sur le sol, et n'éprouve qu'un frottement de roulement, tandis que la circonférence extérieure éprouve en même temps un frottement de roulement et un frottement de glissement; or, l'action de ce dernier frottement sur les pierres de la chaussée étant bien plus destructive que celle du premier, augmente ainsi les frais d'entretien, sans avantage réel qui puisse compenser cette augmentation.

Il est d'ailleurs facile de prévenir cet effet en proscrivant les roues coniques.

La différence que nous venons de signaler, entre les frottements des deux bords de la bande des roues coniques, explique pourquoi les bandes des roues des voitures de messageries s'usent plus rapidement du côté extérieur que du côté intérieur.

Nous devons actuellement faire observer que s'il est important que la surface des chaussées soit aussi unie que possible, il ne l'est pas moins que la bande des roues ne présente ni creux ni saillie; car chaque saillie de la bande ferait porter tout le poids de la roue sur un seul point, et par conséquent sur une seule pierre, dont l'écrasement serait inévitable.

C'est pour prévenir cet effet que l'on est dans l'usage :

1° D'obliger les voituriers à river à plat les clous

des bandes, de manière que, lorsqu'ils sont neufs, ils ne puissent former une saillie de plus d'un demi-centimètre ;

2° De défendre les bandes avec rebords ou saillies sur leur circonférence ;

3° De défendre les jantes composées de deux ou plusieurs bandes parallèles laissant entre elles plus d'un centimètre d'intervalle ;

4° D'obliger à raccorder jointivement, à un centimètre près, les bandes composées de plusieurs parties, de manière que la direction du joint soit oblique par rapport aux côtés de la bande, et par conséquent d'éviter que les extrémités de ces parties se recouvrent en formant saillie sur le contour cylindrique de la roue.

38. La chaussée étant ferme, unie et sensiblement plane, et les roues étant parfaitement cylindriques, unies et convenablement chargées, la pression est alors insuffisante pour écraser les pierres ; les voitures chemineront donc sans la moindre secousse, sans éprouver aucun obstacle de la part du sol ; elles ne causeront à la chaussée aucun autre dommage que l'usure inévitable due à la circulation et principalement au frottement de roulement. L'épaisseur de la chaussée ne diminuera donc que d'une manière insensible ou qui ne deviendra sensible qu'avec le temps et la fréquentation.

La pression et le tirage étant indépendants de la vitesse, il en résulte que l'usure provenant du mouvement des roues ne variera pas avec la vitesse ou restera sensiblement constante quelle que soit la rapidité du mouvement des voitures pourvu qu'elles soient suspendues, car les ressorts diminuent le tirage des voitures sur une chaussée qui ne peut jamais être parfait-

tement unie, ils permettent aux roues et à la partie de la voiture à laquelle elles sont fixées, de passer sur une pierre de la chaussée ou autre obstacle peu saillant, sans élever le corps de la voiture et le poids qu'il porte.

2. ACTION DE L'ATTELAGE DES VOITURES OU DES CHEVAUX SUR LES CHAUSSÉES.

39. Les chevaux qui composent l'attelage d'une voiture ne peuvent agir sur les chaussées d'empierrement que par le frottement et la pression de leurs pieds lorsqu'ils vont au pas, et de plus par le choc lorsqu'ils marchent à grande vitesse.

Considérons d'abord les chevaux d'une voiture de roulage, convenablement chargée; dans cette circonstance, les chevaux allant au pas, le choc est à peu près insensible, et l'action de chaque pied se borne à frotter et presser la couche supérieure de la chaussée. Comme la percussion que peut exercer le pied d'un cheval produit rarement un effet supérieur à la pression de 400 kil., et que la résistance des pierres de la chaussée doit toujours être supérieure à cette pression, eu égard à l'étendue de la surface sur laquelle elle agit, on doit concevoir que le cheval qui marche sur une chaussée sans incliner le sabot de ses pieds, ne puisse causer que des dommages à peine sensibles.

Lorsque le cheval s'appuie sur la chaussée en inclinant son sabot comme cela a lieu lorsqu'il gravit une rampe, et généralement lorsqu'il exerce un effort considérable, dans cette circonstance la pression agissant obliquement sur la surface de la chaussée, elle désagrège les éléments de la couche supérieure et cause un dommage qui s'accroît rapidement par les intempéries et la fréquentation.

40. Quant au frottement, il est évidemment dans un certain rapport avec l'usure des fers des chevaux; or, il résulte des observations de M. Macneil, célèbre ingénieur anglais, que cette usure est supérieure d'un sixième à celle des bandes des roues des chariots auxquels les chevaux sont attelés; si donc on pense que ce rapport subsiste également entre le dommage causé à la chaussée par les roues et celui que causent les pieds des chevaux, on pourra dire que le premier dommage est au second comme 1 est à 1,16, ou que l'action des pieds des chevaux attelés à une voiture de roulage convenablement chargée, produit un effet un peu supérieur à celui qui résulte du mouvement des roues; si donc on ne tient compte que du dommage causé par le mouvement des roues d'une voiture de roulage, on n'appréciera pas la moitié du dommage causé par le passage de cette voiture.

41. Considérons actuellement un attelage d'une voiture de messagerie, courant à la vitesse de 16 kilomètres à l'heure. Dans cette circonstance, la vitesse n'augmente pas l'usure des bandes due au mouvement des roues, car sur une chaussée bien faite, la résistance due au frottement de roulement est indépendante de la vitesse et est simplement proportionnelle à la pression; mais les chocs de la chaussée par les pieds des chevaux causés par le galop ou par la grande vitesse de l'attelage, augmenteront les dommages d'une manière très-sensible. On doit encore à M. Macneil les seules observations que nous connaissons sur ce sujet; cet ingénieur a constaté que l'usure des fers des bandes des roues des diligences n'est que le tiers de l'usure des fers des chevaux attelés à ces voitures. Ici, on ne peut plus admettre

comme nous l'avons fait pour les chevaux attelés aux voitures de roulage, que le dommage causé à la chaussée soit simplement proportionnel à l'usure des fers ; car, pour les pieds des chevaux, cette usure doit se décomposer en deux parties : la première, qui est égale à l'usure des bandes des roues, doit être considérée comme destinée à vaincre la résistance due au frottement, tandis que la seconde partie, double de la première, est le résultat des chocs qui produisent sur les chaussées d'empierrement un dommage qui s'accroît avec la vitesse dans un rapport qui varie avec la nature des matériaux.

Nous concluons donc de ce qui précède :

1° Que sur les chaussées d'empierrement en bon état, les chevaux de l'attelage d'une voiture de roulage convenablement chargée, allant au pas, causent un dommage qui paraît devoir être un peu plus fort que celui qui est causé par le mouvement des roues ;

2° Que le dommage causé par les chevaux attelés aux voitures rapides paraît devoir être plus que triple de celui qui est causé par les roues de ces voitures ;

3° Qu'un cheval attelé à une voiture rapide cause un dommage triple de celui qui est causé par le cheval attelé à une voiture de roulage allant au pas ;

4° Que lorsqu'un cheval est attelé à une voiture rapide on doit attribuer aux chocs de ses pieds sur la chaussée, plus des deux tiers du dommage qu'il cause réellement.

IV. Des Voitures dont le Roulage fait usage.

42. Les charrettes et les chariots, le fardier et le camion, sont les véhicules dont on fait usage pour transporter des fardeaux sur les routes et chemins, à des distances plus ou moins considérables.

La charrette est un châssis monté sur deux roues, et dont les deux côtés, dans le sens de la voie, ont une saillie d'environ deux mètres. C'est entre ces parties saillantes, que l'on appelle *limons*, qu'est attaché le premier ou le seul cheval de l'attelage qui tire la charrette.

Le chariot est monté sur quatre roues. Les limons sont remplacés par une longue pièce de bois appelée *timon*, de trois mètres de longueur, posée perpendiculairement sur le milieu de l'essieu de devant. Les roues qui correspondent à cet essieu sont plus petites que celles de derrière, afin de pouvoir se placer sous le châssis lorsque le chariot est obligé de tourner.

Le fardier sert au transport de troncs d'arbres et de pièces de charpente d'une grande longueur, qu'il est avantageux de fixer sous l'essieu : il se compose d'un châssis fort court, monté sur deux roues d'un grand diamètre.

Le camion est un chariot dont les roues ont toujours un faible diamètre, afin de rendre facile le chargement et le déchargement.

43. Les charrettes présentent deux inconvénients, auxquels il est difficile de remédier.

Le premier est l'élévation du centre de gravité du chargement, qui expose la voiture à verser.

Le second est la pression qu'éprouve toujours le limonier, de quelque manière que la charge soit en

équilibré sur l'essieu; car, sur une route en pente, une partie de la charge portée sur le dos du cheval, et sur une route en rampe, la partie qui pèse en arrière tend à soulever le cheval, dont elle diminue ainsi la force.

Malgré les inconvénients que nous venons de signaler, les charrettes sont souvent préférées aux chariots : pour le même poids utile, elles exigent un effort de traction moins considérable; elles sont d'ailleurs d'une construction plus simple, moins pesante et moins coûteuse que les chariots.

Au moyen des charrettes, on fait plus de travail avec moins de dépense; mais on écrase les chevaux limoniers, qui deviennent toujours invalides avant l'âge.

Le transport au moyen des chariots exige un plus grand effort de traction; mais il est plus sûr, et les objets que l'on transporte courent moins de chance d'accidents.

44. Les roues sont les parties les plus importantes d'une voiture; elles rendent le tirage plus ou moins facile, et exigent une étude sérieuse pour déterminer la forme et les dimensions qui conviennent le mieux sur chaque genre de voie.

Dans une roue, on distingue le *moyeu*, les *rais*, les *jantes* et la *bande* de fer qui enveloppe les jantes.

Le moyeu est la partie centrale traversée par l'essieu.

Les jantes sont les arcs en bois qui, solidement liés entre eux par la bande, forment la circonférence.

La circonférence est réunie au moyeu par les rais ou rayons.

Dans la construction des voitures, on cherche à obtenir, par une heureuse combinaison des éléments

dont chacune se compose, et pour un prix convenable, un instrument solide sans être lourd, et commode pour les animaux qui doivent y être attelés.

Il est d'abord important que les roues soient exactement rondes et parfaitement centrées; que leurs circonférences, intérieure ou extérieure, soient dans un même plan perpendiculaire à l'essieu; que leurs bandes soient bien cylindriques, et que l'essieu traverse le centre du moyeu: les roues qui ne jouissent pas de toutes ces propriétés sont très-désavantageuses et fatiguent inutilement les chevaux; le défaut de rondeur, notamment, occasionne toujours des inconvénients plus graves que ceux qui résultent des irrégularités de la voie.

Les moyeux doivent avoir un assez grand rayon, afin de faciliter l'assemblage des rais et de diminuer leur longueur.

Les jantes doivent être faites avec des bois naturellement courbes, pour que leurs fibres ne soient pas coupées et qu'elles résistent plus facilement aux chocs qu'elles auront à éprouver.

45. Le corps de la voiture est soutenu par les roues, au moyen de l'essieu. Il contient et supporte la charge, que l'on appelle le *poids utile*.

Pour chaque système de voitures, il existe un rapport déterminé entre le poids de la voiture vide et la charge qu'elle peut porter: ce rapport varie du tiers à la moitié; c'est-à-dire qu'une voiture peut porter au moins un poids double et au plus un poids triple du sien propre.

Dans les charrettes ordinaires, le poids du corps de la voiture forme rarement plus des quatre cinquièmes du poids des roues; dans les chariots, le

poïds du corps de la voiture est à peu près égal à une fois et quart le poids des roues.

Le poids des roues varie proportionnellement à la largeur des jantes et au carré du rayon ; car le poids de l'unité de leur volume reste sensiblement constant, ainsi que le prouve le tableau A, dans lequel nous avons réuni les résultats de différentes observations faites par MM. Schwilgué et Emmery.

46. Si une roue parfaitement circulaire, en matière dure et très-polie, était posée verticalement sur un plan horizontal indéfini, très-dur et très-poli lui-même, la moindre impulsion horizontale suffirait pour la mettre en mouvement ; et, comme elle n'éprouverait aucune résistance, le mouvement pourrait se continuer indéfiniment. Mais l'état physique des corps s'oppose à ce que les choses se passent ainsi ; car la matière des roues, ainsi que celle des chaussées, n'est ni très-dure, ni très-polie, ni par conséquent incompressible ; et il arrive que, quand une roue se meut en vertu d'une impulsion, elle éprouve certaines résistances qui ralentissent d'abord le mouvement et ne tardent pas à l'arrêter, si de nouvelles impulsions ne viennent s'ajouter à la première, afin de remplacer les quantités de mouvement absorbées par les résistances.

Cherchons à distinguer les résistances dont il vient d'être question. D'abord, il faut remarquer que si une roue n'était pas exactement circulaire et parfaitement centrée, elle éprouverait des résistances très-variables tenant à ces défauts ; mais nous n'avons pas à nous en occuper, parce qu'il faut admettre que le charonnage ne livre ou ne doit livrer au commerce que des roues bien confectionnées.

