
RENDEMENT ET UTILISATION ÉCONOMIQUE DES MACHINES LOCOMOTIVES.

Comparaison avec les moteurs fixes et les appareils de navigation.
Bénéfice obtenu par l'emploi des distributions spéciales
(à continuer).

Par M. DESDOUITS,

INGÉNIEUR EN CHEF ADJOINT DU MATÉRIEL ET DE LA TRACTION
DES CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT.

La recherche des moyens propres à réduire la consommation de combustible dans les locomotives est un des problèmes qui intéressent au plus haut degré les Administrations de Chemins de fer. L'importance qu'on attache à cette question se manifeste par les études nombreuses entreprises depuis quelques années en vue de réaliser un système de moteur plus économique que ceux actuellement en usage. La plupart de ces études ont, comme objectif, l'application du système *compound*, adopté aujourd'hui d'une manière générale pour les appareils de navigation. D'autres sont fondées sur l'emploi de distributions spéciales se rapprochant plus ou moins du type des machines fixes Corliss.

En présence de ce mouvement prononcé vers des solutions nouvelles, indiquées par la théorie, mais qui n'ont pas encore reçu de la pratique des Chemins de fer leur sanction définitive, il paraît utile de fixer avec précision le point de départ et l'état actuel du problème ; d'évaluer, en un mot, par des mesures certaines (1), le *rendement économique de la locomotive* telle qu'elle existe

(1) Jusqu'à ces derniers temps, on ne s'est guère attaché à définir la valeur économique des locomotives que par la constatation de leur dépense en combustible rapportée soit aux *parcours kilométriques*, soit au *tonnage transporté* pour une durée de service plus ou moins prolongée.

Ces données peuvent permettre de comparer, au point de vue économique, des machines qui différeraient entre elles par un ensemble de dispositions bien définies, mais qui, par ailleurs, se présenteraient dans des conditions absolument équivalentes, non seulement comme nature de service, mais encore comme état de réglage et d'entretien, qualités du personnel de conduite, surveillance de tous les incidents capables d'influer sur le résultat final. — Cet ensemble de conditions est difficilement réalisé, même pour des machines affectées à un service identique sur une même section. La méthode tombe absolument en défaut pour des machines affectées à des services différents, ou même à des services analogues sur des réseaux différents. Elle ne donne, en outre, aucun élément de comparaison avec les moteurs appliqués à d'autres branches de l'industrie, appareils de navigation et machines fixes.

Une étude méthodique et réellement comparative ne peut avoir d'autre base que la comparaison du *travail exprimé en unités mécaniques*, avec la *dépense faite*.

aujourd'hui, d'en faire la comparaison avec les chiffres admis pour les moteurs réputés les plus parfaits de la marine et de l'industrie à terre ; de constater enfin les résultats qui, dès à présent, paraissent ressortir de l'application des principes nouveaux au matériel moteur des Chemins de fer.

C'est ce que nous nous proposons de faire dans cette Note, en rendant compte d'expériences de rendement effectuées sur des locomotives des divers systèmes et rapprochant les résultats de ces essais des chiffres fournis par les documents les plus sérieux sur les machines marines et sur les moteurs fixes.

I

DÉFINITION DU COEFFICIENT ÉCONOMIQUE : SA MESURE.

Le rendement ou plus exactement l'utilisation économique d'une machine quelconque a pour expression le *rapport entre le TRAVAIL recueilli et la DÉPENSE faite*. Suivant un usage généralement adopté, on considère comme coefficient d'économie la fonction inverse de celle qui vient d'être définie, c'est-à-dire le chiffre de la DÉPENSE *par unité de TRAVAIL*.

La dépense d'une machine à vapeur peut être évaluée soit en *eau*, soit en *combustible*. C'est évidemment sur la consommation de combustible que doit s'établir, en dernière analyse, l'appréciation économique d'un moteur. Mais lorsqu'il s'agit de comparer des types de machines différant entre eux par le *mode d'utilisation de la vapeur*, indépendamment des conditions particulières de construction ou de fonctionnement du générateur, l'évaluation de la dépense en eau répond évidemment d'une manière plus directe à la question. Elle comporte, en outre, des observations à la fois plus faciles et plus précises.

C'est donc la consommation d'*eau* qu'il convient, dans chaque cas particulier, de comparer au *travail recueilli*. Suivant les cas, on pourra instituer des expériences spéciales pour établir ou vérifier la corrélation exacte entre les quantités d'*eau* et de *combustible* consommées.

TRAVAIL EFFECTIF. — Le *travail*, dont la valeur doit entrer dans l'expression du coefficient économique, est évidemment le travail *effectif*, c'est-à-dire celui qui est transmis, suivant le genre de machine, à l'*arbre* ou à l'*essieu moteur*.

Ce travail est celui que, dans le cas des locomotives, on désigne habituellement sous le nom de travail à *la jante* (1).

La mesure du travail effectif se fait depuis longtemps pour les machines fixes au moyen du *frein de Prony* et des appareils similaires. La méthode du frein présente un caractère scientifique bien défini ; l'application en est assez délicate : toutefois, avec les précautions voulues, elle donne de bons résultats pour les moteurs fixes de force moyenne.

Malheureusement l'installation du frein dynamométrique devient fort difficile pour les appareils de grande puissance ; elle est à peu près irréalisable dans le cas des machines marines ; elle ne peut davantage être appliquée aux locomotives, du moins dans les conditions réelles de leur service.

L'impossibilité d'obtenir au moyen du frein la mesure de l'effort *effectif* est surtout à regretter pour les machines marines. L'emploi des dynamomètres *de rotation*, par lequel on a essayé d'y suppléer, n'a pas jusqu'à ce jour donné de résultats pratiques. En fait, on ne possède pas encore aujourd'hui la mesure du travail effectif dans les appareils de navigation.

Pour les locomotives, au contraire, la mesure du travail ou de l'effort *effectif* peut être obtenue avec rapidité et précision par des procédés qui dérivent de la nature même du service demandé à ces machines, c'est-à-dire de la *mobilité* du système formé par le moteur et la charge qu'il remorque.

En effet, dans un train en mouvement, l'*accélération* positive ou négative que possède à chaque instant la masse mobile (2) mesure, en fraction du poids total, l'*excès de l'effort moteur* développé par la machine, sur la *résistance propre du train*. Si donc on détermine par deux opérations successives les valeurs de cette accélération *avec* et *sans* action de la machine, la *différence* des résultats obtenus donnera la valeur même de l'*effort utile* et, par suite, celle du travail effectif.

La mesure des accélérations peut être obtenue soit *directement* au moyen du pendule dynamométrique (3), soit par *différentiation simple* en se servant

(1) Il ne saurait être question ici du travail dit : *au crochet de traction*, terme qui n'a d'ailleurs aucun équivalent pour les autres genres de moteurs. Le travail au crochet de traction n'est qu'une fraction variable et essentiellement indéterminée du travail effectivement développé par le moteur : cette fraction peut prendre une valeur élevée, faible, nulle ou même négative, pour une même valeur de l'effort moteur réel, par le seul fait des variations du profil et de la vitesse.

La confusion, qui a été faite trop souvent entre le travail transmis au crochet de traction et le travail effectif réel, est l'une des causes principales des appréciations erronées qui ont été émises sur le rendement économique de la locomotive.

(2) Nous considérons ici, pour la simplicité du langage, la masse entière comme animée d'un mouvement de translation ; on sait que la rotation des essieux introduit un supplément d'inertie qu'on traduit par l'addition d'un terme correctif à la masse même du train.

(3) Voir pour l'Emploi du pendule d'inertie ainsi que des Observations chronométriques : *Revue générale des Chemins de fer*, N^{os} d'Octobre 1881 et Avril 1884.

d'appareils enregistreurs de la vitesse, soit enfin par une *différentiation double*, en mesurant au chronomètre les temps employés à parcourir des distances connues. La première et la dernière de ces méthodes sont les plus facilement applicables, en ce qu'elles n'exigent l'emploi d'aucun appareil lié au train ou à la machine : elles ont été employées concurremment dans les expériences entreprises aux Chemins de fer de l'État, dont nous aurons plus loin à rendre compte.

TRAVAIL INDIQUÉ. — A défaut de la connaissance du travail effectif, le coefficient économique est évalué pour les machines marines et pour certains appareils à terre par la mesure de l'effort appliqué sur les *pistons*, effort dont la valeur se déduit de relevés à l'*indicateur* de Watt et que l'on nomme pour cette raison *effort indiqué*.

Les mesures à l'indicateur présentent un très grand intérêt pour l'analyse des phénomènes dont la succession forme le cycle thermodynamique de la machine. Mais ces mesures ne peuvent fournir l'expression du travail *totalisé* qu'à la condition d'être prises, à des intervalles très rapprochés, sur les deux faces de chacun des pistons, l'allure et le régime de la machine étant maintenus à peu près invariables. Elles supposent, en outre, implicitement, qu'il y ait équilibre rigoureux de pression entre le cylindre de la machine et celui de l'indicateur, condition dont il est difficile de garantir la parfaite réalisation, surtout pour les machines à mouvement rapide (1).

RÉSISTANCES PASSIVES. — En tout état de cause, la mesure du travail *indiqué* ne peut suffire, à elle seule, pour l'évaluation du *coefficient économique*. Elle doit être complétée par l'estimation des *résistances passives*.

Cette estimation a été faite, par différence, sur des machines fixes, dont les expériences étaient dirigées de manière à donner à la fois la mesure du travail effectif et celle du travail indiqué.

Les valeurs, ainsi trouvées pour l'influence des résistances passives, varient entre 10 et 15 % du travail effectif dans le cas des machines à échappement libre ; elles atteignent jusqu'à 20 % pour les machines à condensation.

(1) La mesure du travail indiqué se présente dans des conditions relativement favorables pour les appareils de navigation, ainsi que pour les moteurs d'atelier qui marchent à une allure ordinairement régulière et modérément rapide, et sur lesquels l'Indicateur de Watt peut être monté avec un système de transmission bien réglé et un tuyautage de longueur réduite, à l'abri des perturbations atmosphériques.

La locomotive se prête beaucoup moins facilement à ce genre de mesures, tant à cause des difficultés matérielles d'installation que par suite de l'allure éminemment variable à laquelle elle est soumise sur tout profil qui n'est pas rigoureusement uniforme. Le relevé des diagrammes de Watt présente, précisément à cause de ces variations d'allure et de régime, un intérêt particulièrement grand au point de vue analytique, mais la mesure du *travail évalué* par ce procédé reste, dans la plupart des cas, sujette à caution.

D'ailleurs les chiffres fournis dans les divers comptes-rendus d'expériences présentent entre eux des différences notables qu'on peut imputer, soit au système des machines, soit au mode d'expérimentation, sans qu'il soit possible de se prononcer entre les deux hypothèses.

En somme, l'évaluation du coefficient économique par le travail indiqué reste sujette à une notable incertitude et ne doit être acceptée que sous réserve et dans l'impossibilité absolue de procéder à la mesure directe du travail effectif.

DÉPENSE EN EAU : EN VAPEUR SATURÉE SÈCHE. — L'évaluation de la *dépense en eau*, considérée comme mesurant la *quantité de chaleur* employée pour la production du travail, comporte deux interprétations différentes. Tantôt elle s'applique au poids d'eau *total* passé de la chaudière dans les cylindres, tantôt on défalque de ce poids celui de l'eau présumée *entraînée* à l'état liquide et on considère seulement le poids de *vapeur saturée sèche*.

La considération du poids de vapeur sèche est, sans doute, celle qui correspond le plus exactement à la quantité de chaleur dépensée. Mais ce poids ne peut être estimé que par voie indirecte et au moyen de mesures calorimétriques très délicates. Il est souvent donné d'après des évaluations plus ou moins arbitraires et auxquelles on ne peut attribuer une autorité certaine.

Il semble préférable — et c'est ainsi que nous opérons toujours pour la locomotive — de donner l'indication du poids d'eau *brut* passé de la chaudière aux cylindres. On indiquera d'autre part, autant qu'il sera possible, et pour chaque cas particulier, la proportion probable d'eau *entraînée*.

Il est bien entendu que, pour chaque espèce de moteur, on aura à déterminer par des mesures directes et à défalquer des résultats d'essais le poids d'eau employé à des services accessoires ou étrangers, tels que le fonctionnement des pompes et petits chevaux, l'amorçage des injecteurs, l'arrosage du combustible, etc.

La mesure de l'eau doit être prise à la fois au réservoir d'alimentation et à la chaudière au commencement et à la fin de chaque essai.

Le jaugeage de l'eau *d'alimentation* exige des précautions assez délicates dans le cas des machines marines, où cette eau doit être puisée à la bache du condenseur. L'opération est plus facile et plus sûre dans le cas des moteurs fixes pour lesquels on peut toujours faire usage, pendant les essais, d'un réservoir spécial. Pour les locomotives, la fonction du réservoir est remplie de la manière la plus avantageuse par le tender lui-même, dont les formes régu-

lières et surtout la grande capacité sont particulièrement favorables à l'exécution de mesures précises (1).

L'évaluation du niveau à la chaudière est plus délicate à cause de l'agitation du plan d'eau et des phénomènes de distillation qui se produisent entre l'intérieur de la chaudière et le tube indicateur soumis au refroidissement extérieur. On doit s'attacher à opérer autant que possible dans des conditions identiques au commencement et à la fin de l'essai, c'est-à-dire avec la même hauteur d'eau et la même pression (2). Il convient, en outre, avant chaque lecture, de réchauffer longuement le tube par la manœuvre du robinet purgeur et d'effectuer ensuite la lecture, aussitôt l'eau reposée.

CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE ; COEFFICIENT DE VAPORISATION. — Dans certaines expériences, surtout celles qui remontent à une époque déjà éloignée, les chiffres de consommation sont donnés non en eau ou en vapeur, mais en *combustible*. Les mesures prises dans ces conditions ne peuvent pas être considérées comme bien précises, sauf le cas, assez rare, où il s'agirait d'essais assez prolongés pour que l'évaluation de l'état initial et final du feu, toujours plus ou moins incertaine, n'ait qu'une faible importance relative.

Pour établir une corrélation entre les résultats d'essais fournis en combustible et ceux dont la dépense est évaluée en poids d'eau ou de vapeur, on est dans l'obligation de faire intervenir le *coefficient de vaporisation* qui dépend dans chaque cas d'éléments multiples : nature du combustible, système de la chaudière, conduite des essais, etc.

A défaut de données plus précises, on peut admettre comme chiffre moyen une vaporisation de 8^{kg},5 (eau entraînée comprise) par kilogramme de houille. C'est à peu près à ce chiffre que reviennent les constatations faites, soit sur les chaudières marines à tubes courts et à faible tirage, soit sur les générateurs fixes des systèmes usuels, soit enfin sur les locomotives où l'intensité plus grande du tirage est compensée par l'emploi de tubes relativement longs.

Quoi qu'il en soit, la production de vapeur évaluée par ce procédé indirect ne devra jamais être considérée que comme une indication, non comme un chiffre ayant une valeur expérimentale et sur lequel on puisse appuyer des conclusions fermes.

(1) La hauteur d'eau au tender se mesure au moyen d'un tube de niveau monté à demeure, ou beaucoup plus simplement et avec toute la précision voulue, au moyen d'un tube mobile, à ajustage recourbé, qu'on présente en face de l'un des robinets de jauge.

On attendra toujours que l'eau du tender soit bien reposée après l'arrêt ; on s'assurera, en outre, au moyen d'un fil à plomb, que la voie ne présente pas en cet endroit de devers ; s'il en était autrement l'indication même du fil à plomb donnerait la correction à faire.

(2) On doit également s'abstenir, pendant les mesures, de faire fonctionner l'alimentation et le souffleur.

Ayant défini aussi exactement que possible les termes sur lesquels repose la comparaison des moteurs à vapeur au point de vue économique, nous passerons sommairement en revue, suivant l'ordre historique, les résultats obtenus.

Nous aurons à considérer en premier lieu la machine à *admission directe* et à *simple tiroir* qui constitue la forme originelle des moteurs à vapeur, appliquée successivement depuis Watt aux diverses industries à *terre*, aux appareils de *navigation*, et enfin à la *locomotive*.

Nous aborderons ensuite l'examen des *distributions spéciales*, genre *compound* ou *Corliss* dans leurs applications aux appareils marins, aux machines fixes, enfin à la locomotive elle-même.

II.

MACHINE A **ADMISSION DIRECTE** ET A **SIMPLE TIROIR**. — RÉSULTATS OBTENUS AVEC LES **MOTEURS FIXES** ET LES ANCIENNES **MACHINES MARINES**. — EXPÉRIENCES SUR LES **LOCOMOTIVES**.

A. MACHINES FIXES. — La considération du rendement économique s'est imposée à l'attention des premiers constructeurs de la machine à vapeur. On sait quelle place importante elle occupa toujours dans les préoccupations de Watt, à qui elle a inspiré ses plus importantes découvertes.

La machine primitive de Newcomen, avec injection à l'intérieur du cylindre, consommait (d'après les évaluations de Smeaton) 8 à 10 kg. de houille par force de cheval utilisée. Avec l'emploi du condenseur séparé, Watt obtint, dans sa machine à simple effet, un rendement plus économique de moitié. Dans la machine à double effet, où se trouvent réunis tous les perfectionnements introduits par le grand inventeur, et qui est restée depuis un siècle le type en quelque sorte classique du moteur à vapeur, la dépense est réduite à 3 kg. de combustible, soit 25 à 30 litres d'eau par *cheval utile*. A cette époque, la pression de régime, limitée par les conditions de résistance des chaudières, ne dépassait pas 1 1/4 à 1 1/2 atmosphère.

L'extension rapide des applications de la machine à vapeur aux industries les plus diverses, et les progrès réalisés, d'autre part, dans la construction des générateurs amenèrent bientôt l'emploi, de plus en plus général, des pressions élevées, avec dimensions réduites et simplification du système géométrique des organes.

Mais au milieu des transformations multiples que subit la machine à vapeur

dans cette période d'évolution, l'étude des conditions thermiques et la vérification du rendement économique semblent avoir été plus ou moins perdues de vue. L'emploi d'une pression de régime élevée, la réduction de dimensions des cylindres, l'accroissement correspondant des vitesses de rotation, étaient des éléments favorables à une amélioration du rendement. Mais le bénéfice de ces modifications ne pouvait être recueilli que dans des conditions bien étudiées de régime et de distribution.

Il se trouva qu'à cette époque l'attention était peu portée vers les recherches de cette nature. Aussi lorsque l'on essaie de se rendre compte des résultats économiques obtenus dans la longue période qui s'étend depuis les premiers essais de la haute pression jusqu'à l'évolution nouvelle provoquée par l'apparition des machines Corliss, ne trouve-t-on que des documents peu nombreux, et dont les chiffres assez disparates accusent pour la plupart des résultats médiocrement favorables.

A une époque peu éloignée de nous, bien des moteurs d'atelier consommaient 3 kg de combustible, soit 25 à 30 litres d'eau par force de cheval, et ne réalisaient par conséquent aucune économie sur la machine ancienne de Watt. — Une consommation de 2^{kg},0 de charbon, ou de 16 à 18 litres d'eau pouvait être considérée comme très favorable (1). Il ne semble pas qu'on soit descendu pratiquement au-dessous de ce dernier chiffre.

Il serait néanmoins très inexact de considérer ces résultats comme représentant la limite de l'économie réalisable avec les machines à admission directe et à simple tiroir. Les chiffres de consommation que nous aurons bientôt à mentionner pour la *locomotive* suffiraient à démontrer l'erreur d'une pareille conclusion.

Si la machine simple, anciennement employée comme moteur d'atelier, donnait des résultats médiocres, c'est qu'on ne s'était pas appliqué suffisamment à définir et à réaliser les conditions d'un fonctionnement économique. Les méthodes d'analyse expérimentale introduites à une époque récente, et qui ont donné de si heureux résultats pour l'étude des nouveaux moteurs, devaient également conduire à améliorer le régime de la machine à simple tiroir. Ce progrès a même été réalisé dans une notable mesure malgré le

(1) D'une série d'essais exécutés en 1881 à l'usine Calla ressortiraient les chiffres moyens de consommation ci-après :

Machine ordinaire à un seul cylindre (admission aux $\frac{2}{7}$) :

2^{kg},500 de combustible par cheval et par heure.

Machine Farcot, à cylindre unique (puissance de 15 à 23 chevaux) :

2^{kg},200 par cheval et par heure.

(*Annales industrielles*. Août 1882).

·courant qui portait l'opinion vers des solutions d'un autre ordre. Il suffira de citer à cet égard les machines à simple tiroir du type Armington et Sims. Ces machines, bien que construites en vue d'un service tout spécial, et marchant à une vitesse qu'on ne saurait considérer comme bien favorable à l'économie, ont accusé, dans des essais officiels, une consommation d'eau inférieure à 12^l,5 par cheval indiqué (1), soit 14 à 15 litres au maximum par cheval effectif.

B. MACHINES MARINES. — La machine marine, à son origine, et pendant toute la période des navires à roues, n'est guère qu'une variante plus ou moins alourdie et compliquée de la machine à balancier de Watt.

La recherche de l'économie de consommation, quoique présentant une importance exceptionnelle pour ce genre de moteurs, se trouvait entravée par le régime obligatoire de basse pression, résultant de la nécessité d'alimenter les chaudières à l'eau de mer.

Dans la période qui nous occupe, la production d'un cheval-vapeur est considérée, en quelque sorte officiellement, comme répondant à une dépense de 30 litres d'eau.

Le remplacement des roues par l'hélice est le point de départ d'un progrès sensible. L'accroissement des vitesses de rotation permet de réduire dans une notable mesure les dimensions des cylindres auxquels, d'autre part, on commence à appliquer des enveloppes de vapeur : le régime de la distribution, étudié au moyen d'épures géométriques et vérifié avec l'indicateur de Watt, est l'objet d'améliorations notables ; enfin, la pression aux chaudières est un peu accrue et portée au-dessus de 2^{kg},0.

La consommation de combustible, que nous trouvons mesurée avec un très grand soin dans les essais de la marine militaire, s'abaisse au-dessous de 2^{kg},0 par cheval. Quelques essais accusent même le chiffre de 1^{kg},8 qui, eu égard au coefficient de vaporisation du combustible employé (briquettes d'Anzin), représente 14 à 15^{kg} de vapeur sèche, par cheval *indiqué* et par heure.

Ces derniers résultats sont ceux des machines de 1000 chevaux, construites pour les frégates cuirassées vers 1865. A partir de cette époque, le système *compound*, et avec lui l'emploi des condenseurs à surface et des pressions élevées se substitue presque universellement, dans la marine de guerre comme dans la flotte commerciale, aux machines à admission directe et à moyenne pression : le régime économique de ces dernières cesse d'être l'objet d'études suivies.

(1) Rapport de M. Walther Meunier au Congrès des Ingénieurs en chef des Associations des Propriétaires de machines à vapeur.

Par une propension naturelle, on a été amené à considérer tous les progrès réalisés depuis l'époque dont nous parlons comme devant être uniquement attribués à l'application du système compound.

Cette appréciation est certainement erronée. Le fait seul de l'accroissement des pressions de régime, rendu possible par l'emploi du condenseur à surface, devait procurer, aussi bien pour les machines marines que pour les moteurs fixes, une amélioration notable du rendement, même en dehors de l'application du système d'expansion multiple. Il n'est pas douteux qu'on fût arrivé dans cette voie tout au moins aux résultats que nous avons constatés en dernier lieu sur des machines fixes, marchant sans *condenseur*, c'est-à-dire à une consommation n'excédant pas 12 à 13 litres d'eau par cheval indiqué, ou 14 à 15 litres par cheval effectif.

C. LOCOMOTIVES. — La locomotive, en tant que *machine à vapeur*, présente dans les diverses périodes de son développement, un caractère d'unité extrêmement remarquable. On peut dire qu'elle est encore aujourd'hui la machine de Stephenson, ayant pour caractères une *pression* de régime élevée, une *vitesse de rotation* assez grande sans être excessive, un groupement d'organes extrêmement simple, une *détente* pouvant varier avec facilité entre des limites très étendues, grâce à l'admirable invention de Stephenson : *la coulisse*.

Même au point de vue du *rendement économique*, la locomotive paraît avoir atteint, dès les premiers temps de son application, à peu près les résultats que nous sommes amenés à constater aujourd'hui.

EXPÉRIENCES DU CHEMIN DE FER DE L'EST.

Dans l'important mémoire publié en 1867 par MM. Vuillemin, Guebart et Dieudonné sur la *résistance des trains et la puissance des machines* (1), se trouvent mentionnés d'assez nombreux essais de consommation des locomotives. Les machines qui ont servi dans ces essais sont celles qui étaient en service courant à cette époque, et qui, pour la plupart, devaient dater des premières années de l'exploitation des chemins de fer en France. On peut donc considérer les résultats obtenus comme caractérisant la période primitive de la construction des locomotives.

Dans le mémoire des ingénieurs de l'Est, les consommations sont évaluées en *volume d'eau* dépensé par *cheval effectif*. C'est le mode de mesure qui répond directement à l'objet de notre étude ; seulement par une anomalie assez

(1) *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*, Nos d'Octobre, Novembre, Décembre 1867, p. 701.

difficile à expliquer, la dépense en eau est rapportée, dans les comptes-rendus d'expériences, non au *cheval-heure* (c'est-à-dire au nombre de kilogrammètres réalisés) mais au *cheval-kilomètre*, expression complexe, qui dépend à la fois du travail et de la vitesse. Les résultats ainsi présentés offrent un coup d'œil fort disparate et ne donnent aucune idée du rendement effectif, bien qu'ils en contiennent implicitement tous les éléments.

Les valeurs de la vitesse étant connues, il est possible de ramener l'évaluation de la dépense à sa forme habituelle, en la comparant au nombre de chevaux-heures développés. Les résultats se présentent alors avec une netteté irréprochable, et il n'est pas douteux que s'ils eussent été donnés primitivement sous cette forme, le préjugé qui a pendant longtemps attribué aux locomotives une valeur économique médiocre eût été fortement ébranlé.

Les trains soumis aux expériences sont groupés par les auteurs en trois séries : express (machines Crampton); mixtes (semi-directs et omnibus); marchandises.

Les chiffres de consommation, par *cheval effectif* et par heure, calculés d'après les tableaux des essais, donnent les moyennes suivantes :

Machines d'express (Crampton).....	161,56	par cheval effectif et par heure.
Machines mixtes { trains <i>semi-directs</i>	20 ¹ ,7	} 22,35 — d° —
{ trains <i>omnibus</i>	24,0	
Machines à marchandises	15,5	— d° —

La proportion d'eau entraînée, comprise dans ces chiffres, est évaluée par les auteurs à environ 30 %.

A la première inspection de ses résultats, on est frappé de la grande différence qui existe entre les chiffres donnés pour les machines mixtes et ceux accusés par la machine d'express et la machine à marchandises, lesquels ne présentent entre eux qu'un faible écart. Cette anomalie que rien ne justifie doit être attribuée à une évaluation incomplète du travail résistant, dans lequel on a omis de faire entrer (1) les valeurs de la puissance vive amortie par les freins et qui doit être, par conséquent, récupérée dans les démarrages ; ce terme correctif qui vient s'ajouter à la valeur du travail de traction proprement dit, n'a qu'une faible importance dans le cas des trains express, à cause du petit nombre des arrêts, et dans celui des trains de marchandises à cause de la faible vitesse : elle est, au contraire, fort importante dans le cas des trains semi-directs et surtout des trains omnibus, où elle peut entrer pour 1/4 ou même 1/3 dans l'expression du travail total.