Lorsque la roue d'une voiture se meut sur un sol

horizontal, elle éprouve ordinairement trois sortes de résistance.

La première provient des aspérités plus ou moins sensibles que présente le sol et que rencontre successivement la bande de la roue; le frottement qui en résulte varie avec le nombre et la saillie de ces aspérités.

La seconde résulte de la compressibilité ou de l'élasticité du sol, qui s'infléchit sous la pression qu'exerce la roue. Cette résistance varie avec la flèche de courbure; mais, pour une même roue, elle reste sensiblement constante.

Ces deux premières résistances se confondent, lorsque la saillie des aspérités est insensible ou d'une hauteur inappréciable.

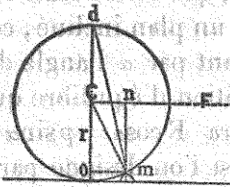
La troisième résistance est due au frottement de la boîte du moyeu contre l'essieu.

Dans l'intérêt de l'industrie du roulage, il est bien important de chercher à apprécier les résistances dont il vient d'être question; car, si l'on y parvient, on sera en mesure de lutter contre elles et d'en triompher dans les différentes circonstances qui se présentent. Tel est le but de la théorie que nous allons exposer.

47. Considérons une roue verticale sans essieu, posée sur un plan horizontal. Si cette roue ne reçoit aucune impulsion, elle restera en repos et exercera sur le plan une pression égale à son poids, que nous désignerons par p .

Si le plan, sur lequel la roue est posée, présente un petit obstacle dont la saillie au-dessus de ce plan soit h , et si l'on applique à la roue, dont nous désignerons le rayon par r , une force horizontale F passant par son centre et comprise dans son plan,

lorsque la roue s'élèvera sur l'obstacle et pourra tourner sur le point m , il y aura nécessairement équilibre, dans le système, entre le poids p et la force F ,



ce qui exige que l'on ait $p \times om = F \times mn$; mais $om = \sqrt{(2r-h)h}$ et $mn = r-h$; on doit donc avoir $p\sqrt{(2r-h)h} = F(r-h)$; d'où l'on tire pour l'expression de l'effort qu'il est nécessaire d'exercer, afin que la roue puisse franchir l'obstacle dont la hauteur est h , $F = \frac{r\sqrt{(2r-h)h}}{r-h}$.

Remarquons actuellement que $(2r-h)h = r^2 - (r-h)^2$, ce qui permet de changer l'expression précédente en $F = p\sqrt{\frac{r^2}{(r-h)^2} - 1}$, expression qui devient nulle en même temps que h , et montre par conséquent qu'une roue parfaitement circulaire et cylindrique ne doit éprouver aucune résistance à se mouvoir sur un plan horizontal qui ne présente aucune aspérité.

48. Si, comme cela a toujours lieu, le plan horizontal présente des aspérités d'une hauteur h excessivement petite, alors la quantité h pourra être négligée devant r et h^2 devant $2rh$, il restera alors :

$F = p\sqrt{\frac{2rh}{r}}$ pour l'expression de l'effort qu'il est nécessaire d'exercer pour faire mouvoir une roue sur un sol horizontal présentant de petites aspérités uniformément réparties et d'une hauteur sensiblement constante.

49. Si le sol était sans aspérité, mais compressible, il s'affaisserait d'une certaine quantité sous le poids de la roue, qui serait ainsi assujettie à se mouvoir comme sur un plan incliné, cédant sous la pression. Représentant par α l'angle d'inclinaison de ce plan dans la position d'équilibre qui précède l'affaissement, on aura $F \cos \alpha = p \sin \alpha$, ou simplement $F = p \tan \alpha$; et si l'on désigne par h' la hauteur du plan incliné qui correspond à la longueur om , le triangle odm donnera $1 : \tan \alpha :: 2r - h' : \sqrt{(2r - h')h'}$, d'où $F = p \frac{\sqrt{(2r - h')h'}}{2r - h'} = p \sqrt{\frac{h'}{2r - h'}}$.

Si le sol était compressible et élastique, il tendrait à reprendre sa forme primitive, ce qui réduirait la hauteur h' et la rendrait assez petite pour être négligée devant r ; on aurait alors $F = p \frac{\sqrt{2rh'}}{2r}$.

50. Si le sol est en même temps couvert d'aspérités d'une hauteur très-petite h et faiblement compressible sur une hauteur moyenne h' , alors l'effort nécessaire ou mouvement de la roue aura pour expression $F = p \frac{\sqrt{2r}}{r} (\sqrt{h} + \frac{1}{2} \sqrt{h'})$.

51. Si le sol est élastique et sans aspérités, il prendra une courbure à flèche constante h sous des roues du même poids p , quel que soit d'ailleurs leur rayon; l'expression $F = p \frac{\sqrt{2rh}}{2r}$ se réduira à $F = p \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2h}{r}}$, ce qui a fait dire d'abord à Edgeworth, et ensuite à M. Dupuits que la résistance qu'une roue éprouve à se mouvoir sur un plan horizontal, ou ce que l'on appelle le frottement de roulement, est proportionnel à la pression et en raison inverse de la

racine carrée du rayon; mais nous devons faire observer que cette propriété ne peut avoir lieu que quand le poids de la roue est indépendant de son rayon et que la hauteur h de la flèche de courbure reste constante, quel que soit le diamètre de la roue. Cela serait vrai, si l'on avait un plancher composé de madriers transversaux d'une épaisseur égale et d'une même élasticité, sur le milieu duquel on ferait rouler des roues de même poids et ne différant entre elles que par la grandeur de leur diamètre. Les chaussées d'empierrement ne pouvant être assimilées au plancher dont nous venons de parler, on conçoit les objections auxquelles a donné lieu la formule $F = p \sqrt{\frac{2h}{r}}$ qui ne peut être appliquée que dans des circonstances exceptionnelles.

52. Reprenons la formule $F = p \frac{\sqrt{(2rh-h^2)}}{r-h}$ et rappelons-nous que $\sqrt{2rh-h^2}$ est égal à mo ou à $r \sin \alpha$, α étant ici l'angle que la verticale forme avec le rayon cm , qui passe par l'extrémité de l'arc de contact; nous obtiendrons $F = \frac{pr \sin \alpha}{r-h}$.

Si le sol est assez compressible pour que les roues y pénètrent à une faible profondeur, comme cela arrive souvent, on concevra que des roues de même poids y pénétreront d'autant moins que leur diamètre sera plus considérable. Il arrivera même fréquemment que ces roues cesseront de pénétrer, lorsque leur section au niveau du sol présentera la même surface. Or, quand cela aura lieu, $r \sin \alpha$ sera constant pour toutes les roues, et si h est assez petit pour être négligé devant r , il en résultera que, dans ces circonstances, la résistance sera en raison inverse du rayon.

Lorsque le poids p des roues, au lieu d'être constant, est fonction du rayon, comme cela a généralement lieu, alors la résistance, au lieu de diminuer avec la grandeur du rayon, peut augmenter. Si, par exemple, le poids des roues augmente proportionnellement au carré du rayon, comme cela a lieu pour les cylindres, alors, en désignant par l l'épaisseur des roues, par a le poids de leur unité de volume, on aura $p = \pi a r^2 l$, et l'expression $F = p \frac{\sqrt{2rh - h^2}}{r}$ deviendra $F = \pi a l r \sqrt{2rh - h^2}$, et lorsque $2rh - h^2$ sera constant, la résistance sera proportionnelle au rayon.

Lorsque, dans la formule $F = \frac{pr \sin \alpha}{r - h}$, h est assez petit pour être négligé devant r , il reste $F = p \sin \alpha$, c'est-à-dire que pour des roues de même poids la résistance est proportionnelle au sinus de l'angle α .

Si le sol est tel que l'angle α reste constant pour des roues de même poids, la résistance sera également constante. Il est d'ailleurs évident que les chaussées d'empierrement ne peuvent jouir de cet avantage, qui semble spécialement appartenir aux rails des chemins de fer.

Si, l'angle α étant constant, le poids p des roues peut être remplacé par $\pi a r^2 l$, la résistance sera alors proportionnelle au carré du rayon.

53. Dans l'état ordinaire des choses, la résistance au roulement sur une chaussée horizontale et en bon état reste constante pour une roue de même poids et de même rayon, et l'expérience constate tous les jours que cette résistance est en raison inverse du rayon. D'après les considérations qui précèdent, on peut donc admettre, sans crainte d'erreur sensible,

que cette résistance a pour expression $F = \frac{p\delta}{r}$, δ étant un coefficient à déterminer par l'expérience, et qui varie avec la nature et l'état de la voie. Il résulte de là que le frottement de roulement transforme la pression en une force horizontale égale à $p \frac{\delta}{r}$.

La relation $F = \frac{p\delta}{r}$ donne $\delta = \frac{Fr}{p}$, expression qui se réduit à $\delta = \frac{F}{p}$, lorsque $r = 1$. De là résulte un moyen facile d'obtenir la valeur de δ . En effet, si l'on prend une roue d'un mètre de rayon et d'un poids quelconque, que l'on mesure avec soin l'effort nécessaire pour entretenir le mouvement de la roue sur une chaussée horizontale, le rapport entre cet effort et le poids de la roue donnera la valeur de δ qui convient à la chaussée sur laquelle a lieu l'expérience.

54. Considérons actuellement une roue tournant sur son essieu et roulant sans glisser sur une chaussée horizontale. Conservons les mêmes notations que ci-dessus, et désignons de plus par P le poids dont la roue est chargée, par r , le rayon de l'essieu et par f le coefficient du frottement qui a lieu au point d'appui de l'essieu.

Pour établir les conditions d'équilibre, qui sont aussi celles du mouvement uniforme, nous aurons à considérer l'effort de traction F appliqué au centre de la roue, la résistance au roulement égale à $\frac{(P+p)\delta}{r}$, appliquée à la circonférence extérieure de la roue, le frottement tangent à la circonférence de l'essieu, qui est égal à fP , ces deux dernières forces tendant à faire tourner la roue en sens contraire de la première.

Si l'on suppose le système en équilibre et qu'on lui imprime un petit mouvement dans le sens de la force F , les points d'application des forces $\frac{(P+p)\delta}{r}$ et fP auront la même vitesse angulaire ω ; le centre, qui est le point d'application de la force F , décrira un petit chemin horizontal égal à $r\omega$; le point d'application de la force $\frac{(P+p)\delta}{r}$ décrira aussi un petit chemin égal à $r\omega$; quant au chemin décrit par la force fP , il sera égal à $r_0\omega$. Le principe des vitesses virtuelles donnera donc $Fr\omega - \frac{(P+p)\delta}{r}r\omega - fPr_0\omega = 0$; d'où $F = \frac{(P+p)\delta}{r} + \frac{Pfr_0}{r} = \frac{p\delta}{r} + P\frac{(\delta + fr_0)}{r}$.

L'équation que nous venons de trouver convient à la charrette et même aux chariots de quatre ou de six roues, lorsque toutes les roues ont un diamètre commun, et que ces voitures doivent se mouvoir sur un chemin horizontal. Nous allons indiquer les modifications que cette équation doit éprouver, lorsque le diamètre varie d'une paire de roues à une autre.

55. Pour déterminer l'effort nécessaire au mouvement d'un chariot ou d'une voiture à quatre roues, on peut considérer le système comme composé de deux voitures à deux roues assujetties à suivre la même direction; si donc on désigne par r le rayon des roues de devant, par p le poids de ces roues, par P le poids dont elles sont chargées, par r' , p' et P' les quantités analogues pour les roues de derrière, et par r_0 le rayon commun des deux essieux, l'effort nécessaire pour entretenir le mouvement de ce chariot sur une chaussée horizontale aura pour expression :

$$F = (P+p)\frac{\delta}{r} + (P'+p')\frac{\delta}{r'} + \left(\frac{P}{r} + \frac{P'}{r'}\right)fr_0.$$

Lors donc que l'on connaîtra les quantités f et δ , ainsi que le chargement d'un chariot donné, il sera facile de déterminer l'effort nécessaire au mouvement de ce chariot sur une chaussée horizontale. En suivant une marche analogue, on déterminerait l'effort nécessaire au mouvement d'un chariot de six roues, ou de trois charrettes fixées à la suite l'une de l'autre.