(1) Du moins, nous ne trouvons dans aucune partie du mémoire, trace de cette correction.

Il paraît donc nécessaire d'écarter dans l'analyse des expériences que nous venons de citer, les chiffres de consommation relatifs aux machines mixtes et de considérer seulement ceux des machines express et de marchandises ; ces chiffres très peu différents l'un de l'autre peuvent être réduits à leur moyenne, soit 16¹,0 par cheval effectif et par heure.

Si l'on admet comme exacte (bien qu'elle paraisse à la vérité très élevée) la proportion d'eau entraînée : 30 % (1), on trouve une dépense de *vapeur sèche* inférieure à 12 kilogr. par cheval effectif et par heure.

Il convient peut-être de ne pas trop s'attacher à la valeur *absolue* de ces résultats, obtenus par une méthode expérimentale dont l'application, sinon le principe, renferme certaines causes d'erreur.

Quoi qu'il en soit, et dût-on attribuer au défaut de précision des mesures une influence possible de 10 ou même 20 % sur les résultats obtenus, on peut considérer comme démontré par l'ensemble des expériences précitées que la locomotive, dès la première période de son emploi, loin de constituer un type de machine médiocre et dispendieux, était au contraire en avance, au point de vue économique, sur les résultats fournis à la même époque par les meilleurs moteurs d'atelier, ainsi que par les machines marines.

A côté des résultats de ces essais, devenus classiques, il est intéressant de citer une deuxième série d'expériences exécutées également au chemin de fer de l'Est, vers 1880 et dans lesquelles on s'est attaché spécialement à l'évaluation du travail sur les pistons, mesuré avec les appareils Deprez-Garnier (2).

Dans ces essais, le chiffre de dépense par cheval indiqué a été trouvé en moyenne de 11¹,7 (sans défalcation de l'eau entraînée) avec une dépense en combustible de 1^{kg},42.

Il paraît certain, par le chiffre même de la consommation de combustible, que la proportion d'eau entraînée a été beaucoup plus faible dans ces expé-

(1) Cette proportion est certainement de beaucoup supérieure à celle que pourrait fournir aucune de nos machines de construction moderne. Il est possible qu'elle se trouvât atteinte avec les chaudières basses et les dispositions de la prise de vapeur alors en usage.

(2) *Revue générale des Chemins de Fer*, Numéro de Juillet 1881.

Dans les mêmes essais, on s'est proposé de déterminer également la valeur du travail effectif et de la comparer à la dépense en eau et en combustible. Mais la méthode suivie pour l'évaluation des efforts résistants prête à une grave critique : on s'est borné, en effet, à mesurer les efforts à la barre d'attelage, au moyen du dynamomètre de traction, et la résistance de la locomotive et du tender a été estimée d'après la simple proportionnalité des poids, sans tenir compte de ce que le chiffre de résistance par tonne est bien plus élevé pour la machine que pour le matériel remorqué. Aussi est-on arrivé à une évaluation beaucoup trop faible du travail et à un coefficient de dépense exagéré, 2^{kg},25 de combustible, soit 17 à 18^{kg} d'eau par cheval et par heure.

La comparaison de ces chiffres avec la dépense du cheval indiqué ferait ressortir pour la valeur des résistances passives un chiffre tout à fait anormal — environ 30 %.

riences que dans celles précédemment citées. Il règne d'ailleurs à cet égard trop d'incertitude pour que l'on puisse établir entre les résultats de l'une et l'autre série d'essais, une corrélation précise.

EXPÉRIENCES DU CHEMIN DE FER DE LYON.

Dans une série d'essais très soignés, entrepris en 1882 (1), M. G. Marié s'est proposé spécialement de déterminer le rendement économique d'une machine à grand effort de traction. Le profil choisi était en forte rampe. Cette circonstance permet une évaluation particulièrement précise du travail effectif dont la part de beaucoup la plus importante consiste alors dans l'action rigoureusement connue de la gravité ; en sorte que l'incertitude qui pourrait exister sur la valeur du coefficient de roulement n'a, dans l'évaluation totale, qu'une influence tout à fait minime. Les résultats de ces essais doivent donc être considérés comme présentant un caractère particulier de précision.

La consommation d'eau a été trouvée de 12^l,9 par *cheval effectif*. La proportion d'eau entraînée étant évaluée à 9 %, le poids correspondant de *vapeur sèche* serait de 11^k,6

Le compte rendu des essais ne fait pas connaître quel était le degré moyen d'introduction de la vapeur : d'après les conditions de charge et de profil, on peut l'évaluer à environ 30 %.

EXPÉRIENCES DES CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT.

Nous donnons maintenant les résultats principaux d'expériences qui ont été exécutées depuis quelques années aux Chemins de fer de l'État français, sur des *trains en service* et dans des circonstances qu'on a cherché à rendre aussi variées que possible.

La mesure du *travail effectif* a été obtenue dans les divers essais, soit au moyen du *pendule dynamométrique*, soit par des observations au *chronomètre*. La mesure des résistances a toujours été relevée *directement* sur les trains expérimentés, et non déduite de formules qui, même correctement établies, peuvent tomber en défaut dans un cas particulier (2).

(1) *Revue générale des Chemins de Fer*, Numéro de Mai 1883.

(2) La méthode chronométrique, dont l'application représente l'extrême limite de la simplicité, en tant qu'appareil expérimental, est d'un emploi très avantageux pour les trains effectuant de longs parcours sans arrêt, sur un profil qui ne comporte pas de trop grandes variations de vitesses et qui présente, en outre, sur une longueur de quelques kilomètres, une déclivité permettant la mesure des résistances à régulateur fermé.

Pour les trains omnibus à arrêts fréquents, l'évaluation des vitesses variables et de la force vive amortie à chaque station exige des mesures délicates, lorsque l'on fait usage seulement du chronomètre. Il est beaucoup plus simple d'opérer au moyen du pendule dynamométrique, qui fournit directement la mesure du travail moteur utile.

Dans un assez grand nombre d'essais, les deux méthodes ont été employées simultanément.

A titre d'exemple, nous donnons le développement complet des calculs effectués par l'une et par l'autre méthode dans l'une de ces expériences (*Annexe A*).

Nous avons résumé sous forme de tableaux les résultats obtenus sur un certain nombre de machines de types courants, dans des conditions variables de service. Ces types de machines sont analogues à ceux en usage dans la plupart des Compagnies. Nous indiquons d'ailleurs les éléments soit de la construction, soit de la régulation qui peuvent exercer une influence plus ou moins notable sur le mode d'utilisation de la vapeur, et par suite sur le rendement économique.

A. — Machines à voyageurs.

Les machines expérimentées sont du type connu de nos locomotives à deux essieux couplés.

Les éléments principaux de la construction et de la régulation sont les suivants :

Diamètre des roues motrices (2 essieux accouplés).....		2 ^m ,00		
Cylindres	{	Diamètre.....	0 ^m ,44	
		Course.....	0 ^m ,65	
		Volume engendré par le piston.....	99 déc. cubes.	
		Volume des espace morts à chaque extrémité....	5 déc. cubes.	
Distribution	{	Dimension des orifices	234/38	
		Ouverture maximum des lumières	A pleine introd ^{on} . 70%	30,6
			A 25 % d'admission..	9,1
		Recouvrement des tiroirs	A l'admission	30 ^m / _m
			A l'échappement.....	2 ^m / _m 1/2
Timbre de la chaudière		9 à 10 kg.		

Une première série d'expériences a été faite sur un ensemble de cinq machines qui concourent au roulement des trains express entre Paris et Chartres. Tous les essais ont été faits au train express 87, entre Versailles et Chartres (parcours 70^{km},5). La composition des trains et les conditions de la marche étaient à peu près identiques. Pour l'évaluation du travail résistant, on a fait usage de la méthode chronométrique, qui est d'un emploi commode et précis pour de longs parcours sans arrêts, en profil peu accidenté. — Dans l'un des essais cités, on a employé concurremment le pendule dynamométrique (machine 2057).

TABEAU I.

Train express N° 87. Vitesse nominale : 65 km. PARCOURS DE VERSAILLES A CHARTRES.		MACHINES					
		2043	2045	2046	2056	2057	
DATE DE L'EXPÉRIENCE		3 Avril	25 Mars	18 Mars	6 Juin	14 Mars	
FORCE ET DIRECTION DU VENT		Néant	Néant	O. peu fort	Néant	O. faible	
TONNAGE :							
Une machine et tender (poids à moitié parcours).....		57 T	58 T	58 T	57 T	58 T	
Véhicules... {	Voitures et fourgons.....	99	89	89	89	89	
	Un Wagon-restaurant.....	29	29	29	29	29	
Poids des voyageurs (à 80kg. l'un)		10	6	7	7	6	
Bagages, messageries, bouillottes.....		4	4	5	4	5	
POIDS TOTAL DU TRAIN..... = P		199 T	186 T	188 T	186 T	187 T	
Différence d'altitude entre les points extrêmes..... = H		+ 12 ^m ,»	12 ^m ,»	12 ^m ,»	12 ^m ,»	12 ^m ,»	
Longueur du parcours..... = L		70km,5	70km,5	70km,5	70km,5	70km,5	
Degré moyen d'admission de la vapeur (en fraction de course).		0,23	0,24	0,24	0,28	0,25	
MESURES PRISES AU CHRONOMÈTRE	Durée totale du parcours.....	70 ^m	68 ^m	72 ^m	65 ^m	72 ^m	»
	Vitesse moyenne effective.....	62km,»	64km,»	60km,»	65km,»	60km,»	»
	Résistance moyenne à la traction par tonne (mesures prises dans la descente de Rambouillet à Epernon).. = R	6kg,1	6kg,5	7kg,»	6kg,7	6kg,8	»
	Vitesse amortie par le frein à Chartres..... = V	14,00	14,00	16,00	12,00	16,00	»
	Travail de traction..... $P \times L \times R$	85.579Tm	85.234Tm	92.778Tm	87.857Tm	89.647Tm	»
	Travail amorti par le frein $\frac{1}{2} \frac{P}{g} V^2$	1.987	1.858	2.453	1.365	2.439	»
	Travail de la gravité..... $P \times H$	+2.388	2.232	2.256	2.232	2.244	»
	Travail effectif total.....	89.954Tm	89.324Tm	97.487Tm	91.454Tm	94.330Tm	»
	soit en chevaux-heures.....	333chx	330,8	361chx	338,7	349chx	»
	MESURES PRISES au pendule dynamométrique	Parcours effectué avec admission de vapeur..... L'	»	»	»	»	»
Effort effectif moyen par tonne..... π		»	»	»	»	»	9k,80
Travail effectif total..... $P \times L' \times \pi$		»	»	»	»	»	95.295Tm
soit, en chevaux-heures.....		»	»	»	»	»	353chx
MOYENNE.....		»	»	»	»	»	351chx
DÉPENSE EN EAU (défalcation faite du service de la pompe à air, des injecteurs et de l'arrosage) (1).....		3.900L	3.850L	4.250L	3.890L	4.050L	
DÉPENSE EN EAU par cheval effectif et par heure.....		11L,7	11L,6	11L,7	11L,5	11L,6	

(1) Cette correction, établie d'après des données expérimentales et pour lesquelles il est tenu compte dans chaque cas particulier de l'allure effective du petit cheval et du nombre d'amorçages de l'injecteur, revient en moyenne aux chiffres suivants :

Frein.....	3 %
Injecteur.....	3 %
Arrosage.....	1 %

Une observation fort importante ressort, à première vue, de l'examen de ce tableau. C'est la grande similitude, on pourrait presque dire l'identité des résultats économiques fournis par des machines de construction semblable, fonctionnant dans les mêmes conditions de service. On conçoit, en effet, que

des machines de construction identique, marchant à la même vitesse et au même degré moyen d'admission, doivent faire rendre au kg. de vapeur la même quantité de travail utile, à moins qu'il n'y ait pour quelques-unes d'entre elles ou déperdition de l'énergie motrice (fuites au régulateur, aux tiroirs, aux pistons) ou développement de résistances passives anormales (manque de graissage, pièces grippées, défauts de montage, chocs, etc.).

Dans le groupement d'un certain nombre de machines en service, on doit admettre que la plupart sont exemptes de l'une et de l'autre de ces causes d'infériorité : leur ensemble constitue ce qu'on nomme couramment les machines en *bon état d'entretien*, groupe homogène, devant fournir des résultats sensiblement identiques. A côté de celles-ci, un petit nombre de machines, soit par usure anormale, soit par défaut de soins, peuvent se trouver dans un état d'infériorité qui se manifeste par un accroissement notable de la dépense, tel que 10 ou 20 %. Une machine qui se présente dans ces conditions demande à être retirée du service et revisée.

Dans une étude théorique sur le *rendement*, considéré comme caractéristique du *système* des moteurs plutôt que de leur valeur *individuelle*, toute machine qui accuse une consommation nettement exagérée doit être considérée comme une anomalie et les résultats qu'elle fournit seront exclus de l'évaluation des moyennes. Celles-ci doivent être établies sur un nombre de machines aussi grand que possible, mais seulement sur celles qui se présentent dans des conditions normales et n'offrent entre elles que de *faibles écarts* (1).

On a considéré, dans le groupe d'expériences qui précède, des machines qui, par la nature même du profil et du service fait, se trouvaient marcher toutes à peu près au même degré d'admission : et on a admis implicitement que ce degré d'admission était favorable au point de vue du rendement.

Si on considère les conditions variables de service des locomotives, on reconnaît que le problème, dans beaucoup de cas, n'est pas aussi bien déterminé : que pour un même service demandé, c'est-à-dire pour remorquer un train donné, entre deux points, dans un temps déterminé, il peut être fait usage de degrés d'admission très différents dont le choix est laissé absolument à l'*appréciation du mécanicien* et qui peuvent conduire à des résultats économiques très divergents.

Nous citerons à cet égard une expérience comparative faite avec deux des machines du roulement déjà cité, mais cette fois dans la remorque d'un train peu rapide et de faible tonnage.

(1) Il est bien entendu que tous les faits de consommation anormale doivent au contraire entrer en ligne de compte lorsqu'il s'agit d'apprécier les services effectivement rendus par tel ou tel type de machine, principalement par celles qui sont d'un modèle nouveau. — Si un groupe de machines, dont quelques-unes auraient fourni des résultats même très avantageux, présente une proportion exagérée de fortes consommations on devra, tout en constatant l'intérêt théorique des essais favorables, se tenir sur une grande réserve quant aux conclusions pratiques à en tirer.

L'une des deux machines était laissée entièrement à la conduite du mécanicien qui, dans les parties faciles du profil marchait à un cran de marche très bas ou étranglait l'ouverture du régulateur. Pour la deuxième, l'admission avait été réglée d'avance à une valeur uniforme et assez élevée : 25 %; quand cette admission se trouvait trop forte pour l'effort moyen de traction, on fermait par intervalles le régulateur, de préférence dans les petites pentes, mais même au besoin en palier.

TABLEAU II.

Train N° 94. Vitesse nominale : 55 km. PARCOURS DE CHARTRES A VERSAILLES.	MACHINE 2045. Admission variable.	MACHINE 2075. Admission réglée à 25 %.
DATE DE L'EXPÉRIENCE.....	20 Avril	17 Mai
FORCE ET DIRECTION DU VENT.....	Néant	Néant
TONNAGE :		
Une machine et tender.....	59 T	59 T
Voitures et fourgons.....	69	58
Poids des voyageurs (à 80kg l'un).....	6	6
Bagages et messageries.....	1	1
POIDS TOTAL DU TRAIN..... P	135 T	124 T
Différence d'altitude entre les points extrêmes..... H	12 ^m ,00	12 ^m ,00
Longueur du parcours..... L	70 ^{km} ,5	70 ^{km} ,5
Durée totale du parcours (deux arrêts déduits).....	84 ^m	82 ^m
Vitesse moyenne effective.....	55 ^{km} ,0	56 ^{km} ,0
<i>Résistance moyenne</i> à la traction, par tonne (mesures prises dans la descente de St-Cyr à Versailles)..... R	5 ^{kg} ,8	6 ^{kg} ,1
Vitesse amortie par les freins :..... V		
à Maintenon.....	10 ^m	10 ^m
à Rambouillet.....	12 ^m	12 ^m
à St-Cyr (ralentissement).....	(14-8)	(14-8)
à Versailles.....	14 ^m	14 ^m
Travail de traction..... $P \times L \times R$	55.201 Tm	53.326 Tm
Travail amorti par le frein..... $\frac{1}{2} \frac{P}{g} \Sigma (V_0^2 - V_f^2)$	3.935	3.615
Travail de la gravité..... $P \times H$	1.620	1.488
Travail effectif total.....	57.516 Tm	55.453 Tm
Soit en chevaux-heures.....	213 ^{chx}	205 ^{chx}
DÉPENSE EN EAU (déduction faite du service de la pompe à air, des injecteurs et de l'arrosage).....	2.810 ^L	2.360 ^L
DÉPENSE EN EAU par cheval effectif et par heure.....	13^L,2	11^L,5

La comparaison des résultats est caractéristique (1).

Celle des deux machines dont l'admission a été maintenue systématiquement à un taux assez élevé, donne des résultats sensiblement égaux, peut-être un peu supérieurs à ceux obtenus aux trains express, avec la même admission.

La deuxième machine, pour laquelle on a employé suivant le profil de la ligne, des admissions plus ou moins réduites, subit une perte considérable de rendement.

RENDEMENT ABSOLU. — Il est clair que pour procéder d'une manière réellement méthodique et arriver à une comparaison précise entre le rendement des locomotives et celui des machines fixes ou marines, on doit, pour les unes comme pour les autres, considérer le *rendement* correspondant à une *allure déterminée* et de préférence à l'allure la plus favorable.

Pour les machines fixes et les machines marines qui sont appelées à travailler habituellement dans des conditions de vitesse et d'admission à peu près invariables, on peut admettre que l'allure prévue par le constructeur et adoptée dans la pratique correspond sensiblement au maximum d'économie. Pour la locomotive, au contraire, il est nécessaire de déterminer, au moyen d'expériences spéciales, l'allure de *rendement maximum*. Nous n'insisterons pas sur cette question qui a été traitée avec développement dans un article antérieur de la *Revue générale* (Mai 1890). Nous nous bornerons à rappeler que cette allure correspond généralement à une admission peu différente de 25 %, avec une vitesse modérée. — C'est seulement lorsque l'on s'est placé à peu près dans ces conditions (comme pour les expériences du Tableau I, ou dans le deuxième cas, du Tableau II) que les résultats obtenus peuvent être considérés comme ayant une signification bien définie au point de vue du rendement.

INFLUENCE DES ÉLÉMENTS DE LA RÉGULATION. — On est toujours libre, en fait, avec les locomotives, de ne pas descendre au-dessous du degré d'admission reconnu le plus favorable. On ne jouit pas de la même latitude à l'égard de la vitesse qui est un élément imposé, et dont les valeurs trop grandes influencent le rendement dans un sens nuisible. Il est donc essentiel de s'attacher dans la construction et la régulation de la machine aux conditions capables d'atténuer, autant que possible, cet effet défavorable.

A cet égard *deux* éléments surtout ont une importance capitale :

- la grandeur relative des espaces morts ;
- le recouvrement des tiroirs à l'échappement.

(1) Lorsque nous citons, comme dans le cas actuel, les résultats d'expériences comparatives en nombre réduit, il doit être entendu que ces chiffres sont donnés à titre d'exemple numérique, mais qu'ils représentent les résultats moyens d'expériences faites en beaucoup plus grand nombre, et qui se sont trouvées assez concordantes pour justifier les conclusions énoncées.

L'influence de l'un et de l'autre de ces éléments s'exerce sur le régime des *compressions après l'échappement*, lesquelles aux allures rapides souvent atteintes par les locomotives, peuvent acquérir une valeur absolue et surtout une valeur relative tout à fait exagérée.

En ce qui concerne le *recouvrement* des tiroirs, nous mentionnerons les expériences faites sur une machine en tout semblable à celles déjà citées, mais pour laquelle le recouvrement intérieur a été ramené de $2^m/m,5$ à $0^m/m,5$.

TABLEAU III.

Machine 2044 (Réduction du recouvrement intérieur).

	TRAIN EXPRESS N° 86. CHATEAU-DU-LOIR A COURTALAIN. Parcours 76 km. Vitesse nominale moyenne : 60 km.	TRAIN EXPRESS N° 87. COURTALAIN A CHATEAU-DU-LOIR. Parcours 76 km. Vitesse nominale moyenne : 65 km.
DATE DE L'EXPÉRIENCE.....	18 Février 1893	29 Mars 1893
FORCE ET DIRECTION DU VENT.....	Néant	Néant
TONNAGE	Machine et tender..... 57 ^T 8 Voitures et fourgons.... 79 1 Wagon-Restaurant..... 29 Voyageurs (120)..... 10 Bagages, poste..... 4 Tonnage total.... 179 ^T	Machine et tender..... 58 ^T 12 Voitures et fourgons.... 118 1 Wagon-Restaurant..... 29 Voyageurs (90)..... 8 Bagages, poste..... 8 Tonnage total... 221 ^T
Longueur totale du parcours.....	76 km.	76 km.
Différence d'altitude entre les points extrêmes.....	— 103 mètres	+ 103 mètres
MESURES PRISES AU CHRONOMÈTRE	Vitesse moyenne effective.....	60 km.
	Résistance moyenne à la traction, par tonne (mesurée directement dans une pente de 10 m/m)...	5,90
	Vitesse amortie par les freins (en mètres).....	Pont-de-Braye.— Aiguille 17 ^m ,0 d° Gare... 10 ^m ,0 Bessé.— Gare..... 18 ^m ,0 Courtalain — Gare..... 12 ^m ,0
		Mondoubleau.— Ralentissement 24-20 Bessé..... 16 Pont-de-Braye.— Aiguil 16 d° Gare..... 12 La Chartre.— Ralentissement. 16-10 Marçon..... 16 Château-du-Loir. Signal avancé 16 d° Gare..... 14
Travail total de traction.....	80.263	97.416
Travail de la gravité.....	+ 18.437	— 22.763
$\frac{1}{2}$ force vive amortie par les freins Σ	7.818	19.103
TRAVAIL EFFECTIF TOTAL.....	106.518 Tm	93.756 Tm
soit en chevaux-heures.....	394chx	347chx
EAU DÉPENSÉE (défalcation faite du service de la pompe et des injecteurs).....	4.200L	3.850L
DÉPENSE D'EAU par cheval effectif et par heure.....	10 ^L ,65	11 ^L ,09
	10 ^L ,87	

Les résultats de ces essais font ressortir en faveur de la machine ainsi modifiée un avantage notable. Depuis que cette modification a été effectuée, la machine 2044 occupe constamment l'un des premiers rangs sur le tableau des économies.

B. Machines mixtes et à marchandises.

Les machines mixtes ou à marchandises ne présentent aucune différence essentielle, en ce qui concerne le mode de travail de la vapeur, avec les machines à voyageurs. La réduction de diamètre des roues est sensiblement compensée par la diminution de la vitesse de marche, en sorte que la rapidité des mouvements du piston et du tiroir, facteur important de la distribution effective, reste à peu près la même. L'influence des résistances passives n'est pas *a priori* plus considérable; car l'augmentation de leur valeur absolue correspond à peu près à celle de l'effort sur les pistons. En résumé on est conduit à admettre pour ces machines sensiblement la même valeur du *rendement absolu* que pour les machines à voyageurs.

Au point de vue des conditions du service, la machine qui remorque un train de marchandises ressent beaucoup plus que celle d'un train de voyageurs l'influence des *variations de charge* et de *profil*. Elle est obligée, dans les fortes rampes, de marcher à un degré d'admission élevé; mais surtout elle est sujette dans les petites déclivités et même dans les paliers à n'utiliser qu'une faible partie de son effort total: on sait que, surtout aux vitesses élevées, la marche à faible admission est une condition défavorable pour le rendement économique.

Pour ces motifs, la machine à marchandises donnera généralement en service des résultats moins avantageux que la machine à voyageurs. L'expérience montre que la consommation ne s'abaisse guère au-dessous du chiffre de 12^{kg.} par cheval effectif; elle atteint même parfois 13 ou 14^{kg.}. Ces chiffres n'ont d'ailleurs qu'un caractère purement relatif: il ne nous a pas paru utile de reproduire les résultats d'expériences particulières, qui n'ont d'intérêt que si on les rapproche des conditions mêmes imposées à la marche.

EMPLOI DES TIROIRS CYLINDRIQUES. — L'emploi des tiroirs cylindriques, indépendamment d'autres avantages moins nettement démontrés, procure une réduction des résistances passives pouvant atteindre 5% de l'effort total. Rien n'empêche de réaliser avec ce système de tiroir les conditions de distribution de la vapeur reconnues en elles-mêmes les plus avantageuses.

Il semble donc que l'on puisse attendre de la machine à distribution cylindrique, un accroissement appréciable du coefficient économique absolu, par rapport aux machines à tiroirs plans.

En fait, cette supériorité ne s'est pas jusqu'ici nettement manifestée, du moins pour les machines à grande vitesse. — Cela tient principalement à ce que dans le tracé des machines à pistons distributeurs, on a recherché comme un avantage la faible valeur des espaces morts, qui entraîne, au moins pour les allures rapides, une exagération fâcheuse des compressions. Lorsque ces mêmes machines marchent exceptionnellement à une vitesse réduite, on obtient des valeurs très favorables du coefficient économique.

CONSOMMATION DE VAPEUR SÈCHE PAR CHEVAL ET PAR HEURE. — Dans toutes les expériences que nous venons de citer, la consommation est donnée en poids *brut* d'eau passée du générateur aux cylindres, y compris, par conséquent, la proportion d'eau entraînée à l'état liquide.

Nous n'avons pas été à même de faire d'expériences directes pour déterminer cette dernière proportion : toutes les indications recueillies sont d'accord pour nous la faire considérer comme faible (1) et différant probablement très peu du chiffre de 5 %, proportion la plus basse constatée dans les essais de machines fixes ou marines.

Les résultats généraux obtenus dans les expériences des Chemins de fer de l'État, et qui confirment dans leur ensemble les observations anciennes faites au Chemin de fer de l'Est, ainsi qu'au Chemin de fer de Lyon, peuvent se résumer comme il suit :

La *locomotive* sous sa forme habituelle, avec la distribution par simple tiroir, peut descendre à un *chiffre de consommation inférieur* à 11^{kg.} d'eau par cheval effectif et par heure (2).

(1) Cette conclusion peut être justifiée par les faits suivants :

1° L'échappement des cylindres de nos machines n'accuse que très rarement, même au démarrage, la présence d'une quantité d'eau notable ;

2° La consommation d'eau ne varie pas d'une manière appréciable suivant que l'on marche avec niveau élevé ou avec niveau bas. — S'il existait une tendance notable à l'entraînement, cette tendance devrait évidemment s'accroître dans la marche à niveau élevé ;

3° Le poids d'eau dépensé par kg. de charbon brûlé, a été trouvé presque invariablement de 9kg. soit 8kg.,8 après déduction de la perte par les injecteurs. Si la proportion d'eau entraînée était tant soit peu élevée, on obtiendrait, semble-t-il, des chiffres de dépense plus considérables et en outre variables.

(2) Il paraît intéressant de rapprocher de ces conclusions les indications, malheureusement un peu concises, données par MM DURANT et LENCAUCHEZ, dans un mémoire relatif à leur intéressant système de distribution, sur la locomotive à grande vitesse du Chemin de fer d'Orléans. Rendant compte d'une expérience de traction effectuée entre Orléans et Tours sur un train à forte charge et à la vitesse des express, les auteurs arrivent pour l'évaluation de la dépense au chiffre de 10^{kg.},5 de vapeur sèche par cheval et par heure.