56. Lorsque la voiture que l'on considère doit se mouvoir sur une chaussée en rampe d'une inclinaison i , alors il faut élever le poids total de cette voiture à la hauteur i , sur chaque mètre de longueur, c'est-à-dire, que l'effort de traction se trouve augmenté de la composante du poids total parallèle à la rampe. Cette composante, pour la charrette, étant égale à $(P+p)i$, et pour le chariot à $(P+P'+p+p')i$, il en résulte que l'effort pour entretenir le mouvement d'une charrette sur une chaussée en rampe d'une inclinaison i a pour expression

$$F = (P+p) \left(i + \frac{\delta}{r} \right) + P \frac{fr_0}{r},$$

et que, pour le chariot, l'expression générale de cet effet est

$$F = (P+p) \left(i + \frac{\delta}{r} \right) + (P'+p') \left(i + \frac{\delta}{r} \right) + \left(\frac{P}{r} + \frac{P'}{r} \right) fr_0.$$

Lorsqu'une charrette suit une chaussée en pente, alors le poids total, décomposé suivant la pente, tend à diminuer l'effort, dont l'expression générale devient

$$F = (P+p) \left(\frac{\delta}{r} - i \right) + \frac{Pfr_0}{r},$$

et fait reconnaître que cet effort sera nul toutes les fois que l'on aura $(P+p)i = (P+p) \frac{\delta}{r} + P \frac{fr_0}{r}$, c'est-à-dire que, dans cette circonstance, la charrette tendra à descendre en vertu de son propre poids.

Si un chariot suit un chemin en pente, lorsque l'on aura

$$(P+p+P'+p')\delta = (P+p)\frac{\delta}{r} + (P'+p')\frac{\delta}{r'} + \left(\frac{P}{r} + \frac{P'}{r'}\right)fr_0,$$

le chariot, après avoir reçu une impulsion suffisante pour vaincre son inertie, continuera à se mouvoir en vertu de son propre poids.

57. Lorsque le poids à transporter est connu, il est possible de déterminer le poids ou le rayon des roues qu'il convient de choisir pour que l'effort soit le moindre possible. En effet, sur un chemin horizontal, l'effort sera le moindre possible lorsqu'on

$$\text{aura } \frac{dp}{dr} \cdot \frac{\delta}{r} - \frac{p\delta}{r^2} - P \frac{(\delta+fr_0)}{r^2} = 0;$$

car le poids p des roues est fonction du rayon, et il résulte même du tableau A que ce poids est proportionnel au carré du rayon pour une même largeur de jantes, ce qui donne $\frac{dp}{dr} = \frac{2p}{r}$, et par suite $p\delta = P(\delta+fr_0)$. Comme

la quantité $\delta+fr_0$ sera toujours plus grande que δ , on doit en conclure que, dans le cas du minimum absolu de l'effort, le poids P de la charge doit être un peu moindre que le poids des roues. L'effort minimum a d'ailleurs pour expression $F = \frac{2p\delta}{r}$, c'est-à-dire qu'il est double de celui qui est nécessaire au mouvement des roues non chargées.

Si nous admettons que le poids des roues croisse proportionnellement à leur volume, supposition que nous autorisent à faire les résultats consignés dans le tableau (A), et si nous représentons par u le poids de l'unité de volume des roues, et par l la largeur de leurs bandes, nous aurons : $p = 2\pi ar^2l\delta$. Cette valeur, substituée dans les relations trouvées ci-dessus, donnera $2\pi adr^2l = P(\delta+fr_0)$, et $Fr = 4\pi ar^2l\delta$, ou simple-

ment $F = 4\pi arl\delta$. Par conséquent, dans le cas du minimum absolu de l'effort, le poids transporté P restera constant avec le produit r^2l ; mais comme l'effort est constant avec le produit rl , pour transporter un poids donné avec le moindre effort, il suffira de donner à l la plus petite valeur qu'elle puisse avoir, eu égard à la résistance absolue des roues et à la consistance du sol, pour trouver la valeur du plus grand rayon qu'il soit possible de donner aux roues. Si cette valeur excédait celle du plus grand rayon dont la taille des chevaux permet de faire usage, il faudrait prendre pour r cette valeur du plus grand rayon, et déterminer ensuite celle de l , soit au moyen du poids P , soit au moyen de l'effort F .

Si les roues devaient se mouvoir sur un chemin en rampe d'une inclinaison i , alors, dans le cas du minimum absolu de l'effort, on aurait, pour le rapport entre le poids des roues et celui de la charge, $p(\delta + 2ri) = P(\delta + fr_0)$; c'est-à-dire que, pour des roues de même poids, ce rapport dépendrait en même temps de la pente i et du rayon r , et resterait constant avec le produit ri . La valeur de l'effort minimum aurait pour expression
 $F = 2p \frac{(\delta + 2ri)}{r} + (P - p)i$, et en remplaçant p par sa valeur $2\pi ar^2l$, on aurait pour déterminer deux des quatre quantités P, F, r, l , $2\pi ar^2l(\delta + 2ri) = P(\delta + fr_0)$ et $Fr = 4\pi ar^2l(\delta + 2ri) + (P - 2\pi ar^2l)ri$.

58. Pour l'intelligence de ce qui précède, nous allons donner la solution de quelques questions qui se présentent assez fréquemment.

Commençons par faire observer que, sur une chaussée en empierrement convenablement entretenue, on a ordinairement $\delta = 0,035$, que le frotte-

ment sur l'essieu f peut être réduit à 0,12, et que le diamètre de l'essieu étant de 0,06, on a nécessairement $fr_0 = 0,0036$.

Quant à la quantité a , les résultats réunis dans le tableau déjà cité indiquent que sa valeur moyenne est égale à 817, ce qui donne $\pi a = 2565$.

Ceci posé, proposons-nous de trouver le rayon que doivent avoir les roues d'un fardier, destiné à transporter sur un chemin horizontal, avec le moindre effort possible, deux troncs de chêne de 9^m de longueur et de 0^m40 de diamètre moyen.

Le poids de ces chênes sera de 2000 kil. ; en y ajoutant 154 kil. pour le poids de l'essieu et de la flèche, on aura 2154 kil. pour le poids P dont les roues sont chargées.

La relation $p\delta = P(\delta + fr)$ trouvée ci-dessus, donne $p = 4,10 P = 2369^k,40 = 2\pi ar^2 l$. Si l'on prend pour la largeur de la bande de chaque roue $l = 0,20$, qui est à peu près celle que l'on donne ordinairement aux roues des fardiens, on aura $2\pi al = 4026$, et par suite $4026 r^2 = 2369,40$; d'où $r^2 = 2,309$ et $r = 1^m,52$. Le diamètre des roues devra donc être de 3 mètres. C'est effectivement cette dimension que l'on donne aux roues des grands fardiens en usage dans les chantiers.

Dans la circonstance dont nous nous occupons, l'effort, ayant pour expression $F = \frac{2p\delta}{r}$, sera égal à 71,80, ce qui est aussi l'effort ordinaire du cheval de 600 kil., habitué à travailler sept heures par jour.

Si le chemin était en rampe de 0,03 d'inclinaison, la relation $p(\delta + 2ri) = P(\delta + fr_0)$ donnerait $4026r^2(0,035 + 0,06r) = 2154 \times 0,0386$
ou $r^3 + 0,58 r = 1,35$, équation qui, après deux ou

trois essais, donne $r = 0,955$. Par conséquent, lorsqu'un fardier doit servir sur une rampe d'une inclinaison de 0,03, ou supérieure à 0,03, il est sans avantage de donner à ses roues plus d'un mètre de rayon.

Dans l'état ordinaire des choses, les fardiens devant suivre des chemins dont l'inclinaison varie de 0^m,00 à 0^m,03, il suffira de donner à leurs roues un rayon de 1^m,23, valeur moyenne entre celles que nous venons de trouver.

59. Pour déterminer le rayon qu'il convient de donner aux roues des charrettes, afin que l'effort nécessaire à la traction d'un poids p' sur un chemin horizontal soit le moindre possible, nous remarquerons que le poids P , dont les roues sont chargées, se compose du poids à transporter p' et du poids du corps de la voiture qui, dans les charrettes qui ne sont pas spécialement affectées au service du roulage, est toujours en rapport avec celui des roues, ainsi que cela résulte des tableaux B et C. Nous pourrions donc représenter ce poids par αp , en sorte que nous aurons $P = p' + \alpha p$. La substitution de cette quantité dans l'expression générale de l'effort donnera

$$F = p \left((1 + \alpha) \frac{\delta}{r} + \frac{\alpha f r_0}{r} \right) + p' \left(\frac{\delta + f r_0}{r} \right).$$
 Pour que cet effort soit le plus petit possible, il faut que l'on ait

$$\frac{dp}{dr} \left(\frac{(1 + \alpha)\delta + \alpha f r_0}{r} \right) - \frac{p}{r^2} ((1 + \alpha)\delta + \alpha f r_0) - \frac{p'}{r^2} (\delta + f r_0) = 0.$$

Mais le poids étant proportionnel au carré du rayon, on a $\frac{dp}{dr} = \frac{2p}{r}$, ce qui conduit à la relation . . .

$$p \left((1 + \alpha)\delta + \alpha f r_0 \right) = p' (\delta + f r_0).$$
 Comme la quantité $\delta + f r_0$ sera toujours plus petite que $\delta(1 + \alpha) + \alpha f r_0$, on doit en conclure que le poids à transporter devra toujours être plus grand que le poids des roues.

Le poids p' étant connu, ainsi que le rapport $\frac{p'}{p}$, on détermine facilement la valeur de p ; puis, la relation $p = 2\pi ar^2 l$ fait connaître soit la grandeur du rayon, soit la largeur de la bande.

Si la charrette devait se mouvoir sur un chemin en rampe d'une inclinaison i , l'effort serait le moindre possible, lorsqu'on aurait la relation $p(\alpha + 1)(\delta + 2ri) + \alpha fr_0 = p'(\delta + fr_0)$, qui fait reconnaître que, dans cette circonstance, le rapport $\frac{p'}{p}$ n'est pas indépendant de la grandeur du rayon.

60. Nous avons vu précédemment que l'on pouvait prendre $\delta = 0,035$, $fr_0 = 0,0036$, $\pi\alpha = 2565$; quant à la valeur de α , ou du rapport entre le poids du corps de la voiture et celui des roues, les tableaux B et C indiquent que l'on peut faire $\alpha = 0,80$.

Il résulte de l'expression générale de l'effort de la traction sur un chemin horizontal que, quand une charrette est donnée, l'effort croîtra avec la charge p' , et qu'il sera le moindre possible, lorsque cette charge sera nulle ou que la voiture sera vide, ce qui est d'ailleurs évident; mais, lorsque le poids p' est déterminé parmi les différentes charrettes qui peuvent servir à le transporter, il en existe une sur laquelle ce transport se fera avec le moins d'effort: c'est cette charrette dont il s'agit de déterminer le rayon des roues, puisque tout le reste en est une conséquence.

Si, dans la relation qui doit exister entre p' et p , nous remplaçons chacune des lettres α , δ , f , r , par sa valeur, nous aurons $p = 0,585 \times p' = 5130r^2 l$. Le poids de la voiture chargée étant égal à $p(1 + \alpha) + p' = 2,053p'$, si ce poids doit être traîné par un cheval exerçant un effort de 70 kil., la relation

$F = \frac{2p}{r} ((1 + \alpha)\delta + \alpha r_0)$ donnera $70 = 676rl$, ou $rl = 0,103$. Si la largeur des jantes doit être de $0^m,08$, on aura $r = 1^m,29$. Une charrette de $0,08$ de largeur de jantes ayant des roues de $1,29$ de rayon, attelée d'un cheval exerçant un effort de 70 kil., pèserait vide $1228^k,42$ et servirait à transporter un poids de $1159^k,89$. Le poids total de la voiture chargée serait de $2488^k,01$, c'est le plus grand qu'il soit possible de traîner avec des roues de $0^m,08$ de largeur de jante et un effort de 70 kil.

Si la charrette devait suivre un chemin en rampe d'une inclinaison $i = 0,03$, la relation $p(1 + \alpha)(\delta + 2ri) = p'(\delta + fr_0)$ trouvée ci-dessus deviendrait $0,0659p + 0,408pr = 0,0386p'$, et l'expression générale de l'effort minimum qui dans cette circonstance est

$$F = \frac{2p}{r} ((1 + \alpha)(\delta + ri) + \alpha r_0) + \frac{(p(1 + \alpha) + p')ri}{r}$$

deviendrait, dans le cas où la charrette devrait être traînée par un cheval exerçant un effort de 70 kil., $70r = 0,1318p + 0,213pr + 0,083pr^2$. Enfin, si la largeur des jantes doit être $0,08$, on aura, pour déterminer la valeur d' ir , $r^3 + 2,36r^2 + 1,39r - 2,039$, et après deux ou trois essais, on trouvera $r = 0,60$, rayon qui est à peu près égal à celui des roues des chariots comtois, qui sont, comme on sait, destinés à circuler dans les pays de montagnes.

Une charrette de $0,08$ ou plutôt un chariot de $0,04$ de largeur de jantes, dont les roues n'auraient que $0,60$ de rayon, ne pèserait que 266 kil., pourrait être chargée de 500 kil. et traînée par un seul cheval sur une rampe de $0,03$.