Ce chiffre correspond presque identiquement à celui que nous donnons plus haut : la locomotive à grande vitesse du Chemin de fer d'Orléans réalise précisément les conditions que nous indiquons d'autre part comme les plus favorables à l'économie de consommation.

Dans les conditions moyennes de service d'une machine à voyageurs, le chiffre de consommation est de $11^{\text{h}}.5$ à 12^{h} d'eau soit 11^{kg} à $11^{\text{kg}}.1/2$ de vapeur sèche.

La consommation subit un accroissement notable lorsque, dans les parcours à faible charge et en profil facile, on fait usage d'un degré de détente exagéré.

Les résultats économiques fournis par la locomotive sont, dans leur ensemble, notablement supérieurs aux constatations les plus favorables qui aient été faites, soit sur les machines fixes, soit sur les machines marines, pourvues du même système de distribution.

Cette supériorité a pour causes :

- 1^o — L'emploi des pressions relativement élevées;
- 2^o — La vitesse de rotation, *assez grande* pour réduire à une valeur insignifiante l'effet du refroidissement par les parois des cylindres et *assez modérée* pour ne pas troubler les conditions d'écoulement de la vapeur ;
- 3^o — L'emploi de la coulisse, qui est non seulement un organe de manœuvre d'une extrême commodité, mais en même temps un *excellent appareil de détente variable* pour toutes les admissions supérieures à 20 ou 25 %.

Les conditions qui permettent d'obtenir le maximum d'économie de consommation sont :

- 1^o Une pression de régime voisine de 10^{kg} ;
- 2^o Des cylindres de dimensions modérées permettant de marcher en service moyen avec un degré suffisamment élevé d'admission (20 % au minimum) ;
- 3^o Des espaces morts assez développés (6 à 8 % à chaque extrémité du cylindre) ;
- 4^o Un jeu très libre de l'échappement obtenu par la suppression du recouvrement intérieur des tiroirs ou même par l'adoption d'un certain découvrement.

(A continuer).

RENDEMENT ET UTILISATION ÉCONOMIQUE DES MACHINES LOCOMOTIVES.

Comparaison avec les moteurs fixes et les appareils de navigation.

Bénéfice obtenu par l'emploi des distributions spéciales

(Suite et fin) (1).

Par M. DESDOUITS,

INGÉNIEUR EN CHEF ADJOINT DU MATÉRIEL ET DE LA TRACTION
DES CHEMINS DE FER DE L'ÉTAT.

(Pl. XXXVI).



III.

MACHINES A DOUBLE EXPANSION.

(Systèmes Woolf et compound).

MOTEURS FIXES. — MACHINES MARINES. — LOCOMOTIVES.

MACHINES FIXES. — L'application du principe de la double détente est presque aussi ancienne que la machine à vapeur elle-même. Sans parler des premières tentatives de Hornblower et des spécifications diverses consignées dans les brevets de Watt, nous trouvons, dès les premières années de ce siècle, la machine à deux cylindres conjugués d'Arthur Woolf, qui réalise d'une manière à peu près complète le principe et les avantages de la double expansion.

Le système de Woolf, appliqué au type primitif des machines à balancier, qui comportent un mouvement lent, mais très régulier, et qui s'accoutument d'une pression de régime peu élevée, a continué pendant toute la durée de ce siècle à jouir d'une faveur marquée dans certaines régions industrielles, sans toutefois supplanter entièrement la machine à cylindre unique. Il paraît avoir réalisé dès la première période de son application et malgré la faible valeur de

(1) *Revue générale* — N^o d'Avril 1894.

la pression aux chaudières, une économie de consommation notable. Alors que la machine à admission directe dépensait 25 à 30 litres d'eau par cheval, la consommation d'une machine Woolf d'atelier n'était guère que de 20 à 22 litres.

A mesure que le régime des pressions s'élève, et sous l'impulsion produite par la transformation des machines marines, le rendement économique de la machine Woolf, mieux étudiée et mieux réglée, éprouve une importante amélioration.

A cette époque commençaient à se développer les méthodes d'analyse expérimentale préconisées par la Société Industrielle de Mulhouse. — D'importants mémoires publiés en 1876 et 1878 par M. Hallauer contiennent des relations multiples d'expériences, qui permettent d'établir sur des données authentiques la valeur effective du rendement des machines Woolf et similaires employées par l'industrie à terre.

Dans ces expériences, la consommation est évaluée en poids de *vapeur saturée sèche*; la proportion d'eau entraînée est estimée d'autre part à environ 5%. — Le *travail* est mesuré à la fois en chevaux *indiqués* sur les pistons, et en chevaux *effectifs* sur l'arbre de la machine.

Le mémoire de M. Hallauer, en date du 30 Décembre 1878, donne les résultats des divers essais effectués sur trois machines différentes, deux verticales à balancier, une horizontale; chacune fonctionnant successivement à différents degrés de détente. Toutes ces machines sont à condensation. La pression de vapeur est d'environ 5^{kg}.

Si on considère d'abord les résultats en bloc, on trouve les chiffres moyens suivants :

	MACHINES VERTICALES		MACHINE HORIZONTALE
	Malmerspach.	Munster.	
Consommation de vapeur sèche par cheval <i>indiqué</i> et par heure...	8 ^{kg} ,42	9 ^{kg} ,03	8 ^{kg} ,86
Consommation de vapeur sèche par cheval <i>effectif</i> et par heure....	9 ^{kg} ,93	10 ^{kg} ,87	10 ^{kg} ,12

La moyenne générale des trois séries d'essais donnerait :

8^{kg},77 par cheval indiqué.

10 ,3 par cheval effectif.

L'influence du *degré de détente*, qui n'avait fait l'objet à peu près d'aucune étude méthodique pour les machines anciennes à distribution par simple tiroir, apparaît dans les essais qui nous occupent, bien que d'une manière encore un peu confuse.

Ainsi on a constaté sur la machine de Malmerspach, citée plus haut, les résultats suivants :

DEGRÉ DE DÉTENTE.	Consommation par heure et par cheval	
	Indiqué.	Effectif.
	kg.	kg.
E = $\frac{1}{28}$	8,273	10,019
C = $\frac{1}{13}$	8,149	9,465
B = $\frac{1}{6}$ } (valve étranglée)	8,847	10,301

En reliant ces résultats (qu'il serait désirable d'avoir en plus grand nombre) par le tracé d'une courbe, on reconnaît l'existence d'un minimum de consommation qui correspond à peu près à la détente de : $\frac{1}{12}$, si on considère le travail indiqué; et de $\frac{1}{10}$ si on prend pour terme de comparaison le travail effectif (1).

(Il convient toutefois d'observer que dans l'essai B, la valve ayant été étranglée, le rendement a subi de ce fait une certaine diminution : que par suite le point de rendement maximum correspondrait en réalité à une admission un peu plus forte que 10 %).

Comme observation d'ensemble, on peut constater, et c'est là un résultat pratique très important, que la valeur réelle du rendement s'écarte peu du maximum pour toutes les admissions comprises entre le degré le plus faible et environ 20 %.

En d'autres termes, la machine Woolf présente une *région* de rendement favorable assez étendue, non seulement du côté des fortes admissions, mais aussi du côté des grandes détentes, contrairement à ce qui a lieu pour les machines à simple tiroir.

MACHINES MARINES. — Le système de la détente multiple a été, depuis environ trente ans, adopté d'une manière exclusive pour les appareils de navigation : les uns conservant l'agencement général du moteur Woolf; d'autres, en plus grand nombre, adoptant la disposition dite *compound*, caractérisée par l'emploi d'un réservoir intermédiaire entre les deux cylindres; d'où une liaison moins rigoureuse entre les phases de la distribution.

(1) Ces chiffres ne peuvent dans aucun cas être considérés comme ayant une valeur absolue: la valeur des espaces morts, variable d'une machine à l'autre, entrant pour une part importante dans le calcul de la détente réelle.

Le mouvement qui a abouti à l'adoption définitive de la double expansion dans les machines marines a eu le privilège d'être suivi du dehors avec beaucoup plus d'intérêt qu'on n'en avait accordé jusque-là aux questions concernant l'économie de combustible. — C'est certainement l'annonce des résultats obtenus avec les nouvelles machines marines, bien plutôt que les constatations faites sur les moteurs fixes de Woolf, qui a déterminé l'extrême faveur dont jouit aujourd'hui dans l'opinion publique le système *compound*.

Il est nécessaire de dégager ici les résultats réels, de certaines exagérations. On estime assez généralement à 40 ou 50 % l'économie réalisée par l'introduction du système *compound* dans les appareils de navigation. C'est, en effet, à peu près dans cette proportion que s'est accru le rendement de la machine marine depuis l'époque où a commencé la transformation qui eut pour promoteurs J. Edler en Angleterre, B. Normand et Dupuy de Lôme en France.

Mais dans cette transformation on ne doit pas considérer seulement l'application de la double détente. L'accroissement du timbre des chaudières, rendu possible par l'emploi des condenseurs à surface, est un fait qui devait *par lui-même* et en dehors du système spécial de distribution, amener une importante amélioration du rendement. En même temps, des modifications avantageuses étaient apportées à la disposition mécanique des appareils : réduction du volume des cylindres, mieux protégés contre le refroidissement ; emploi plus général de la connexion directe et du système à pilon ; augmentation du nombre de tours ; adoption presque générale de la coulisse comme appareil de détente.

Toutes ces modifications — qui, observons-le en passant, ont beaucoup rapproché le type des machines marines de celui de la locomotive — ont eu leur part dans l'accroissement du coefficient de rendement. En réalité, les résultats économiques constatés aujourd'hui n'ont été obtenus que d'une manière progressive et non par le seul fait de l'adoption du système *compound* (1).

Nous donnerons, d'après l'ouvrage récent et très apprécié de M. Widmann : *Étude des principes de la construction des machines marines* (2) les résultats de consommation constatés sur les machines *compound* et Woolf de la Marine nationale.

(1) Les premiers essais de la Marine nationale dans lesquels la machine à double détente (système Dupuy de Lôme) fut mise en présence de machines de même force et de même construction, à admission directe, ne donnèrent pas en faveur du système *compound* de résultats bien caractérisés. C'est seulement lorsque le timbre des chaudières fut porté de 2^{kg.}1/4 à 4 ou 5^{kg.}, que l'on constata pour la machine *compound* un accroissement notable d'économie, mais on ne fut pas à même de faire la comparaison avec les machines à admission directe, qui, dès cette époque, étaient abandonnées.

(2) Bernard et Cie, éditeurs. — 1891.

Ces résultats sont déduits des comptes rendus d'essais officiels, et ont fait l'objet, de la part de M. Widmann, d'une analyse spéciale : ils ont été discutés par leur auteur avec M. Hallauer, l'éminent expérimentateur de la Société de Mulhouse.

Dans tous les essais, l'évaluation du *travail* est donnée seulement en chevaux *indiqués* sur les pistons. La dépense est exprimée en *poids de vapeur sèche*. La proportion d'eau entraînée est estimée à environ 5 %.

Les expériences relatées par M. Widmann se rapportent aux bâtiments suivants :

Duquesne (8,000 chevaux indiqués) groupe de 3 machines Woolf.

Cigale .. compound à 2 cylindres, à pilon.

Voltigeur compound à 3 cylindres, horizontaux.

Mytho .. compound à 3 cylindres, à pilon.

TABLEAU IV.

1° Duquesne.					
Rapport des volumes des cylindres = 1,94	DATE DES ESSAIS.				
	27 Septembre	11 Septembre	5 Septembre	23 Octobre	2 Octobre
Introduction effective en fraction de course, dans le petit cylindre	0,67	0,61	0,49	0,23	0,06
Coefficient de détente réelle, en tenant compte des espaces morts	2,75	3,00	3,60	9,35	12,70
Nombre de tours par minute	81	77	73	62	47
Consommation de vapeur saturée sèche par cheval indiqué et par heure	9 ^{kg.} ,40	9 ^{kg.} ,40	8 ^{kg.} ,91	8 ^{kg.} ,50	10 ^{kg.} ,6
2° Cigale.					
Rapport des volumes des cylindres = 3,2					
Introduction effective en fraction de course, dans le petit cylindre	0,71				
Coefficient de détente réelle, en tenant compte des espaces morts	4,37				
Nombre de tours par minute	90				
Consommation de vapeur saturée sèche par cheval indiqué et par heure	8 ^{kg.} ,39				
3° Voltigeur.					
Rapport des volumes des cylindres = 2,62	DATE DES ESSAIS.				
	29 Mai 1880	27 Avril 1880	30 Avril 1880	27 Avril 1880	
Introduction effective en fraction de course, dans le petit cylindre	0,52	0,45	0,32	0,16	
Coefficient de détente réelle, en tenant compte des espaces morts	5,6	6,6	9,0	11,1	
Nombre de tours par minute	110	105	98	77	
Consommation de vapeur saturée sèche par cheval indiqué et par heure	9 ^{kg.} ,25	8 ^{kg.} ,99	8 ^{kg.} ,99	8 ^{kg.} ,95	

TABLEAU IV (suite).

4° Mytho.				
Rapport des volumes des cylindres = 3,53	DATE DES ESSAIS.			
	19 Février 1880	12 Février 1880	9 Février 1880	6 Février 1880
		Valve un peu fermée.	Valve étranglée.	Valve très étranglée.
Introduction effective en fraction de course, dans le petit cylindre.	0,52	0,35	0,25	0,11
Coefficient de détente réelle, en tenant compte des espaces morts.	6,2	8,6	11,7	19,4
Nombre de tours par minute.....	66	73	61	45
Consommation de vapeur saturée sèche par cheval indiqué et par heure.....	8 ^{kg.} ,35	8 ^{kg.} ,51	8 ^{kg.} ,26	9 ^{kg.} ,5

Si on considère l'ensemble des résultats fournis par ces essais, on peut dire que la machine marine *compound simple*, marchant à un degré de détente favorable (4 à 10 fois le volume d'admission) présente une consommation d'environ 8^{kg.},50 de *vapeur sèche* par cheval *indiqué* — soit en poids d'eau brut : 9^{kg.},0. — Quant à la consommation du cheval *effectif*, il n'existe malheureusement pour l'évaluer aucun élément d'appréciation certain. Si on accepte pour les résistances passives le taux de 10 %, proportion la plus faible qui ait été constatée dans les expériences de machines à terre, on arrive au chiffre de 9^{kg.},5 de vapeur sèche ou 10^{l.},0 d'eau par cheval effectif et par heure, qui semble devoir être considéré comme un minimum (1).