Les charrettes ordinaires étant destinées à circuler

sur des chaussées dont les inclinaisons varient depuis l'horizontale jusqu'à l'inclinaison de 0,03, il est avantageux de donner à leurs roues un rayon moyen entre ceux qui conviennent, soit aux parties de niveau, soit aux parties en rampe d'une inclinaison de 0,03; cette valeur moyenne est de 0,945. C'est aussi la dimension qu'on a généralement adoptée. Elle est d'ailleurs en rapport avec la taille des chevaux.

64. Les charrettes, dont nous venons de déterminer le rayon des roues et le poids, sont généralement celles qu'on emploie dans les campagnes; car ces voitures, ayant à parcourir de mauvais chemins avant d'arriver sur une route, portent rarement un poids utile égal à celui qu'elles peuvent porter. Elles diffèrent essentiellement, sous ce rapport, de celles dont le roulage fait usage, puisque ces dernières portent le poids utile le plus considérable que les règlements et leur solidité leur permettent de recevoir.

Nous devons maintenant faire observer que, dans l'intérêt de la conservation des routes, les règlements, auxquels les voitures qui les fréquentent sont soumises, tendent à limiter leur poids et celui de leur charge. Pour atteindre ce double but, on établit un certain rapport entre le poids total et la largeur des bandes des roues. On s'assure d'ailleurs que les limites fixées ne sont pas dépassées, soit en appréciant le poids, d'une manière approximative, par le nombre des chevaux de l'attelage, soit en constatant le poids effectif des voitures chargées, au moyen de ponts à bascule. Nous ne tarderons pas à reconnaître que ces différents modes d'apprécier ou de constater le poids des voitures exercent une certaine influence sur la forme que le roulage est intéressé à

donner à celles de ces voitures dont il fait un fréquent usage.

C'est ici le lieu de rappeler qu'il s'établit toujours une certaine relation entre l'état des routes et le poids des voitures; car, si les chaussées sont mal construites ou mal entretenues, les voitures, exposées à des secousses fréquentes, doivent être plus solides et plus pesantes, et comme le poids total est limité par les règlements, il en résulte que la charge est une moindre partie de ce poids.

Si les routes sont mauvaises, le poids utile peut n'être que la moitié du poids total; si les routes sont bonnes, il en sera les deux tiers; il pourra même en former les trois quarts dans des circonstances assez rares pour nous paraître exceptionnelles. L'industrie du roulage étant intéressée à transporter le poids utile le plus considérable, en restant toutefois dans les limites des prescriptions légales, il en résulte qu'elle modifie la forme de ses voitures, de manière à les rendre plus légères. Cependant, comme il faut que le corps de la voiture soit assez résistant pour ne pas rompre ou seulement fléchir sous la charge, il s'ensuit une relation nécessaire entre le poids du corps de la voiture et celui de la plus forte charge qu'elle peut porter. Nous ne connaissons pas cette relation d'une manière précise: mais les résultats consignés dans le mémoire de M. Schwilgué et dans le rapport de M. Emmery indiquent que, pour les chariots, le poids du corps de la voiture est égal à très-peu près aux trois dixièmes de la charge ou du poids utile, tandis que, dans les charrettes, le poids du corps de la voiture est seulement les trois vingtièmes de la charge, augmentée de cent kilogrammes.

Nous adopterons ces deux rapports dans les applications que nous aurons occasion de faire.

62. Nous avons trouvé précédemment (n° 46), pour l'expression générale de l'effort nécessaire à la traction d'une charrette sur un chemin horizontal,

$$F = \frac{(P + p)\delta}{r} + \frac{Pfr_0}{r}.$$

Pour faciliter les applications, nous modifierons légèrement la forme de cette expression. A cet effet, nous désignerons par Π le poids total de la voiture chargée, ce qui donnera $\Pi = P + p$, et par suite

$$Fr = \Pi(\delta + fr_0) - pfr_0 = \Pi(\delta + fr_0) - 5130r^2/r_0.$$

Dans le numéro précédent, nous avons dit que, pour les charrettes, le poids du corps de la voiture était sensiblement égal à 100 kil., augmentés des $3/20^{\text{es}}$ du poids utile que nous désignerons par p ; on aura donc $\Pi = p + 100 + 1,25p$, et lorsque le poids utile est égal aux deux tiers du poids total, on a alors $\Pi = p + 100 + 0,77\Pi$, d'où $\Pi = \frac{100 + p}{0,23}$.

La relation que nous venons de trouver, entre le poids total et le poids des roues, et l'expression générale de l'effort permettront de déterminer deux des quatre quantités F , l , r et Π , lorsque les deux autres seront données. Si, par exemple, on connaît l'effort dont l'attelage est capable, ainsi que la largeur de la bande des roues, on déterminera facilement le poids total de la charrette, ainsi que le rayon qu'il convient de donner à ses roues.

Dans le n° 47, nous avons trouvé pour l'expression générale de l'effort nécessaire à la traction d'un chariot sur un chemin horizontal

$$F = (P + p)\frac{\delta}{r} + (P' + p')\frac{\delta}{r'} + \left(\frac{P}{r} + \frac{P'}{r'}\right)fr_0.$$

Si nous continuons de désigner par Π le poids total du chariot, nous aurons $\Pi = P + P' + p'$, et si, pour la facilité du tirage, nous admettons que la charge est tellement répartie que l'effort qu'exige l'arrière-train soit sensiblement égal à celui qu'exige l'avant-train, on aura $\frac{P+p}{r} = \frac{P'+p'}{r'} = \frac{\Pi}{r+r'}$, et $\frac{P}{r} + \frac{P'}{r'} = \frac{2\Pi}{r+r'} - \left(\frac{p}{r} + \frac{p'}{r'}\right)$, ce qui changera l'expression générale de l'effort en

$$F = \frac{2\Pi}{r+r'}(\delta + fr_0) - fr_0\left(\frac{p}{r} + \frac{p'}{r'}\right);$$
 mais $\frac{p}{r} = 5130rl$, et $\frac{p'}{r'} = 5130r'l$; on aura donc

$$F(r+r') = 2\Pi(\delta + fr_0) - 5130l(r+r')^2fr_0,$$
 expression qui est identique avec celle qui conviendrait à une charrette dont le poids total serait 2Π , et dont le rayon des roues serait égal à $(r+r')$.

Lorsque le poids que les roues de derrière auront à porter devra être dans un rapport déterminé b avec la largeur des jantes de ces roues, alors on aura $P'+p' = 200bl$, et comme on doit avoir $\frac{P'+p'}{r'} = \frac{\Pi}{r+r'}$, il en résulte que $\Pi = 200bl \frac{(r+r')}{r'}$, et que l'expression générale de l'effort devient

$$F = \frac{400b(\delta + fr_0)}{r'} - 5130(r+r')fr_0.$$

Lors donc que l'on connaîtra l'effort F , dont un attelage est capable, ainsi que les rayons des roues r et r' , on pourra à volonté déterminer, soit la pression b par centimètre de largeur de jantes que les roues de derrière pourront exercer, soit la largeur l qu'il convient de donner aux jantes des roues, pour que la pression effective de ces roues n'excède pas une limite b fixée *a priori*.

Nous avons vu précédemment que, dans les chariots, le poids du corps de la voiture devait être égal aux trois dixièmes du poids utile p ; on a donc ici $\Pi = p + p' + 1,30p$, et lorsque la charge est égale aux deux tiers du poids total, on a $\Pi = p + p' + 0,87\Pi$, d'où $\Pi = \frac{p+p'}{0,13}$, relation qui, dans cette circonstance, doit exister entre le poids total et le poids des roues.

La relation que nous venons de trouver et l'expression générale de l'effort constant dont l'attelage doit être capable permettront de déterminer deux des cinq quantités, r , r' , l , F et Π , lorsque les trois autres seront données.

63. Les lois sur la police du roulage laissent les voituriers libres de donner aux voitures attelées d'un seul cheval telle largeur de jantes que bon leur semble; ces voitures sont la charrette, vulgairement connue sous le nom de *Maringotte*, dont les jantes ont rarement moins de sept centimètres de largeur, et le chariot comtois, dont les jantes n'ont pas moins de six centimètres. Ces dimensions résultent de la nature des choses et du défaut de solidité qu'aurait une roue plus mince, destinée à porter un poids de sept ou huit cents kilogrammes.

Si nous déterminons le poids total de ces voitures, lorsqu'elles portent leur plus forte charge, et que nous le comparions à ces limites inférieures de la largeur des jantes, nous connaîtrons la charge par centimètre de jante que les voituriers, dans l'intérêt de la conservation de leur voiture, ne doivent pas dépasser.

Considérons d'abord la charrette attelée d'un cheval capable d'un effort constant de 70 kil.; admettons toujours qu'il s'agisse d'une chaussée en

empierrement en bon état, sur laquelle on ait $\delta = 0,035$, et que l'essieu soit tel que $fr_0 = 0,0036$; alors l'équation générale $Fr = \Pi(\delta + fr_0) - pfr_0$ deviendra

$$70r = \frac{p + 100}{0,233} 0,0386 - 0,0036p = 16,56 + 0,1620p.$$

Mais nous savons qu'il est très-rare de rencontrer une charrette de roulage, attelée d'un seul cheval, dont les jantes aient moins de $0^m,07$ de largeur, et puisque cette largeur paraît être la moindre que les conditions de solidité obligent à donner à ces sortes de voitures, nous prendrons $l = 0,07$, et comme nous avons trouvé précédemment $p = 5130r^2l$, nous en concluons que, dans la circonstance dont nous nous occupons, on a $p = 359r^2$. Cette valeur, substituée dans l'équation précédente, donnera $58,16r^2 - 70r + 16,56 = 0$, ou $r^2 - 1,203r + 0,284 = 0$; d'où nous tirerons $r = 0,88$, et par suite $p = 277,51$ et $\Pi = 1620$. La charge ou le poids utile p , étant les deux tiers du poids total, on aura $p_t = 1080$, et la voiture vide pèsera 540 kil.

Il résulte de ce que nous venons de voir qu'il ne peut y avoir que des inconvénients à donner plus de 0,90 au rayon des roues des charrettes connues sous le nom de *Maringottes*, que le plus grand poids que ces voitures puissent porter est de 1080 kil., et que la plus grande pression qu'elles exercent sur les chaussées est d'environ 115 kil. par centimètre de largeur de jantes.

Il est inutile de chercher à construire des voitures de ce genre pouvant porter un poids triple du leur, car on ne pourrait le faire qu'en diminuant le poids et par conséquent le rayon des roues; et alors l'augmentation de charge que l'on pourrait obtenir

ne compenserait pas la perte que l'on éprouverait sur l'effort de traction. Il est d'ailleurs facile de s'en assurer en remplaçant p par les $3/4$ de Π et recommençant les calculs que nous venons de faire.

Occupons-nous actuellement des chariots attelés d'un seul cheval, connus sous le nom de *chariots comtois*, et cherchons à déterminer le poids total d'une de ces voitures, dont la construction est tellement légère que le poids de l'une d'elles, non chargée, atteint à peine 400 kil. Le rayon des roues de devant est ordinairement de 0,60, et celui des roues de derrière de 0,70, et les jantes n'ont jamais moins de 0,06 de largeur. Si nous substituons ces valeurs dans l'équation générale des chariots

$$F(r+r') = 2\Pi(\delta + fr_0) - 5130lfr_0(r+r')^2,$$

en supposant toujours que le cheval attelé à cette voiture soit capable d'un effort constant de 70 kil., nous aurons, pour déterminer le poids total Π ,

$$70 \times 4,30 = 0,0772\Pi - 4,41 \times 4,69,$$

d'où $\Pi = 4,204$ kil., et comme le chariot pèse environ 400 kil., il en résulte que le poids utile pèse rarement plus de 800 kil., et qu'il ne doit pas s'élever au triple du poids de la voiture vide.

Lorsque nous aurons donné les moyens d'apprécier la force des attelages, nous chercherons à déterminer les poids des charrettes et ceux des chariots attelés de plusieurs chevaux.

64. Lorsque, dans l'intérêt de la conservation des chaussées, les règlements sur la police du roulage obligent à proportionner le poids des voitures chargées à la largeur des jantes, si b est le poids autorisé par chaque centimètre de la largeur de la jante, alors le poids total Π d'une charrette sera exprimé par

200bl et l'équation générale qui convient à ces voitures donnera $\frac{F}{l} = \frac{200b(\delta + fr_0)}{r} = 5130rfr_0$, c'est-à-dire que le rapport $\frac{F}{l}$ reste constant avec la grandeur du rayon ; or, nous venons de voir que, lorsque l'effort est de 70 kil., la largeur des jantes n'est jamais moindre que 0^m,07, ce qui donne $\frac{F}{l} = 4000$, et comme ce rapport doit rester constant avec la grandeur du rayon, on doit en conclure que, pour toutes les charrettes dont les roues ont 0^m,90 de rayon, le poids par centimètre de largeur de jante peut être de 444 kil.

Dans les chariots, lorsque le poids total doit être proportionnel à la largeur des jantes, ou lorsque l'on a $\Pi = 400bl$, alors la valeur du rapport $\frac{F}{l}$ devient $\frac{F}{l} = \frac{800b(\delta + fr_0)}{r + r'} = 5130(r + r')fr_0$, c'est-à-dire que ce rapport reste constant avec la somme des grandeurs des rayons des roues.

Pour les chariots comtois, nous savons que l'on a $F = 70$, $l = 0,06$, $r + r' = 1,30$; on trouve alors $\frac{F}{l} = 1166,67 = 23,75b - 24$, d'où $b = 50,43$. C'est le rapport qui, pour ces chariots, s'établit naturellement, ou par la force des choses, entre le poids total et la largeur des jantes de leurs roues, ou, si l'on aime mieux, c'est la pression que ces voitures exercent sur les chaussées par centimètre de largeur de jante. La faiblesse de cette pression justifie le peu de dommages que les chariots comtois causent aux chaussées.

Ainsi les deux espèces de voitures, au moyen desquelles la force du cheval est employée de la ma-

nière la plus avantageuse à l'industrie du transport, et qui ne sont soumises à aucune prescription légale relative à leur poids, n'exercent sur les chaussées, et par centimètre de largeur de jante, que des pressions dont la plus forte est de 114 kil., pour les charrettes, et de 50 kil. seulement, pour les chariots.

V. DE LA FORCE DES CHEVAUX ET DE CELLE DES ATTELAGES.

65. Les chevaux sont les moteurs de l'industrie du roulage. En les réunissant, on forme des attelages, qui diffèrent, et par le nombre, et par la disposition des chevaux dont ils sont composés. Comme il importe que la force motrice dont on dispose soit avantageusement employée, nous rappellerons sommairement les moyens d'apprécier cet emploi, puis nous entrerons dans tous les détails que comporte le sujet dont nous nous occupons.

66. Les attelages varient par le nombre et la disposition des chevaux dont ils se composent. Dans l'attelage des charrettes, les chevaux, quel que soit leur nombre, sont toujours placés sur une seule file.

L'attelage des chariots, lorsqu'il est d'un nombre pair de chevaux, se compose de deux files, placées symétriquement par rapport au timon et à son prolongement. Lorsque le nombre des chevaux est impair, il peut être de trois, de cinq et même de sept.

Dans l'attelage de trois chevaux, deux sont au timon et le troisième en avant; c'est l'attelage en arbalète.

Si l'attelage est de cinq chevaux, deux sont au timon, les trois autres, que l'on appelle chevaux de volée, sont en avant et sur un même rang.

Lorsque l'attelage est de sept chevaux, deux sont au timon, deux à la volée, au bout du timon, et trois en avant et de front.

Dans l'attelage en file, le tirage est plus uniforme; mais, lorsque les chevaux sont deux ou trois de front, ils peuvent exercer de plus grands efforts et surmonter plus facilement les obstacles accidentels qu'ils sont exposés à rencontrer.

Nous avons à déterminer la force des attelages, d'après le nombre des chevaux dont ils sont composés; mais avant de nous occuper de cet objet, nous devons donner les moyens d'apprécier la force de chaque cheval.

67. Pour apprécier la force d'un cheval, il suffit de faire une application fort simple de la théorie que nous avons exposée dans le premier volume de notre traité des moteurs. Nous rendrons cette application plus facile, en rappelant succinctement quelques-uns des résultats de la théorie dont il s'agit.

M étant la masse d'un cheval habitué à la marche et au travail,

T le temps ou la durée journalière de la marche ou du travail,

V la vitesse que le cheval peut prendre chaque jour et conserver pendant le temps T , lorsqu'il marche libre et sans charge, de manière à pouvoir faire journellement le même exercice sans éprouver d'excès de fatigue,

v la vitesse que le cheval peut conserver pendant le même temps T , en exerçant un certain effort F , sans éprouver d'excès de fatigue,

Nous avons trouvé :

1° Que la puissance absolue du cheval, ou la plus grande quantité d'action qu'il puisse développer chaque jour, sans éprouver d'excès de fatigue, a pour expression $1/2 M V^2 T$;

2° Que le cheval, habitué au travail, n'éprouve pas d'excès de fatigue lorsqu'il marche libre et sans charge, si la quantité $V^2 T$ reste constante, quand on fait varier V et T entre les limites de vitesse et de durée qui conviennent à ses habitudes et à sa constitution, la quantité $V^2 T$, constante pour chaque cheval, étant d'ailleurs susceptible d'éprouver de légères variations d'un cheval à un autre, mais restant sensiblement constante pour des chevaux de même taille, de même constitution et à peu près du même âge ;

3° Que lorsque le cheval travaille pendant le temps T , avec la vitesse v , sa puissance relative ou la plus grande quantité d'action que, dans cette circonstance, il puisse développer, a pour expression

$1/2 M (2V - v) v T$, que l'effort qu'il exerce est $F = M(V - v)$, la quantité d'action qu'il développe $Fv + \frac{Mv^2}{2}$, et que, pour que cette quantité n'excède

pas sa puissance, on doit avoir $Fv + \frac{Mv^2}{2} = \frac{M}{2} (2V - v)v$,

ce qui donne pour sa force disponible

$$F + \frac{Mv}{2} = \frac{M}{2} (2V - v).$$

68. C'est peut-être ici le lieu de faire observer que, si l'on néglige la beauté des formes, les qualités utiles du cheval se réduisent à trois qui sont : l'agilité, la force et la puissance.

Comme les chevaux possèdent ces qualités à divers

degrés, on peut avoir besoin de les apprécier dans plusieurs sujets présentant des différences dans leur taille, leur constitution et leur âge. Pour y parvenir, il suffit de faire marcher ou courir ensemble ces chevaux, pendant un temps donné, et de renouveler ces exercices plusieurs jours de suite : les chevaux les meilleurs, ou d'une plus grande valeur, seront ceux qui n'éprouveront pas d'excès de fatigue et qui pourront reprendre le lendemain les exercices de la veille, et continuer ainsi indéfiniment sans éprouver d'altération dans leur santé, ni d'affaiblissement dans leur constitution.

Si, pendant la marche ou les courses, chaque cheval est libre et sans charge, le plus vif, le plus ardent ou le plus prompt est celui qui, au bout du temps fixé ou à la fin des exercices, aura fait le plus long parcours. La vitesse de ce cheval, ou la quantité V , sera plus grande pour lui que pour tout autre.

Désignons par V' V'' V''' etc. les vitesses des autres chevaux, par M la masse du premier, par M' , M'' , M''' , etc., les masses respectives de chacun des autres, le temps T des exercices étant le même pour tous.

Si nous faisons les différents produits MV , $M'V'$, $M''V''$, $M'''V'''$, etc., MV^2 , $M'V'^2$, $M''V''^2$, etc., il résulte de ce que nous avons dit ci-dessus ou de nos études sur les moteurs animés, que le cheval le plus fort sera celui pour lequel le produit MV sera le plus grand et que le plus puissant ou le plus apte au travail sera celui dont le produit MV^2 l'emportera sur tous les autres produits analogues.

Lorsque, pendant les exercices, les chevaux, au lieu d'être libres et sans charge, sont assujettis à porter l'homme qui doit les diriger, ainsi que cela a

généralement lieu, on n'obtient plus aussi promptement l'expression de la force et celle de la puissance; il faut d'abord conclure de la vitesse que le cheval prend dans cette circonstance celle qu'il pourrait prendre s'il était libre et sans charge. Nous avons donné sur ce sujet, dans notre Traité sur les moteurs, tous les développements nécessaires; nous ne pouvons qu'y renvoyer pour ne pas trop nous écarter de l'objet que nous avons en vue.

Les quantités qui expriment la force seront généralement inégales; il en sera de même des quantités qui expriment la puissance, et un même sujet ne pourra l'emporter sur les autres, en force et en puissance, qu'autant que les chevaux admis au concours seront d'une constitution peu différente, ou auront des masses à peu près égales. Dans ces circonstances, le cheval le plus prompt pourra être en même temps le plus fort et le plus puissant.

L'observation qui précède justifierait, en partie, les courses qui ont lieu chaque année, sur différents points de la France, si les chevaux admis à concourir étaient exercés plusieurs jours de suite, si les uns n'éprouvaient pas un excès de fatigue, tandis que d'autres pourraient faire le lendemain le même exercice et le continuer indéfiniment. D'ailleurs, dans ces courses on n'apprécie que la vitesse et on ne tient aucun compte de la force et de la puissance, qualités si éminemment utiles pour les chevaux employés dans l'agriculture, dans l'industrie et même dans les armées. Le cheval qui possédera ces qualités pourra être moins léger, moins élégant qu'un autre plus agile; mais, comme il sera plus utile, il aura une plus grande valeur, quoique son prix soit souvent beaucoup moindre.

C'est surtout des chevaux de ce genre que les haras devraient s'attacher à produire, en laissant aux personnes riches le soin d'élever les chevaux qu'elles destinent soit à leurs plaisirs, soit aux attelages de luxe, et qui sont seulement remarquables par leur agilité et aussi par l'élégance de leurs formes.

69. Le cheval qui marche en travaillant, dix heures par jour, effectue son travail maximum, en prenant une vitesse qui varie de 3,200 mètres à 4,000 mètres par heure. Navier et Wood portent cette vitesse à 3,200 mètres, Tredgold et Edgeworth l'évaluent à 4,000 mètres. La moyenne entre ces quantités est de 3,600 mètres, ou de 1 mètre par seconde, vitesse qui ne diffère pas sensiblement de celle que prennent les chevaux du roulage, habitués à marcher dix heures par jour.

La vitesse du cheval, qui produit son travail maximum, étant la moitié de celle que ce cheval peut prendre, lorsqu'il marche libre et sans charge pendant le même temps, il en résulte que, lorsque $T = 10$ heures, ou 36,000 secondes, on doit avoir $V = 12$ et par suite : $V^2T = 144,000$, résultat moyen qui ne varie pas sensiblement pour des chevaux de même taille, habitués à un travail analogue, et d'une bonne constitution.

La relation $V^2T = 144,000$ donne $V = 15$ mètres, lorsque $T = 640''$, et $V = 632''$, lorsque $T = 3,600$ secondes ou une heure. On sait, en effet, que la plus grande vitesse que l'on ait pu obtenir du cheval, pendant quelques instants, a rarement dépassé 16 mètres, que la plus grande vitesse des courses du Champ-de-Mars est de 14 à 15 mètres par seconde, et que la plus grande durée de ces courses n'excède

pas un quart d'heure ; on sait encore que le cheval que l'on fait courir une heure, chaque jour, ne peut parcourir que 23 kilomètres.

Les résultats que l'on peut obtenir de la relation $V^3T = 144,000$, étant indépendants de la masse du cheval, conviennent à tous les chevaux de même taille et à peu près du même âge, entre les limites déterminées par les habitudes de chacun. Le cheval de course, par exemple, ne supporterait pas une marche de 18 heures à faible vitesse, le cheval de trait prend difficilement le galop, et ne peut longtemps en supporter la fatigue.

70. Le cheval exercé qui produit son travail maximum exerce alors un effort F égal à $\frac{MV}{2}$. Il résulte de cette expression que l'effort est proportionnel à la masse ou au poids de l'animal, mais cela n'est exact que pour le cheval habitué à la marche ou au travail, et ne saurait s'appliquer à des sujets trop jeunes pour que leur corps ait atteint tout son développement, et à des sujets trop vieux et déjà affaiblis par l'âge ; pour ces chevaux, lorsqu'on juge à propos de les employer, il faut, afin d'apprécier le travail dont ils sont capables, les soumettre à des expériences spéciales. Il est également important de ne pas confondre le cheval exercé avec le cheval qui s'est engraisé par le repos. Lorsque le premier est massif, c'est par ses os et sa chair musculaire qui constituent sa force, tandis que le second possède une masse incommode qui, loin d'augmenter sa force, la diminue.

Comme le poids des chevaux varie de 200 à 700 kil., il en résulte que, lorsqu'ils marchent pendant dix heures, en produisant leur travail maximum,

l'effort qu'ils exercent varie de $20^k,58$ à $74^k,35$ et leur puissance absolue, de $4,467,360^{\text{km}}$ à $5,436,480^{\text{km}}$, leur puissance relative, lorsqu'ils produisent leur travail maximum, se réduit aux trois quarts de leur puissance absolue, et que la quantité d'action employée à exercer l'effort est égale à la moitié de la même puissance absolue.

Lorsque le cheval emploie sa force à tirer sur un chemin horizontal une voiture d'un poids P et que la résistance que cette voiture éprouve par unité de poids est égale à a , l'effort nécessaire est alors égal à Pa ; pour que le cheval utilise sa force de la manière la plus avantageuse, il faut donc que l'on ait $Pa = \frac{MV}{2}$, et lorsque ce cheval doit travailler 10 heures, on a $V = 2$, ce qui donne $P = \frac{M}{a}$.