Les expériences mentionnées par M. Widmann permettent d'apprécier d'une manière assez nette l'influence de la détente sur le coefficient économique. Si on représente graphiquement l'ensemble des résultats en prenant, par exemple, pour abscisse la fraction réelle d'admission (espace mort du petit cylindre compris) et pour ordonnée le chiffre de consommation : le groupement des points obtenus dénote la présence d'un *minimum* de consommation, correspondant à environ 15 % d'admission réelle.

On constate d'ailleurs que le coefficient de dépense varie assez peu, lorsque l'admission réelle s'élève, par exemple, jusqu'à 30 %, ou s'abaisse au contraire jusqu'à 10 % : de même que pour la machine Woolf d'atelier, il existe une *région assez étendue de rendement favorable*.

(1) Les essais mentionnés par M. Widmann sont de date assez ancienne et se rapportent à un régime de pression encore peu élevé : 5 à 6^{kg.}. . Toutefois, la date de l'ouvrage : 1891, semble indiquer que les résultats fournis par la machine *compound simple* ne sont pas sensiblement modifiés depuis l'époque à laquelle se rapportent les essais cités. Nous mettons, bien entendu, en dehors les machines à triple ou quadruple expansion qui n'ayant pas d'analogues pour les locomotives, ne sauraient entrer dans le cadre de cette étude.

LOCOMOTIVES. — Les résultats économiques obtenus dans la transformation des machines marines, devaient attirer l'attention des ingénieurs de chemins de fer, grandement intéressés eux-mêmes à l'économie de combustible. Cette étude pouvait paraître d'autant plus opportune que la locomotive sous sa forme ordinaire était assez généralement considérée comme une machine thermique de valeur médiocre.

M. Mallet ouvre la voie aux applications pratiques vers 1876, avec ses locomotives compound *Bayonne-Biarritz*. Bientôt des essais analogues sont entrepris sous des formes variées par MM. Webb, Worsdell en Angleterre, von Borries en Allemagne, Borodine en Russie. Enfin, dans ces dernières années, plusieurs de nos grandes Compagnies françaises abordent résolument l'application de la double détente à leurs locomotives.

L'adoption du système compound ayant eu, dès son début, pour objet essentiel la réduction des dépenses en combustible, la plupart des administrations qui en ont fait l'essai se sont attachées à établir, par des chiffres comparatifs, l'importance des résultats obtenus. Malheureusement cette comparaison ne repose dans le plus grand nombre de cas, que sur des données assez imparfaitement définies. Le plus souvent les machines nouvelles sont comparées avec d'autres machines déjà en service, qui peuvent différer du type soumis aux essais, non seulement par le système de distribution, mais par la puissance, le timbre des chaudières, l'état général d'entretien. Dans tous les cas, les résultats ainsi obtenus, simplement comparatifs, ne peuvent conduire à des chiffres exprimant d'une manière absolue la valeur économique du type de machine considéré.

La seule méthode qui permette d'arriver à des constatations certaines est celle qui consiste à rapporter, comme nous l'avons fait dans tout ce qui précède, les résultats fournis par chaque type de machine à une *commune mesure* rigoureusement définie, qui n'est autre que le *travail effectif* réalisé.

La première application de cette méthode, dans la question qui nous occupe, est due à la Compagnie des chemins de fer du S.-O. de la Russie. Nous voulons parler des expériences si justement renommées de M. Borodine.

EXPÉRIENCES DES CHEMINS DE FER DU S.-O. DE LA RUSSIE (1).

Une première série d'essais ont été exécutés dans un atelier d'expériences, où les locomotives étaient disposées de manière à fonctionner comme *machines fixes*. On comparait deux machines, l'une du système compound, l'autre à distribution ordinaire, semblables pour le reste de leur construction. La

(1) *Revue générale*. N° de Décembre 1886, p. 317. — *Bulletin de la Société des Ingénieurs civils*. N° de Septembre 1886.

consommation de la machine compound a été trouvée en moyenne de $12^{\text{kg}},0$ d'eau par cheval indiqué, tandis que la machine du type ordinaire dépensait de 13 à 14^{kg} . Ces chiffres de consommation sont l'un et l'autre élevés. L'exagération de dépense doit être attribuée à ce que les deux machines fonctionnaient dans des conditions très différentes de celles du service normal et nettement défavorables au point de vue du rendement : pression réduite, nombre de tours trop faible, détente exagérée.

Une seconde série d'essais, destinés à réaliser les conditions même de la pratique, a été exécutée en 1883 par M. Lœwy sur des trains en service. — La comparaison portait encore sur une machine du système ordinaire et sur une machine Mallet, la première timbrée à $10^{\text{kg}},0$, la deuxième à $12^{\text{kg}},0$. — Les cylindres de cette dernière ont l'un $0^{\text{m}},42$, l'autre $0^{\text{m}},60$ de diamètre. La dépense d'eau relevée pour la machine compound a été en moyenne de $10^{\text{l}},4$ par *cheval indiqué* et par heure, la machine ordinaire dépensant environ 12 litres. Le chiffre de $10^{\text{l}},4$ par cheval indiqué revient sensiblement à $11^{\text{l}},5$ par *cheval effectif*. Il y donc un progrès sur les essais précédents, mais encore peu accentué.

A une époque toute récente, la Compagnie du S.-O. de la Russie a fait connaître les résultats obtenus avec une machine à voyageurs à quatre cylindres, timbrée à 14^{kg} . — Les essais accusent une consommation de $9^{\text{l}},0$ par cheval indiqué, chiffre qu'on peut considérer comme équivalent à $10^{\text{l}},0$ par cheval effectif. — C'est un résultat extrêmement favorable et qui, s'il est confirmé (1), devrait faire considérer cette machine comme ayant atteint un degré d'économie tout à fait remarquable.

EXPÉRIENCES SUR LA MACHINE COMPOUND DU CHEMIN DU NORD.

La Compagnie du Nord-Français a mis récemment en service pour ses trains express une série de machines compound à quatre cylindres (2), timbrées à 14^{kg} , dont la grande puissance, la régularité de marche et la faible consommation d'eau ont été particulièrement remarquées. — Il y avait un grand intérêt à fixer, par des mesures précises, le coefficient économique de ces machines, qui paraissent réaliser le type actuellement le plus parfait de la locomotive compound.

(1) *Revue générale*. N° de Février 1893, p. 57. — Le calcul du travail au moyen des diagrammes d'indicateurs relevés à des intervalles plus ou moins éloignés laisse toujours subsister quelques doutes : d'autre part, il est fait mention dans le compte rendu des essais, d'une perte de *vapeur par les soupapes* estimée à 7 ou 8 % : ce taux semble bien élevé et il paraît difficile qu'on l'ait établi par des mesures précises.

(2) Voir pour la disposition de ces machines la Notice de M. l'Ingénieur en chef du Bousquet, *Revue générale*, N° de Juin 1892.

Nous devons à la très grande obligeance de M. du Bousquet, Ingénieur en Chef du Matériel et de la Traction, d'avoir pu appliquer à deux machines de cette série les procédés de mesure décrits au commencement du présent article et au moyen desquels ont été obtenues les valeurs du coefficient de rendement pour les locomotives expérimentées aux Chemins de fer de l'État.

Les essais ont eu lieu :

Au train 15 entre Paris et Amiens — Machine 2121 ;

Au train 109 entre Paris et St-Quentin — Machine 2123.

La mesure du travail a été obtenue dans le premier de ces essais par la méthode chronométrique ; pour le deuxième on a employé concurremment le chronomètre et le pendule dynamométrique.

TABLEAU V.

Machine N° 2121 (Nord).		Machine N° 2123 (Nord).																			
Composition du train..	<table border="0"> <tr><td>{</td><td>Machine.....</td><td>48 T</td></tr> <tr><td></td><td>Tender (à moitié parcours)..</td><td>29</td></tr> <tr><td></td><td>Voitures et fourgons.....</td><td>140</td></tr> </table>	{	Machine.....	48 T		Tender (à moitié parcours)..	29		Voitures et fourgons.....	140	Composition du train...	<table border="0"> <tr><td>{</td><td>Machine.....</td><td>48 T</td></tr> <tr><td></td><td>Tender.....</td><td>30</td></tr> <tr><td></td><td>Voitures et fourgons.....</td><td>202</td></tr> </table>	{	Machine.....	48 T		Tender.....	30		Voitures et fourgons.....	202
{	Machine.....	48 T																			
	Tender (à moitié parcours)..	29																			
	Voitures et fourgons.....	140																			
{	Machine.....	48 T																			
	Tender.....	30																			
	Voitures et fourgons.....	202																			
Poids total du train..... P	217 T	Poids total du train.....	280 T																		
État du temps = Vent travers modéré.		État du temps = Calme.																			
Longueur du parcours..... L	131km	Longueur du parcours.....	153km																		
Différence d'altitude entre les points extrêmes..... H	— 20 ^m ,»	Différence d'altitude entre les points extrêmes.....	+ 20 ^m ,»																		
Mesures prises au chronomètre.	Durée totale du parcours.....	97'	Durée totale du parcours.....	132'																	
	Vitesse moyenne effective.....	83km	Vitesse moyenne effective.....	75km																	
	Résistance moyenne en kilogrammes par tonne (mesures prises dans la pente de Chantilly) = R	7kg,35	Résistance moyenne en kilogrammes par tonne..	5kg,6																	
	Travail total de traction..... = P × L × R	208.938Tm 4	Travail total de traction.....	239.904 Tm																	
	Vitesse amortie par les freins : à Amiens.....	15 ^m	Vitesse amortie par les freins { à Creil..... 22 ^m à Noyon.... 22-15 à St-Quentin 22 ^m																		
	Travail total des freins..... $\frac{1}{2} \frac{P}{g} V^2$	2.488 Tm	Travail total des freins.....	17.510 Tm																	
	Travail de la gravité..... P × H	—4.340	Travail de la gravité.....	5.600																	
Travail effectif total développé par la machine..	207.086Tm 4	Travail effectif total développé par la machine...	263.014 Tm																		
Soit en chevaux-heures.....	766chx	Soit en chevaux-heures.....	974chx																		
		Mesures prises au pendule dynamométrique																			
		Parcours effectué avec admission de vapeur..... = L'	130km																		
		Effort effectif moyen par tonne. = π	7k,04																		
		Travail effectif total.. = P × L' × π	256.256Tm																		
		Soit en chevaux-heures.....	949chx																		
		Moyenne.....	961chx																		
* Dépense en eau (arrosage déduit).....	7.650	Dépense en eau (arrosage déduit).....	9.500																		
Soit, par cheval effectif et par heure.	10 ^L ,0	Soit par cheval effectif et par heure.....	9 ^L ,9																		

* Il n'a pas été fait de correction pour la faible perte d'eau résultant du fonctionnement de l'injecteur (système Sellers) et du frein à vide.

Les résultats de ces essais remarquablement concordants font ressortir à $10^{\text{kg}}\cdot 0$ chiffre rond, la consommation par cheval effectif et par heure, en poids d'eau brut.

La proportion d'eau entraînée n'a pas été l'objet de mesures directes. Elle semble pouvoir être évaluée, comme pour les machines de l'État, approximativement à 5 %. — Dans ces conditions, la consommation de *vapeur sèche* ressort à $9^{\text{kg}}\cdot 5$ *par cheval effectif et par heure*.

On a trouvé précédemment : pour les machines Woolf d'atelier $10^{\text{kg}}\cdot 3$ en poids de vapeur sèche, ou $10^{\text{kg}}\cdot 8$ en poids d'eau brut, et pour les machines marines compound simples : (les résistances passives étant évaluées au taux minimum de 10 %) : $9^{\text{kg}}\cdot 5$ en poids de vapeur sèche, ou 10^{kg} en poids d'eau brut.

On voit que la locomotive compound, type Nord, obtient des résultats économiques au moins égaux à ceux que donnent les machines fixes de Woolf, ou les machines marines compound, *marchant à condensation*. L'absence du condenseur se trouve compensée par le régime de pression plus élevé, la vitesse de rotation plus grande et probablement la valeur plus faible des résistances passives.

Les chiffres de consommation de la machine Nord comparés aux résultats obtenus avec les locomotives ordinaires, sont d'autant plus remarquables qu'il s'agit d'expériences faites à des vitesses élevées (75^{km} et 83^{km}) pour lesquelles il est possible que le point de rendement maximum soit déjà dépassé.

Il est bien entendu que les résultats économiques constatés dans ces essais doivent être imputés exclusivement au type particulier de machine expérimenté, et non d'une manière générale à la locomotive compound.

La disposition compound comporte une plus grande variété d'éléments capables d'influer sur le rendement économique que la machine ordinaire. Si dans le cas actuel, on est arrivé par une étude approfondie, à régler de la manière la plus heureuse ces éléments divers : régime de pression, section des passages de vapeur, volume des espaces morts et du réservoir intermédiaire, degré d'admission dans les deux cylindres, etc., il est clair que ces mêmes éléments peuvent dans une autre machine se trouver combinés d'une manière moins favorable : le bénéfice de la disposition compound se trouvera atténué et peut même disparaître entièrement.