Si la voiture doit suivre un chemin en rampe d'une inclinaison i , l'effort à exercer se trouve augmenté du poids P de la voiture et de celui du cheval Mg , décomposés suivant la rampe, ou de $(P + Mg)i$. On doit donc avoir, dans les mêmes conditions que ci-dessus, $P(a + i) + Mgi = M(V - v)$. Mais, lorsqu'un cheval produit son travail maximum sur une rampe, on a $v = \frac{V - gi}{2}$, ce qui donne $P = \frac{M(V - gi)}{2(a + i)}$.

71. Lorsque l'attelage d'une voiture est composé de plusieurs chevaux, la résultante des efforts n'est pas égale à leur somme. Cette résultante est toujours moindre que la somme des efforts que chaque cheval exerce, lorsqu'il agit seul, et la différence entre la résultante et la somme des efforts est d'autant plus grande que le nombre des chevaux est plus considérable, ou, ce qui revient au même, la charge moyenne

qui correspond à chaque cheval diminue avec le nombre des chevaux de l'attelage.

Nous ne tarderons pas à donner les moyens d'apprécier cette perte; mais nous en ferons d'abord abstraction et nous supposerons la résultante des efforts égale à la somme des efforts dont chaque cheval de l'attelage est capable.

72. Considérons un attelage composé d'un nombre n de chevaux à peu près d'égale force, ou d'une constitution semblable et d'une masse sensiblement égale; l'effort que l'un de ces chevaux, produisant son travail maximum, pourra exercer sur un chemin horizontal, sera égal à $\frac{MV}{2}$, et, sur un chemin en rampe, à $\frac{M(V-gi)}{2}$.

Le poids total que ce cheval pourra tirer sur un chemin horizontal sera égal à $\frac{MV}{2a}$, et l'attelage, composé de n chevaux, pourra tirer sur la rampe une voiture d'un poids total $P = \frac{nM(V-gi)}{2(a+g)}$.

73. Considérons actuellement un attelage composé d'un certain nombre de chevaux de masse inégale, mais à peu près de même taille ou de constitution peu différente, c'est-à-dire de chevaux susceptibles de prendre une vitesse égale, lorsqu'ils marchent pendant le même temps, en produisant leur travail maximum.

Si $M, M', M'', \text{ etc.}$, sont les masses de ces différents chevaux, on aura pour la somme de leurs efforts sur un chemin horizontal, lorsqu'ils produisent leur travail maximum, $\frac{(M+M'+M''+\text{etc.})V}{2}$, et pour

le poids total de la voiture que l'attelage pourra tirer,

$$P = \frac{(M + M' + M'' + \text{etc.})V}{2a}$$

Si le chemin est en rampe, les chevaux étant toujours assujettis à produire leur travail maximum, la somme des efforts sera réduite à

$$\frac{(M + M' + M'' + \text{etc.})(V - gi)}{2},$$

et le poids total de la voiture à

$$P = \frac{(M + M' + M'' + \text{etc.})(V - gi)}{2(a + i)}$$

74. Considérons enfin un attelage composé de chevaux qui diffèrent par leur masse et leur constitution, en sorte que, dans la relation $V^2T = c$, la quantité c , constante pour un même cheval, varie en passant d'un cheval à un autre. Avec un attelage ainsi composé, chaque cheval ne peut plus produire son travail maximum : quelques-uns prennent une vitesse plus faible que celle qu'ils pourraient prendre, sans éprouver d'excès de fatigue ; d'autres sont obligés de prendre une vitesse plus forte que celle qui convient à leur constitution.

Désignons comme précédemment par M la masse du premier cheval, par V sa vitesse, lorsqu'il marche libre et sans charge pendant le temps T , par c la quantité V^2T , par v la vitesse qu'il est obligé de prendre ; désignons encore par M' , V' , c' , M'' , V'' et c'' , etc., les quantités analogues qui conviennent aux autres chevaux de l'attelage, la durée du travail ou la quantité T , et la vitesse v de la marche étant commune à tous les chevaux.

L'effort du premier cheval sera égal à $M(V - v)$; celui du second, à $M'(V' - v)$; du troisième, à $M''(V'' - v)$, etc. ; la somme de tous les efforts sur

un chemin horizontal aura donc pour expression $MV + M'V' + M''V'' + \text{etc.} = (M + M' + M'' + \text{etc.})v$, mais des relations $V^2T = c$, $V'^2T = c'$, etc., on tire $V = \sqrt{\frac{c}{T}}$, $V' = \sqrt{\frac{c'}{T}}$, etc.; ce qui donne, pour l'expression du poids total de la voiture que l'attelage pourra tirer sur un chemin horizontal

$$P = \frac{M\sqrt{c} + M'\sqrt{c'} + M''\sqrt{c''} + \text{etc.}}{a\sqrt{T}} = \frac{(M + M' + M'' + \text{etc.})v}{a}$$

Si le chemin est en rampe d'une inclinaison i , alors les efforts des chevaux ayant pour expression $M(V - v - gi)$, $M'(V' - v - gi)$, etc., la somme des efforts ou la force de l'attelage devient $M\sqrt{c} + M'\sqrt{c'} + M''\sqrt{c''} + \text{etc.}$

$$P = \frac{M\sqrt{c} + M'\sqrt{c'} + M''\sqrt{c''} + \text{etc.}}{(a + i)\sqrt{T}} = \frac{(M + M' + M'' + \text{etc.})(v + gi)}{a + i}$$

75. Le roulage paraît trouver de l'avantage à préférer les grandes voitures aux petites. Cependant cet avantage est limité par la perte de force qui a lieu dans tout attelage composé de plusieurs chevaux; car le poids moyen tiré par chaque cheval diminue progressivement à mesure que le nombre des chevaux augmente; aussi le roulage ordinaire emploie-t-il rarement des attelages de plus de cinq chevaux, et faut-il des cas exceptionnels pour qu'il fasse usage des attelages de huit chevaux.

La perte de force qui a toujours lieu dans les attelages composés de plusieurs chevaux provient du défaut d'uniformité dans l'action de chaque cheval et par suite du défaut d'ensemble dans les efforts exercés.

Dans l'attelage d'une charrette composé de quatre et cinq chevaux, cette perte provient en partie du limonier qui, étant occupé à diriger la voiture et obligé de supporter une charge plus ou moins forte, ne peut exercer qu'un faible effort de traction.

Dans l'attelage des chariots, la tension des chaînes, leur poids, celui des traverses et des palonniers fatiguent les chevaux et consomment inutilement une partie des efforts.

Sans nous arrêter plus longuement sur les causes de ces pertes, comme elles ont réellement lieu, nous allons indiquer les moyens de les apprécier.

M. Schwilgué, dans le mémoire sur les routes et le roulage qu'il a publié en 1832, a cherché à constater, par un grand nombre d'observations, la charge moyenne portée par les voitures à trois, quatre, cinq chevaux, etc. Voici les principaux résultats de ses observations :

NOMBRE DES CHEVAUX de l'attelage.	RÉSULTATS DE L'OBSERVATION.		RÉSULTATS DU CALCUL.	
	Poids de la voiture et de son chargement.	Poids moyen tiré par chaque cheval.	Poids de la voiture et de son chargement.	Poids moyen tiré par chaque cheval.
	kil.	kil.	kil.	kil.
Attelage de 1	1441	1441	1441	1441
— 2	2877	1438	2748	1372
— 3	3933	1311	3912	1304
— 4	5100	1275	4944	1237
— 5	5425	1085	5834	1167
— 6	5442	907	6578	1099
— 7	5478	783	7195	1026
— 8	5484	685	7683	960

M. Schwilgué a d'ailleurs le soin de faire connaître

tre que les chiffres qui correspondent aux attelages de 6, 7 et 8 chevaux se rapportant à des voitures du roulage accéléré, qui ne portent pas plus que les voitures ordinaires à cinq chevaux, il convient d'en faire abstraction.

Pour exprimer analytiquement l'effort constant F_n dont est capable un attelage composé de n chevaux de force sensiblement égale, représentons par F l'effort constant dont chaque cheval serait capable, s'il agissait isolément, la force perdue dans l'attelage sera égale à $F_n - F_n$, et comme elle dépendra en même temps du nombre des chevaux et de la force de chacun, nous pourrons écrire $F_n - F_n = f(n, F)$. Pour trouver la forme de la fonction f , nous ferons observer d'abord que cette fonction doit nécessairement être nulle, lorsque $n = 0$, puisque, dans ce cas, on a séparément $F_n = 0$, et $F_n = 0$; que cette même fonction est encore nulle, lorsque $n = 1$; car alors on a $F = F$; d'où il résulte que l'on doit avoir $f(n, F) = n(n-1) \varphi(F)$. Mais $\varphi(F)$ devant être nulle avec F et croître avec cette quantité, nous poserons $\varphi(F) = \frac{F}{\alpha}$, sauf à vérifier par l'observation si cette forme peut être admise. Nous aurons ainsi $F_n - F_n = n(n-1) \frac{F}{\alpha}$, d'où $F_n = \frac{F}{\alpha} (\alpha + 1 - n)n$.

Mais Π_n étant le poids total de la voiture tirée par l'attelage composé de n chevaux, et Π le poids total de la voiture attelée d'un seul cheval, et a la résistance à la traction que présente la chaussée, nous savons que l'on doit avoir $F_n = \Pi_n a$, et $F = \Pi a$, ce qui donnera $\Pi_n = \frac{\Pi}{\alpha} (\alpha + 1 - n)n$, relation entre les poids Π_n et Π , indépendante de la résistance de la chaussée, mais dans laquelle α est indéterminé.

Pour trouver la valeur de α , nous ferons usage des résultats des observations faites par M. Schwilgué, lesquelles nous donnent $\Pi_1 = 1441$, et lorsque $n = 3$, $\Pi_3 = 3933$, nombres qui nous feront trouver α à très-peu près. C'est à l'aide de la valeur de α , ainsi déterminée, que nous avons obtenu les nombres qui figurent dans les deux dernières colonnes du tableau qui précède.

Si l'attelage était composé de plusieurs chevaux pouvant exercer chacun isolément un effort constant de 70 kil., nous aurions, pour déterminer l'effort constant que peut exercer cet attelage, $F_n = 3.33 (22 - n) n$, et en faisant successivement $n = 1$, $n = 2$, $n = 3$, $n = 4$, $n = 5$, nous trouverions : $F = 70$ kil., $F_2 = 133.20$, $F_3 = 189.81$, $F_4 = 239.76$, $F_5 = 283.05$.

76. Si la formule $F_n = \frac{F}{\alpha} (\alpha + 1 - n) n$ peut être admise, il en résulte que l'attelage susceptible d'exercer le plus grand effort doit être composé d'un nombre de chevaux $n = \frac{\alpha + 1}{2} = 11$. L'expression de cet effort serait $F_{11} = \frac{F}{\alpha} \left(\frac{\alpha + 1}{2}\right)^2$, et le poids total de la voiture correspondant, $\Pi_{11} = \frac{F}{\alpha a} \left(\frac{\alpha + 1}{2}\right)^2$.

Il ne peut donc y avoir que du désavantage à atteler plus de onze chevaux à un chariot ; car alors la perte résultant du défaut d'ensemble dans les efforts réduirait la force de l'attelage d'une quantité supérieure à l'augmentation produite par un cheval de plus. Dans les circonstances rares et tout à fait exceptionnelles où l'on est obligé d'atteler un grand nombre de chevaux au même véhicule, il faut subdiviser l'attelage, réunir les chevaux par groupe de quatre

ou cinq, et charger un conducteur de stimuler chaque groupe de manière qu'il y ait plus d'ensemble dans les efforts. C'est ainsi que l'on a été obligé d'agir pour transporter de Paris à Lyon la statue équestre de Louis XIV. Le chariot qui a servi à ce transport pesait avec sa charge 33.600 kil. ; son attelage se composait de 22 chevaux dans les parties en plaine, et de 36 sur les plus fortes rampes. Ce nombreux attelage, convenablement dirigé, était conduit et stimulé par plusieurs voituriers intelligents.

77. Pour achever ce qui est relatif aux attelages, nous allons chercher à déterminer le nombre des chevaux qu'il convient d'atteler aux voitures de roulage, afin de diminuer autant que possible les frais du transport. Nous donnerons par conséquent les moyens de composer, dans des circonstances données, l'attelage que l'on peut appeler le plus avantageux.

Les frais de transport se composent du prix de la journée du conducteur de la voiture, du prix de la journée des chevaux, du prix de location de la voiture et de son entretien. La somme de tous ces frais, soit au bout de la journée, soit au bout du chemin parcouru, comparée à la masse transportée, permet de déterminer le prix de revient du transport. Or, sur une même voie, ce prix variera avec la force de l'attelage employé ; car, si la voiture est attelée d'un seul cheval, la dépense du conducteur venant s'ajouter à celle du cheval rendra les frais du transport plus considérables que si la voiture était attelée de deux chevaux ; mais si l'on rend trop nombreux les chevaux de l'attelage, le défaut d'ensemble dans les efforts cause une perte dont la valeur finit par l'emporter sur l'économie que l'on trouvait sur les frais

le conduite, et les frais du transport, après avoir diminué, finissent par augmenter : il existe donc une combinaison qui doit rendre ces frais les plus faibles possible, et c'est cette combinaison que nous allons chercher à déterminer.

Désignons toujours par p , le poids utile dont une voiture est chargée, poids qui est ordinairement les $2/3$ du poids total Π que nous savons être égal à

$$\frac{F}{ax} (\alpha + 1 - n)n.$$

Si nous désignons par x le prix de revient du transport de l'unité de poids au bout de la journée, le prix de revient du transport du poids utile p , sera px qui devra être égal à la somme de tous les frais du transport pendant la journée. Or, cette somme se compose :

1° Du prix de la journée du voiturier, que nous désignerons par c ;

2° Du prix de la journée des n chevaux de l'attelage, qui peut être représenté par ne , en appelant e le prix de la journée d'un cheval tout compris ;

3° Des frais relatifs à l'achat, à l'entretien, au renouvellement de la voiture, des harnais, des baches, et au graissage, frais qui croissent avec le poids utile p , et que nous supposerons dans un rapport constant γ avec ce poids, en sorte qu'ils pourront être exprimés par $p\gamma$.

Les frais du transport pendant la journée, à la vitesse ordinaire du roulage du poids utile p , sont donc égaux à $ne + c + p\gamma$, c'est-à-dire que l'on doit avoir $px = ne + c + p\gamma$, ou $x = \frac{ne + c}{p} + \gamma$. Pour que cette quantité soit la plus petite possible, il est nécessaire que l'on ait $dx = 0$, ce qui conduit à la re-

lation $p, edn - (ne + c)dp = 0$; mais le poids utile p , étant les deux tiers du poids total Π , on a $p = \frac{2F}{3a\alpha}(\alpha + 1 - n)n$, ce qui donne $dp = \frac{2F}{3a\alpha}(\alpha + 1 - 2n)dn$. La substitution de ces deux quantités dans la relation précédente la réduit à $en^2 + 2cn = c(\alpha + 1)$, d'où $n = \frac{c}{e} + \frac{c}{e} \sqrt{1 + \frac{e}{c}(\alpha + 1)}$, c'est-à-dire que le nombre des chevaux de l'attelage le plus avantageux ne dépend que du rapport $\frac{e}{c}$ entre le prix de la journée du conducteur et celui de la journée d'un des chevaux.

Si ces prix sont égaux, ou si $c = e$, comme $\alpha = 24$, on trouvera $n = 3.80$, c'est-à-dire que l'attelage le plus avantageux doit, dans cette circonstance, être composé de quatre chevaux au plus.

Si le prix de la journée du cheval est double de celui de la journée du voiturier, on trouvera $n = 2.85$, c'est-à-dire que, dans cette circonstance, l'attelage le plus avantageux doit être composé de trois chevaux au plus.

Supposons, pour fixer les idées, que $c = 4^f 50$ et $e = 4$ fr.; nous trouverons que l'attelage le plus avantageux doit avoir au moins trois chevaux et au plus quatre. On sait d'ailleurs que le plus grand nombre des attelages du roulage sont ordinairement composés de trois chevaux, et que l'on voit rarement des attelages de plus de cinq chevaux.

La charrette attelée de trois chevaux dont chacun sera capable d'un effort constant de 70 kil., pèsera, chargée, 4500 kil., portera un poids utile de 3000 kil. et parcourra dans la journée 36 kilomètres. Les frais d'achat, d'entretien, de renouvellement, de

graissage, que nous avons désignés par $p\gamma$ s'élèvent à environ 1' 60 par jour; le prix du transport de 3000 kil. ou trois tonnes, à 36 kilomètres, sera donc

$$x \times 3 = ne + c + p\gamma = 12 + 4,50 + 1,60 = 18,10.$$

Le prix du transport d'une tonne, à 36 kilomètres, reviendra ainsi à 6' 03, et celui d'une tonne à un kilomètre à 0' 167, prix un peu plus faible que celui du roulage, comme cela doit être, puisqu'il faut y ajouter un cinquième environ pour tenir compte des faux frais et du bénéfice du commissionnaire, ce qui élève le prix moyen que doit payer le commerce à 0' 201.

78. Nous terminerons ces recherches par quelques applications numériques sur la force des attelages, composés de chevaux capables d'exercer un effort constant de 70 kil. pendant 10 heures chaque jour, sur les poids effectifs des charrettes et chariots traînés par ces attelages, sur la largeur à donner aux jantes ou bandes des roues de ces voitures pour que la pression par centimètre de jante n'excède pas 418 kil.

Pour faire les calculs que nous venons d'indiquer, nous avons appliqué aux attelages la formule $F_n = 3,33(22 - n)nF$; aux charrettes traînées par ces attelages, la formule $\frac{F_n}{l}r = 200b(\delta + fr_0) - 5130r^2fr_0$, et aux chariots, la formule

$$\frac{F_n}{l} = \frac{400b(\delta + fr_0)}{r} - 5130(r + r')fr_0.$$

Comme ces calculs ne présentent aucune difficulté, nous nous bornerons à en réunir les résultats dans le tableau suivant :

Force des Attelages, Poids des voitures qu'ils peuvent trainer, Largeur à donner aux jantes des roues pour que la pression n'excède pas 118 kil. par centimètre.

NOMBRE des CHEVAUX de l'attelage.	EFFORT CONSTANT dont l'attelage est capable.	POIDS TOTAL de la voiture chargée.	La PRESSION par centimètre de largeur étant de :	La LARGEUR des JANTES sera de :	La LARGEUR des JANTES étant de :	La PRESSION par centimètre de largeur sera de :
Charrettes ou voitures à deux roues chacune de 0,90 de rayon.						
1	70 00	1659	118	0 070	0 07	118
2	133 20	3139	118	0 133	0 09	174
3	189 81	4484	118	0 190	0 11	204
4	239 76	5564	118	0 240	0 11	253
5	283 05	6608	118	0 280	0 11	300
Charrettes ou voitures à quatre roues, dont la somme de rayon est de 1^m 50 pour les deux roues d'un même côté.						
1	70 00	1382	77	0 060	0 060	77
2	133 20	2665	118	0 075	0 075	118
3	189 81	3732	118	0 106	0 090	133
4	239 76	4729	118	0 134	0 090	175
5	283 05	5586	118	0 158	0 110	169
6	319 68	6304	118	0 178	0 110	191
7	349 65	6839	118	0 193	0 110	208
8	372 96	7358	118	0 208	0 110	223

Il résulte de ce tableau que si l'on limite à 0^m20 la plus grande largeur des jantes des voitures de roulage, et que si l'on fixe la limite des pressions, par centimètre de largeur, à 118 kil., pression égale à celle qu'exercent sur les chaussées les charrettes à un cheval, qui ne sont soumises à aucune prescription sur la largeur des jantes, les charrettes ne doivent pas avoir plus de trois chevaux à leur attelage, circonstance dans laquelle le poids total de la voiture excède rarement 4,500 kil., et où la force des chevaux est employée de la manière la plus avantageuse.

Il en résulte encore que si l'on adopte la même

limite de pression pour les grandes roues des chariots, supposées d'un mètre de rayon, les roues de 0^m20 de largeur de jantes correspondront à l'attelage de huit chevaux; cet attelage est donc le plus nombreux dont il convienne de faire usage dans les circonstances ordinaires.

Si un objet à transporter était d'un poids assez considérable pour exiger un attelage de onze chevaux, alors on pourrait attacher derrière le chariot, au moyen d'un ou deux crochets, une charrette ayant aussi des jantes de 0^m20, et l'on obtiendrait ainsi un chariot à six roues, auquel on pourrait atteler onze chevaux.

Le tableau qui précède prouve encore qu'il faut se garder d'atteler cinq chevaux à une charrette de 0^m44 de largeur de jante; car alors la pression pouvant s'élever à 300 kil. par centimètre de largeur, broierait rapidement les pierres qui forment la première couche des chaussées d'empierrement. Il y aurait moins d'inconvénients à atteler huit chevaux à un chariot de 0^m44 de largeur de jantes, parce que la pression des grandes roues de ce chariot ne s'élèverait qu'à 223 kil. par centimètre de largeur.

VI. RÉSUMÉ.

79. Le transport sur les routes et le roulage étant la conséquence du mouvement que les chevaux impriment aux voitures, ce transport dépend en même temps des chaussées, des voitures et de la force des chevaux ou de celle des attelages; on ne peut donc s'occuper du roulage sans toucher à ces différents

objets : tel est le motif de la division en plusieurs chapitres des recherches que l'on vient de présenter.

Le premier chapitre est relatif à la construction et à l'entretien des chaussées;

Dans le second on s'occupe de la résistance que ces chaussées doivent opposer aux pressions qu'elles ont à supporter;

Le troisième se rapporte à l'action du roulage sur les chaussées;

Dans le quatrième on s'occupe généralement des voitures et de la grandeur des roues;

Enfin, le cinquième est relatif à la force des attelages, force que l'on croit plus variable qu'elle ne l'est réellement, pour les chevaux dont le roulage fait usage.

Dans le premier chapitre, après avoir exposé sommairement les différents systèmes adoptés pour la construction des chaussées, et être entré dans quelques détails sur les procédés d'entretien, on a cru devoir faire observer que les améliorations obtenues, depuis vingt ans, dans l'état des chaussées, devaient, en grande partie, être attribuées aux soins constants et réguliers que l'augmentation considérable du fonds d'entretien a permis de donner aux routes.

Dans le deuxième chapitre, celui relatif aux résistances que les chaussées doivent présenter, on a distingué leur résistance absolue; celle qui dépend de l'épaisseur du massif dont elles sont formées, de leur résistance relative, celle qui dépend de la nature et des dimensions des pierres de la couche supérieure; puis on a fait observer que les chaussées pavées, lorsqu'elles reposent sur un sol non compressible, peuvent résister aux plus fortes pressions, tandis que les chaussées en graviers calcaires se détériorent ra-

pidement par le passage des voitures les plus légères.

Dans le troisième chapitre, on a reconnu que les voitures, par la pression de leurs roues et par l'action de leur attelage, produisent sur les chaussées trois effets distincts : elles les dégradent, en enfonçant leur massif; elles les détériorent, en écrasant la pierre de la couche supérieure; enfin, elles les usent plus ou moins rapidement par le frottement de roulement. Ce dernier effet est inévitable, puisqu'il est la conséquence du mouvement des roues; mais les deux premiers peuvent être considérablement réduits, en fixant une limite convenable aux pressions que les roues peuvent exercer, et en établissant un certain rapport entre la pression effective et la largeur de la bande des roues. On doit rappeler à ce sujet que M. Arthur Morin, colonel d'artillerie, a reconnu par ses nombreuses expériences que, dans l'intérêt de la conservation des chaussées, il convenait de limiter le chargement à 3500 kil. par train de deux roues, et qu'un chargement est excessif lorsqu'il s'élève à 150 kil. par centimètre de largeur de la bande des roues.

Dans le quatrième chapitre, relatif aux voitures, on a déterminé l'expression de l'effort nécessaire au mouvement, sur une chaussée, d'une voiture quelconque; puis la grandeur que devraient avoir des roues pour que cet effort fût le moindre possible; enfin le diamètre à donner aux roues d'une voiture qui doit être chargée d'un poids donné, ou qui doit être traînée par un attelage dont la force est connue.

Dans le cinquième chapitre, celui relatif à la force des attelages, on a fait voir que l'attelage le plus nombreux d'un chariot ne devait avoir que onze che-

vaux ; car au delà de ce nombre, le défaut d'ensemble dans les efforts fait que la force de l'attelage n'augmente pas avec un ou deux chevaux de plus. Enfin, on a encore reconnu que, sous le rapport économique, l'attelage le plus avantageux devait être composé de trois chevaux au moins, et de quatre au plus.

Ces recherches étant destinées à faciliter la solution de différentes questions qui se présentent à l'esprit, lorsque l'on s'occupe de roulage, on s'abstiendra d'en tirer aucune conséquence spéciale ; elles apparaîtront d'elles-mêmes du point de vue où l'on aura jugé à propos de se placer.