Il ne nous a pas été possible, malheureusement, d'étudier de près les variations que subit le rendement aux différents degrés d'admission et à des vitesses variables. Il semble toutefois ressortir des essais que pour des vitesses modérées (75 à 80 km. à l'heure) le rendement s'écarte peu de sa valeur maximum

lors que la détente effective varie entre 4 et 10 volumes : c'est ce qui a été déjà observé pour les machines Woolf d'atelier et les machines marines compound.

IV.

MACHINES A DISTRIBUTION CORLISS ET DÉRIVÉES.

A l'époque même où le système compound était définitivement adopté pour les appareils de navigation, la machine Corliss, importée d'Amérique, venait lui disputer la faveur des constructeurs et des industriels pour les moteurs fixes. Le type primitif Corliss a donné naissance, en quelques années, à un grand nombre de variantes : mais ces machines ne diffèrent guère entre elles que par des détails d'ordre mécanique : en tant qu'appareils thermiques on peut les considérer comme appartenant à une même famille, et devant donner des résultats économiques à peu près équivalents.

MACHINES FIXES. — Il a été publié sur les machines genre Corliss, de nombreux comptes rendus d'expériences de rendement, la plupart émanant des usines même de construction. Les chiffres sont nécessairement assez disparates et quelques-uns accusent un degré d'économie difficile à admettre sans justification plus complète.

Nous nous bornerons à reproduire les résultats des expériences exécutées au Creusot en 1883, dont un résumé a été publié par M. l'Ingénieur en Chef des Mines Delafond. Ces expériences, en raison des soins extrêmes apportés aux mesures de toutes sortes, du nombre et de la variété des essais, peuvent être considérées comme fixant, avec la plus grande autorité possible, le coefficient d'économie pratique du moteur Corliss.

La machine soumise aux essais était d'une force d'environ 200 chevaux. Le travail a été mesuré en *chevaux indiqués* et en *chevaux effectifs* : le rapprochement des deux ordres de mesure donnait la valeur des résistances passives. En outre, — ce qui présente un intérêt tout particulier au point de vue de la comparaison, soit avec les machines marines, soit avec les locomotives — on a opéré successivement *avec* et *sans* emploi du *condenseur*.

Essais avec condensation. — Les résultats obtenus dans la marche *avec condenseur* permettent de comparer le moteur Corliss soit avec les machines com-

pound de la marine, soit avec les machines fixes de Woolf qui toutes comportent l'emploi de cet organe.

Les essais de cette série ont été faits avec des pressions de régime variant de 4 kg. à 8 kg. environ. On a été amené à reconnaître que la pression la plus élevée donnait les résultats les plus favorables.

Avec une pression à la chaudière de 7^{kg.},75, on a obtenu pour divers degrés d'admission, les résultats suivants :

		DEGRÉ D'ADMISSION EN $\frac{1}{100}$ DE LA COURSE		
		0,055	0,067	0,125
Consommation par cheval.... (eau entraînée comprise).	indiqué.....	k. 7,63	k. 7,47	k. 7,87
	effectif.....	9,72	9,37	9,53

La vitesse de rotation était uniformément de 60 tours par minute. Le cylindre avait une enveloppe de vapeur.

Il semble résulter de ces essais qu'une admission très faible (6 à 7%) est favorable au rendement, mais il faut observer qu'il s'agit ici d'une distribution à *déclie*, dans laquelle l'admission réelle est toujours plus élevée que l'admission apparente.

Essais sans condensation. — Les essais *sans condensation* ont été faits avec et sans *enveloppe* de vapeur. L'emploi de l'enveloppe a été trouvé réaliser un avantage sensible, du moins dans le cas de vitesses peu élevées. On a fait varier la pression de régime entre des limites étendues. De même que dans la marche avec condenseur, les résultats les plus favorables ont été atteints avec la pression la plus élevée. Dans ces conditions, on a obtenu pour divers degrés d'admission les chiffres suivants :

		ADMISSION APPARENTE EN $\frac{1}{100}$ DE LA COURSE			
		11	13	16	20
Consommation d'eau par cheval....	indiqué...	k. 10,20	k. 9,90	k. 10,0	k. 9,62
	effectif....	12,07	11,50	11,36	10,74

La vitesse de rotation est de 60 tours par minute.

On constate ici que, contrairement à ce qui a été observé dans la marche avec condenseur, les faibles admissions sont franchement défavorables et que le rendement s'accroît lorsque la fraction d'introduction s'élève jusqu'à 20 %.

Le chiffre de consommation le plus favorable obtenu dans toute cette série d'essais est celui qui correspond à une admission de 20 % : $10^{l,74}$ par cheval effectif et par heure, soit en vapeur sèche $10^{kg,2}$.

La diminution de rendement due à la suppression du condenseur, ressort à environ 15 %.

LOCOMOTIVES. — L'application des distributions à dé clic n'a été tentée qu'à une époque toute récente sur les locomotives : ce système paraissait peu compatible avec l'allure variable et souvent très rapide imposée à la locomotive et avec l'obligation de changer la marche suivant les circonstances.

L'Administration des Chemins de fer de l'État a mis en service depuis l'année 1889, un certain nombre de machines à grande vitesse, du système de M. A. Bonnefond qui, par un ensemble de dispositions mécaniques appropriées est parvenu à surmonter ces difficultés multiples.

Nous donnons ci-dessous les résultats d'essais de rendement exécutés dans des conditions particulièrement précises sur une de nos machines Bonnefond en service.

Ces expériences ont été faites sur le parcours de Château-du-Loir à Courtalain qui contient une section en forte rampe (10 millimètres par mètre sur 10^{km} de longueur). Afin de faire ressortir l'influence de la vitesse, on a, pour l'une de ces expériences, décomposé le parcours total en deux parties — la première à peu près en palier, la seconde contenant tout le parcours en rampe.

La moyenne de ces résultats ressort à peu près exactement à $10^{l,0}$ par cheval-heure : chiffre précisément égal à celui qui a été trouvé par la machine compound Nord.

On voit d'autre part que le rendement s'élève avec la vitesse : ce résultat n'a rien qui doive surprendre — l'excès de compression qui, dans les machines à tiroir unique, se manifeste aux vitesses élevées, étant évité, grâce à l'indépendance de l'échappement, on bénéficie des avantages thermiques inhérents à une grande vitesse de rotation.

TABLEAU. — Machine 2603 (BONNEFOND).

	TRAIN N° 86.	TRAIN N° 86.	TRAIN N° 86.			
DATE DE L'EXPÉRIENCE.....	17 avril 1893.	3 mai 1893.	10 Janvier 1894.			
FORCE ET DIRECTION DU VENT.....	Néant.	Travers faible.	Arrière modéré.			
TONNAGE.....	Machine et tender. 64 ^T Voit ^{es} et fourgons. 89 W.-Restaurant .. 29 Voyageurs..... 11 Bagages, poste .. 5 <hr/> 198 ^T	64 ^T 99 29 7 5 <hr/> 204 ^T	Machine et tender 62 ^T Voitures et fourgons..... 105 W.-Restaurant 29 Voyageurs 4 Bagages, poste..... 4 Bouillottes..... 1 <hr/> 205 ^T			
Longueur totale du parcours.....	76 km. (Château-du-Loir à Courtalain).	76 km. (Château-du-Loir à Courtalain).	33km. (Château-du-Loir à Bessé).	43km. Bessé à Courtalain.		
Différence d'altitude entre les points extrêmes	+ 103 ^m	- 103 ^m	+ 29 ^m	+ 74 ^m		
MESURES PRISES AU CHRONOMÈTRE.	Vitesse moyenne effective	58 km.	60 km.	70km.	55km.	
	Résistance moyenne par tonne.....	5kg.,8	5kg.,8	6kg.,5	5kg.,5	
	Vitesse amortie par les freins	Marçon 15 ^m 10 P.-de-Braye(aig.) 15 ^m d° (gare). 10 Bessé 16 Courtalain. 20	Marçon 20 ^m 16 La Chartre..... 20 ^m 10 P.-de-Braye(aig.) 16 ^m d° (gare). 10 Bessé 16 Courtalain..... 16	P.-de-Braye(aig.).. 16 ^m id. (gare).. 8 ^m Bessé 16 ^m	Courtalain. 16 ^m	
	Travail total de traction.....	86.466 TM ,4	89.923 TM ,2	43.972 TM ,0	48.482 TM ,0	
	Travail de la gravité	20.394 ,0	21.012 ,0	5.947 ,0	15.170 ,0	
	$\frac{1}{2}$ force vive amortie par les freins.....	11.161 ,0	13.641 ,0	6.018 ,0	2.674 ,0	
	Travail effectif total.....	118.021 TM ,4	124.576 TM ,2	55.937 TM ,0	66.326 TM ,0	
	MESURES PRISES AU PENDULE DYNAMOMÉTRIQUE.	Parcours effectué avec admission de vapeur.		53km.		
		Effort moyen de la vapeur par tonne.....		11kg.,2		
		Travail effectif total.....		121.094,4		
Travail effectif en chevaux-heures.....	437 chx-h.	454 chx-h.	207chx-h.	245chx-h.,6		
EAU DÉPENSÉE (défalcation faite de 4 ‰, service du petit cheval et arrosage)	4.500 L	4.450L	1.960L	2.550L		
DÉPENSE D'EAU par cheval effectif et par heure. ...	10 L,2	9L,8	9L,45	10L,38		
			9L,9			
			9L,96			

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Les observations rapportées et analysées au cours de cette étude nous conduisent à un ensemble de conclusions qui peuvent se résumer en quelques termes précis :

1° La *machine locomotive* considérée soit sous sa forme habituelle avec la distribution à *simple tiroir*, soit sous les formes perfectionnées résultant de l'application du *système compound* ou des distributions *genre Corliss*, est susceptible d'un *rendement économique aussi favorable* que les meilleures *machines marines* ou *fixes* ayant les mêmes systèmes de distribution, malgré le bénéfice qui résulte pour celles-ci de l'emploi du condenseur.

A l'égard de ces mêmes machines fonctionnant sans condenseur, la locomotive présente un avantage marqué ;

2° La *dépense en eau d'une locomotive à simple tiroir, dans des conditions favorables de régulation et de régime*, peut s'abaisser au-dessous de 11,0 litres (entraînements compris) ou 10^{kg},5 de *vapeur sèche* par cheval effectif et par heure. Une consommation de 10^l,5 d'eau ou de 10^{kg},0 de *vapeur sèche*, peut être considérée comme la limite correspondant aux conditions les plus parfaites de réglage.

L'emploi du *système compound* (type Nord-Français à quatre cylindres) permet de descendre jusqu'à 10,0 litres de consommation brute, soit 9^{kg},5 de *vapeur sèche* par cheval effectif et par heure.

L'emploi d'une distribution *genre Corliss* (type Bonnefond — État Français) a conduit à des résultats économiques exactement équivalents : 10^l,0 d'*eau brut* ou 9^{kg},50 de *vapeur sèche* par cheval effectif ;

3° Dans le cas de la locomotive à *distribution ordinaire*, les conditions les plus favorables à l'*économie de consommation* sont les suivantes :

Une pression de régime de 10^{kg},0 environ.

Des *dimensions de cylindres modérées*, permettant de maintenir habituellement en service une *admission d'au moins 20 %*.

Des passages de vapeur ouvrant *largement à l'admission et surtout à l'échappement*.

Une assez grande capacité des *espaces morts* (6 à 8 % à chaque bout de course).

Une *vitesse de rotation assez élevée* sans être excessive (150 à 200 tours par minute).

Dans les conditions habituelles de construction et de réglage de nos locomotives, la consommation effective varie entre $11^{\text{kg}}\cdot 0$ et $12^{\text{kg}}\cdot 0$ quand les conditions de marche comportent un effort assez élevé avec une vitesse modérée.

La dépense s'élève jusqu'à 13^{kg} et exceptionnellement à un chiffre plus fort, quand, par suite des conditions spéciales de la marche et du profil, il est fait usage d'admissions *trop fortes* ou surtout *trop faibles*, ou encore d'un *étranglement excessif* du régulateur.

L'emploi d'admissions trop faibles, ou d'un laminage exagéré de la vapeur, *peut toujours être évité* par la fermeture intermittente du régulateur. Dans ces conditions, la dépense d'une machine en bon état de service pourra toujours être maintenue *au-dessous de* $12^{\text{kg}}\cdot 0$ (sauf le cas exceptionnel de très fortes rampes ou d'une vitesse tout à fait forcée);

4° L'application du *système compound* semble comporter, comme condition d'un emploi réellement avantageux, une *pression* de régime élevée (12 à 14^{kg}): elle demande des passages de vapeur *largement* ouverts et de *grands volumes* d'espaces *morts*. Sous cette condition elle permet de pousser la détente absolue plus loin qu'avec la distribution ordinaire. L'emploi des très grandes détentes donne non pas un surcroît d'économie, mais une perte de rendement plus faible que dans le cas des machines à cylindre unique.

En ce sens, on peut dire que la distribution compound donne à la machine plus de souplesse pour se prêter aux variations de la charge et du profil.

Une *vitesse* trop élevée fait apparaître, comme dans le cas de la distribution ordinaire, une perte de rendement par l'exagération des compressions;

5° Les distributions à *tiroirs multiples* permettent d'utiliser avec avantage des pressions s'élevant jusqu'à 12 ou 14^{kg} , mais sans que l'emploi d'une très haute pression soit une condition essentielle de leur régime.

De même que le système compound, elles permettent d'accroître notablement le degré de détente sans qu'il en résulte une perte sensible du rendement.

Grâce à l'indépendance de l'échappement, elles ne sont pas assujetties, comme les machines à distributions liées, à des compressions exagérées dans la marche à grande vitesse.

Elles semblent appelées, pour ce motif, à réaliser le *maximum d'économie de consommation* dans le service des trains *très rapides*.

ANNEXE A.

Calcul détaillé du travail effectif et du rendement d'une machine locomotive, par la méthode des accélérations.

(Emploi du chronomètre et du pendule dynamométrique) (1).

Train N° 84 du 12 Février 1894.

Parcours de Chartres à Versailles (70^{km.},4).