A. — Poids des roues constaté par M. SCHWILGUÉ et par M. EMMERY.

NOMS	RAYONS des roues.	Largeur de la jante. l	POIDS constaté. p	VALEUR de $\pi r^2 l$	POIDS de l'unité de volume $a = \frac{p}{\pi r^2 l}$	POIDS calculés d'après la valeur moyenne de $a = 817$	Différence avec les poids constatés.
M. Schwilgué	0 95	0 25	605 00	0 708	854 84	378 44	- 26.56 $\frac{1}{4}$
Idem	0 95	0 17	425 00	0 480	885 41	392 16	- 32.94 $\frac{1}{4}$
Idem	0 95	0 14	340 00	0 396	858 58	323 53	- 16.47 $\frac{1}{4}$
Idem	0 95	0 11	255 00	0 311	819 93	284 09	+ 0.91 $\frac{1}{4}$
M. Emmery	0 91	0 17	320 00	0 443	744 92	361 93	+ 41.93 $\frac{1}{4}$
Idem	0 91	0 14	260 00	0 364	714 28	297 39	+ 37.39 $\frac{1}{4}$
Idem	0 91	0 11	215 00	0 286	751 76	233 66	+ 18.66 $\frac{1}{4}$
Idem	0 91	0 08	188 30	0 207	910 62	169 12	- 19.38 $\frac{1}{4}$
Idem	0 83	0 17	230 00	0 364	631 86	297 39	+ 67.39 $\frac{1}{4}$
Idem	0 83	0 14	195 00	0 304	645 39	248 37	+ 53.38 $\frac{1}{4}$
Idem	0 785	0 11	170 00	0 213	798 12	176 02	+ 6.02 $\frac{1}{4}$
Idem	0 50	0 17	145 00	0 133	1090 22	108 66	- 36.34 $\frac{1}{4}$
TOTAL					9805 63		

Ce qui donne pour la valeur moyenne du poids de l'unité de volume des roues $a = 817$ kil., et pour celle de πa 2565.

1^o Poids des Charrettes et des Chariots constatés par
M. SCHWILGUÉ.

2^o Poids calculés des mêmes voitures.

LARGEUR des JANTES.	RAYONS des ROUES.	POIDS des ROUES.	POIDS DU CORPS de la voiture.	POIDS de LA VOITURE vidé.	POIDS TOTAL de la voiture chargée.
Charrettes d'après M. Schwilgué.					
0 08	0 91	240 00	260 00	500 00	1500 00
0 11	0 95	310 00	390 00	900 00	2900 00
0 14	0 95	680 00	520 00	1200 00	4300 00
0 17	0 95	850 00	650 00	1500 00	6000 00
0 25	0 95	1210 00	990 00	2200 00	8400 00
Chariots d'après M. Schwilgué.					
0 06	»	»	350 00	350 00	1350 00
0 11	»	»	1500 00	1500 00	4300 00
0 14	»	»	2000 00	2000 00	6000 00
0 17	»	»	2500 00	2500 00	8400 00
0 22	»	»	3400 00	3400 00	9900 00
CHARRETTES.					
Poids calculés d'après la formule : $5130 r^2 l + 100 + \frac{3}{20} p' + p' = \Pi$					
0 08	0 800	260 00	250 00	510 00	1500 00
0 11	0 967	328 00	390 00	918 00	2900 00
0 14	0 967	672 00	530 00	1202 00	4300 00
0 17	0 967	816 00	700 00	1516 00	6000 00
0 25	0 967	1210 00	940 00	2150 00	8400 00
CHARIOTS.					
Poids calculés par la formule : $5130 (r^2 + r'^2) l + \frac{3}{10} p' + p' = \Pi$					
0 06	$\frac{0.56}{0.55}$	$\frac{92.41}{141.59}$ 234E	270 00	504 00	1350 00
0 11	$\frac{0.50}{0.53}$	530 42	860 00	1390 42	4300 00
0 14	$\frac{0.50}{0.53}$	675 08	1200 00	1875 08	6000 00
0 17	$\frac{0.50}{0.53}$	819 74	1680 00	2499 74	8400 00
0 22	$\frac{0.50}{0.53}$	1060 84	1980 00	3040 84	9900 00

C. — Poids total des voitures chargées, nombre des chevaux de leur attelage, charge moyenne par cheval, observée et calculée par la formule : $P = n(22 - n)68.62$.

NOMBRE DE CHEVAUX de l'attelage.	POIDS	CHARGE	POIDS	CHARGE
	TOTAL observé.	MOYENNE observée.	TOTAL calculé.	MOYENNE calculée.
1 cheval.	1441 ² 00	1441 ² 00	1441 ² 00	1441 ² 00
2 chevaux.	2877 00	1438 00	2744 80	1370 40
3 —	3933 00	1311 00	3911 34	1303 78
4 —	5100 00	1275 00	4940 00	1246 88
5 —	5425 00	1085 00	5832 70	1166 54
6 —	5442 00	907 00	6587 52	1097 92
7 —	5478 00	783 00	7205 10	1029 30
8 —	5484 00	685 00	7685 44	960 68

TABLE DES MATIÈRES.

Avant-propos.....	1
<i>Recherches techniques et mathématiques sur les routes, les voitures et les attelages, pour servir à la solution de différentes questions relatives au roulage.</i>	3
I. DES ROUTES ET DE LEUR CHAUSSÉE, DE LEUR CONSTRUCTION ET DE LEUR ENTRETIEN.	<i>id.</i>
1. De l'importance actuelle des routes et de celle qu'elles conserveront.....	<i>id.</i>
2. De la forme des routes dans le sens transversal.....	4
3. Pente des routes.....	5
4. Des chaussées.....	<i>id.</i>
5. Qualités que les chaussées doivent présenter.....	6
(1) <i>De la construction des chaussées.</i>	7
6. Des différents genres de chaussées.....	<i>id.</i>
7. Chaussées en pavés.....	8
8. Empierrement ordinaire suivant le système de l'ancien ingénieur Trésaguet.....	<i>id.</i>
9. Empierrement à la Mac-Adam.....	9
10. Chaussée en graviers.....	<i>id.</i>
11. Agrégation des pierres qui forment le massif de la chaussée.....	10
(2) <i>Entretien des routes et de leur chaussée.</i>	<i>id.</i>
12. Entretien du corps de la route.....	<i>id.</i>
13. Entretien de la chaussée.....	11
14. Causes de l'amélioration des routes dans les vingt dernières années.....	<i>id.</i>
15. Des différentes dégradations que les chaussées éprouvent et des causes qui tendent à les accroître.....	13
16. Des quantités de matériaux usés ou détériorés.....	14
17. Des frais d'entretien des chaussées.....	15

II. RÉSISTANCES DES CHAUSSÉES.....	15
18. Les chaussées opposent toujours deux résistances aux pressions des voitures.....	<i>id.</i>
(1) <i>De la résistance du massif</i>	16
19. Résistance absolue des chaussées.....	<i>id.</i>
20. La résistance absolue dépend principalement de l'épaisseur du massif.....	17
21. En temps sec, la plupart des chaussées peuvent résister à des pressions extraordinaires.....	<i>id.</i>
22. Des circonstances particulières qui permettent de réduire l'épaisseur des chaussées.....	18
23. De l'épaisseur que l'on donne aux chaussées dans les circonstances ordinaires.....	<i>id.</i>
(2) <i>De la résistance de la couche supérieure des chaussées</i>	19
24. Nécessité de régler le poids des voitures d'après la résistance des pierres généralement employées, pour former la couche supérieure des chaussées.....	<i>id.</i>
25. Des pierres de différentes natures qui servent à l'entretien des chaussées.....	<i>id.</i>
26. Les matériaux les plus résistants abondent où ils sont moins nécessaires, et ceux dont on est obligé de faire usage, sur la majeure partie des routes, sont d'une nature calcaire généralement peu résistante.....	20
(1) <i>Résistance des pierres dans les chaussées pavées</i> ..	21
27. De la résistance à l'écrasement qu'un pavé de grès peut opposer.....	<i>id.</i>
28. Si toutes les chaussées étaient pavées, le roulage pourrait être libre presque toute l'année.....	22
(2) <i>Résistance des pierres dans les chaussées d'empierrement</i>	<i>id.</i>
29. La pression exercée par les roues des voitures doit toujours être moindre que celle sous laquelle sont broyées les pierres généralement employées.....	<i>id.</i>
30. Limite des pressions que les voitures peuvent exercer..	23
31. Réponse aux objections qui peuvent être faites contre la nécessité des pressions que nous proposons d'adopter..	<i>id.</i>

(3) <i>Résistance des graviers qui entrent dans la construction de certaines chaussées.</i>	24
32. Les graviers calcaires sont en général trop peu résistants pour être employés avec avantage à l'entretien des chaussées.....	<i>id.</i>
33. Résumé de ce qui précède.....	25
III. ACTION DU ROULAGE SUR LES CHAUSSÉES.....	26
34. L'action du roulage sur les chaussées dépend des voitures et de leur attelage.....	<i>id.</i>
(1) <i>Action des voitures sur les chaussées.</i>	27
35. L'action d'une voiture sur une chaussée se réduit à celle de ses roues.....	<i>id.</i>
36. Action due au poids ou à la charge des roues.....	<i>id.</i>
37. Effets dus à la forme des roues, ou plutôt à celle de leur bande.....	28
38. Action due au mouvement des roues.....	30
(2) <i>Action de l'attelage des voitures ou des chevaux sur les chaussées.</i>	31
39. De l'action des chevaux sur les chaussées.....	<i>id.</i>
40. De l'effet du frottement lorsque les chevaux marchent au pas.....	32
41. De l'effet du frottement lorsque les chevaux vont au trot.....	<i>id.</i>
IV. DES VOITURES DONT LE ROULAGE FAIT USAGE.....	34
42. Des différentes espèces de voitures dont le roulage fait usage.....	<i>id.</i>
43. Avantages et inconvénients des charrettes et des chariots.....	<i>id.</i>
44. Des roues et des différentes pièces dont elles se composent.....	35
45. Du corps de la voiture.....	36
46. Des roues et des résistances qui contrarient leur mouvement.....	37
47. Expression de l'effort qu'il est nécessaire d'exercer pour qu'une roue franchisse un obstacle d'une hauteur fixée.....	38
48. Expression analytique de la résistance au mouvement d'une roue sur un plan horizontal présentant des aspérités d'une très-petite hauteur.....	39

49. Expression de la résistance sur un sol compressible et élastique, mais sans aspérité.....	40
50. Expression de la résistance lorsque le sol, étant compressible, est en même temps couvert d'aspérités.....	<i>id.</i>
51. Expression de la résistance lorsque le sol est simplement élastique.....	<i>id.</i>
52. Discussion de l'expression analytique de la résistance..	41
53. Expression de l'effort nécessaire au mouvement d'une roue sur une chaussée horizontale.....	42
54. Effort nécessaire au mouvement, sur une chaussée horizontale, d'une roue chargée ou portant un poids par l'intermédiaire d'un essieu.....	43
55. Effort nécessaire au mouvement d'un chariot sur une chaussée horizontale.....	44
56. Effort nécessaire pour entretenir le mouvement d'une voiture sur une chaussée en rampe.....	45
57. Du minimum absolu de l'effort nécessaire pour entretenir le mouvement d'une roue chargée d'un poids donné, rayon que, dans cette circonstance, il convient de donner à la roue.....	46
58. Applications numériques.....	47
59. Rayon des roues des charrettes qui ne sont pas spécialement affectées au service du roulage.....	49
60. Applications numériques.....	50
61. Des voitures dont le roulage fait usage.....	52
62. Transformation de l'expression générale de l'effort. Relation entre le poids total d'une voiture chargée et le poids de ses roues.....	54
63. Applications numériques relatives aux voitures attelées d'un seul cheval.....	56
64. Du rapport entre le poids total et la largeur des jantes, dans les charrettes et chariots attelés d'un seul cheval..	58
V. DE LA FORCE DES CHEVAUX ET DE CELLE DES ATTELAGES.....	60
65. Les chevaux sont les moteurs de l'industrie du roulage.	<i>id.</i>
66. Du nombre et de la disposition des chevaux dont les attelages sont formés.....	<i>id.</i>
67. Expressions de la force et de la puissance du cheval.....	61

68. Réflexions sur les moyens d'apprécier les qualités utiles des chevaux.....	62
69. Valeur moyenne de V^2T pour les chevaux habitués au travail et d'une taille ordinaire.....	65
70. Effort du cheval qui produit son travail maximum, poids qu'il peut trainer sur un chemin horizontal et sur un chemin en rampe.....	66
71. Observation générale sur les attelages composés de plusieurs chevaux.....	67
72. Force d'un attelage composé d'un nombre n de chevaux d'égale force.....	68
73. Force d'un attelage composé de chevaux qui diffèrent seulement par leur masse.....	<i>id.</i>
74. Force d'un attelage dont les chevaux diffèrent par leur masse et leur taille.....	69
75. Force effective des attelages composés de plusieurs chevaux.....	70
76. Du plus grand nombre de chevaux dont un attelage ordinaire puisse être composé.....	73
77. De l'attelage le plus avantageux et du nombre de chevaux dont il doit être composé.....	74
78. Applications numériques relatives à la force des attelages, aux poids effectifs des charrettes ou des chariots qu'ils peuvent trainer, à la largeur à donner aux bandes des roues, pour que la pression, par centimètre de largeur, n'excède pas une limite fixée <i>à priori</i>	78
VI. RÉSUMÉ.....	79
A Tableau du poids des roues.....	82
B Tableau du poids des voitures.....	83
C Poids total des voitures chargées, nombre de chevaux de leur attelage, charge moyenne par cheval.....	84

FIN DE LA TABLE.