1° **Emploi des observations chronométriques.**

On sait que la méthode chronométrique consiste à observer la loi cinématique du mouvement, en enregistrant les intervalles des *temps* correspondant au passage du système mobile en face de repères situés à des *intervalles connus* et suffisamment rapprochés.

Pour un train de Chemin de fer, les parties du parcours effectuées à régulateur fermé donnent, par le calcul des *variations de vitesses* combinées avec les valeurs de la *déclivité*, la mesure de la *résistance* propre du train pour les vitesses considérées : $r = f(v)$. De cette relation se déduisent les valeurs de l'effort résistant pour le parcours entier du train, et finalement la valeur du *travail de traction* proprement dit. — A ce travail il faut ajouter : 1° l'équivalent de la force vive amortie par les freins aux différents arrêts ou ralentissements ; 2° le travail de la gravité, égal au produit du poids du train par la différence de niveau entre les points extrêmes du parcours.

La somme algébrique des travaux ainsi calculés exprime le *travail effectif* total développé par la machine.

1° OBSERVATIONS DES ESPACES PARCOURUS EN FONCTION DU TEMPS. — Pour la constatation des vitesses en pleine marche (et sauf le cas où il existerait des variations de profil très brusques), on peut prendre comme repères les poteaux kilométriques qui existent sur toutes les lignes et qui sont, en général, correctement placés. L'inscription des temps peut se faire, soit sur le cadran d'un chronomètre à pointage (2), soit sur une bande de papier déroulée par un mouvement d'horlogerie (3). Cette dernière méthode permet l'inscription successive d'un grand nombre de points,

(1) Voir dans la *Revue générale* différents articles de M. Desdoutis sur ce sujet. — N°s d'Octobre 1883, Mars 1884, Mai et Juin 1890.

(2) Tel que le compteur chronographe de M. Paul Garnier.

(3) Disposition appliquée par M. Paul Garnier dans la construction du pendule dynamométrique. — L'appareil chronométrique, démontable et de dimensions réduites, peut être employé isolément.

sans confusion possible entre eux. La lecture en est faite après l'opération terminée, avec tout le soin voulu.

Dans les démarrages et les arrêts, de même qu'aux points de la ligne où il existerait des variations brusques de profil, il convient de rapprocher davantage les mesures en prenant comme repères soit les poteaux hectométriques, soit les tours de roues de la machine, soit les joints des rails.

Voici les observations faites au train 84 du 12 Février 1894. (Parcours de Chartres à Versailles).

KILOMÉTRAGE.	Intervalle de temps écoulé entre deux repères consécutifs.	KILOMÉTRAGE.	Intervalle de temps écoulé entre deux repères consécutifs.	KILOMÉTRAGE.	Intervalle de temps écoulé entre deux repères consécutifs.	KILOMÉTRAGE.	Intervalle de temps écoulé entre deux repères consécutifs.
Chartres, Km. 87,1 (départ)	36''	Km. 69,»	50''	Km. 52,»	60''	Km. 34,»	58''
87,»	27	68,2	28	51,»	78	33,»	54
86,8	60	Maintenon	68,»	50,»	84	32,»	58
86,»	60	(arrêt)	67,8	49,»	100	31,»	60
85,»	60		67,6	48,»	42	30,»	58
84,»	54		67,»	Rambouillet	66	29,»	58
83,»	50		66,»	(arrêt)	32	28,»	66
82,»	48		65,»	47,»	38	27,»	67
81,»	48		64,»	46,»	72	26,»	66
80,»	48		63,»	45,»	62	25,»	63
79,»	54		62,»	44,»	60	24,»	63
78,»	56		61,»	43,»	60	23,»	72
77,»	60		60,»	42,»	66	22,»	80
76,»	60		59,»	41,»	68	21,»	90
75,»	56		58,»	40,»	65	20,»	72
74,»	54		57,»	39,»	60	19,»	80
73,»	60		56,»	38,»	58	18,»	80
72,»	60		55,»	37,»	60	17,»	35
71,»	60		54,»	36,»	66	Versailles	
70,»	48		53,»	35,»	66	(arrêt)	16,6
69,»	52		52,»	34,»	60		

Des chiffres de ce tableau se déduisent les valeurs de la vitesse kilométrique moyenne, valeurs que nous représentons graphiquement en les portant en ordonnées, les distances étant prises pour abscisses (Pl. XXXVI. - Fig. 1. Tracé A. —) (1).

2° MESURE DE LA RÉSISTANCE PROPRE DU TRAIN. — La mesure des résistances a été déduite d'observations faites sur le même train, dans la pente de 4^m/m par mètre qui existe entre les kilom. 12 et 4 (Viroflay-Vanves-Malakoff).

(1) La ligne représentative des vitesses successives n'est pas, en réalité, continue. Elle présente des *brisures* aux points où il existe un changement de profil, comme à ceux où l'on a fait varier l'admission de vapeur. Le diagramme obtenu par le *pendule dynamométrique* permet, comme on le verra, une détermination rigoureuse de cette loi discontinue. Mais, pour l'objet qui nous occupe, la connaissance des vitesses kilométriques moyennes est suffisante.

Le tableau suivant donne, en regard des intervalles de temps observés (1), les valeurs correspondantes de la vitesse moyenne.

Pente continue de 4 m/m par mètre	Kilom.	Intervalle de temps écoulé entre deux repères kilométriques.	Vitesse moyenne (en mètres).
}	12	50",4	19 ^m ,8
	— 11	57,0	17,5
	— 10	65,4	15,3
	— 9	69,6	14,4
	— 8	79,2	12,7
	— 7	86,4	11,6
	— 6	91,2	10,9
	— 5	98,4	10,2
	— 4		

En construisant la courbe qui a pour abscisses les valeurs du temps et pour ordonnées les vitesses correspondantes (Pl. XXXVI, Fig. 2 et 3) on obtient, par le tracé des tangentes (ou plus simplement par la mesure des variations d'ordonnées correspondant aux divers intervalles de temps) les valeurs successives de l'accélération en fonction de la vitesse.

On sait que, pour tenir compte de l'excès de force vive des *parties tournantes*, la valeur observée de l'accélération doit être affectée d'un coefficient plus grand que l'unité ; dans les conditions de construction du matériel actuel, machines et véhicules, ce coefficient peut être évalué à 1.08.

Si W_v est la valeur de l'accélération observée pour une certaine vitesse v , l'effort qui a déterminé cette accélération (négative dans le cas actuel) s'exprimera en fonction du poids du train par $\frac{1.08.W_v}{g}$; cet effort ajouté à la composante de la pesanteur, exprimera la résistance du train par unité de tonnage pour la vitesse considérée.

Portons en ordonnées, sur la fig. 1, Pl. XXXVI, pour les diverses valeurs de la vitesse, les valeurs correspondantes de la résistance, nous obtenons un graphique (tracé B -----) dont la quadrature nous donnera la valeur du travail total de traction, par tonne de poids brut : $\int r dl = L R_1$.

La valeur de la résistance moyenne R_1 déduite de ce calcul est : 7^{kg},1 par tonne.

La valeur du travail de traction sera : 70^{km},4 × 7^{kg},1 = 499,8 tonnes mètres

D'autre part, le poids P du train a été évalué ainsi qu'il suit :

1 locomotive en ordre de marche.....	38 ^T .
1 tender (le poids de l'eau compté à moitié parcouru)....	20
6 voitures et fourgons	58
60 voyageurs.....	5
Bagages, bouillottes.....	2
	P = 123 ^T .

(1) A cause de la grande longueur de la base d'opération, on a pu se contenter ici d'observer, comme pour le reste du parcours, le passage des poteaux kilométriques. Lorsqu'on ne dispose pour la même expérience que d'une faible longueur de pente continue, deux ou trois kilomètres par exemple, il est nécessaire de faire usage de points de repères plus rapprochés. On devra, en outre, dans ce cas, répéter l'opération plusieurs fois, à des vitesses moyennes différentes, pour avoir les valeurs de l'accélération correspondant à ces vitesses.

Le travail de traction pour le train entier est donc : $T_1 = 499^{Tm},8 \times 123 = 61.475^{Tm}$.

TRAVAIL DE LA GRAVITÉ. — L'altitude du point de départ (Chartres) est supérieure à celle du point d'arrivée (Versailles) de : $H = 12^m$. Le travail correspondant, qui vient en déduction du travail de traction, a pour valeur :

$$T_2 = P \times H = 1476^{Tm}.$$

TRAVAIL AMORTI PAR LES FREINS. — La $\frac{1}{2}$ force vive amortie par les freins a été :

$$\text{à Maintenon ; } (V_1 = 11^m,0); \frac{1}{2} \frac{P}{g} (11^2) = 758^{Tm}$$

$$\text{à Rambouillet ; } (V_2 = 9^m,0); \frac{1}{2} \frac{P}{g} (9^2) = 507$$

$$\text{à Versailles ; } (V_3 = 12^m,0); \frac{1}{2} \frac{P}{g} (12^2) = 902$$

On a donc pour le travail des freins : $T_3 \dots\dots\dots = 2,167^{Tm}$

La valeur du travail effectif total développé par la machine entre les points extrêmes du parcours est : $T_1 - T_2 + T_3 = 62,166^{Tm}$, soit $230^{Ch.H.}$.

D'autre part, on a relevé pour la consommation d'eau les chiffres suivants :

Au tender, $60^c/m$, à $0^{m^3},055$ par $^c/m$, soit =	3,300 ^l .
A la chaudière, - $3^c/m$ à $0^{m^3},050$ par $^c/m$, soit =	— 150
	<hr style="width: 100%;"/>
Consommation effective =	3,150 ^l .
Quantité à défalquer pour le petit cheval =	— 130
— pour l'amorçage du giffard =	— 80
	<hr style="width: 100%;"/>

La quantité d'eau dépensée pour la production du travail = 2,940

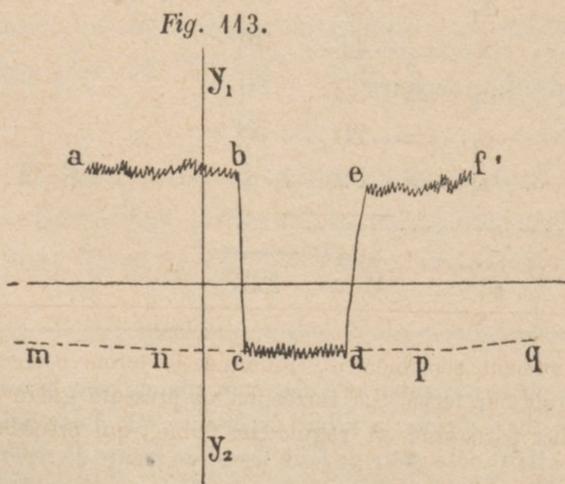
La dépense par cheval effectif et par heure ressort à :

$$\frac{2940}{230} = 12^l,7$$

2° Emploi du pendule dynamométrique.

On sait que le pendule dynamométrique, placé à l'intérieur du train, dans le sens de la marche, accuse, par son écart angulaire, la *résultante* des efforts appliqués au système mobile, en d'autres

termes l'excès de l'effort développé par la machine, sur la *résistance propre* du train (l'action éventuelle de la pesanteur dans les déclivités se trouvant éliminée par l'inclinaison même que prend le plan de pose de l'appareil).



Si a, b, c, d, e, f (Fig. 113) est le diagramme tracé par le pendule ; si d'autre part on a tracé par rapport au même axe et dans la direction des ordonnées négatives, la courbe des *efforts résistants* m, n, \dots, p, q , la portion d'une ordonnée quelconque y_1, y_2 , comprise entre les deux lignes de la figure, représente la valeur

totale de l'effort moteur au point considéré du parcours.

La courbe des *efforts résistants* a pour amorce les portions du diagramme du pendule qui correspondent aux parcours à régulateur fermé. On construira cette courbe par points, pour le parcours entier, les valeurs de la résistance étant déterminées par celles de la vitesse.

La détermination des vitesses peut être faite, en principe, au moyen du diagramme lui-même, (le profil en long étant connu), sans qu'il y ait obligation de prendre des points de repère sur la ligne. Ce mode d'opérer comporte même des résultats très précis : mais l'application en est minutieuse. Il est préférable, pour une opération courante, de relever et d'enregistrer sur le diagramme lui-même les passages des poteaux kilométriques : on arrive ainsi rapidement à la détermination des vitesses moyennes, d'où on déduira la courbe des résistances.

La mesure des accélérations positives ou négatives relevées sur le diagramme du pendule, comporte, comme on le sait, une légère correction, pour tenir compte de l'inertie des parties tournantes. Le coefficient de correction peut être évalué, comme il a été dit plus haut, à 1,08; mais ce chiffre est applicable seulement aux parties du parcours effectuées en palier. Dans les parties en pente ou en rampe, l'accélération réelle diffère de celle qui est mesurée sur le diagramme d'une quantité égale à la composante de la pesanteur; c'est donc seulement à la différence entre ces deux termes que doit être appliquée la correction (1).

Pour la détermination du *travail* effectif, les efforts moteurs doivent être rapportés non au *temps*, comme ils le sont dans le diagramme fourni directement par le pendule, mais à l'espace parcouru.

Nous reproduisons, pour le train 84 du 12 Février, déjà pris comme exemple pour l'application de la méthode chronométrique : (Pl. XXXVI, Fig. 4 et 5).

1° Le diagramme original donnant la loi des accélérations apparentes en fonction du temps (2);

2° Le diagramme transformé qui a pour abscisses les espaces parcourus et sur lequel on a également figuré la courbe des résistances (cette courbe est la même qu'on a eu déjà à considérer dans l'application de la première méthode.

La correction des parties tournantes est indiquée par le trait pointillé (.....) superposé au tracé plein du diagramme.

Le travail moteur total est mesuré par l'aire A, comprise entre la ligne des efforts moteurs — tracé du pendule (corrigé) — et la ligne des résistances. Cette aire est décomposable en un certain nombre d'aires partielles, dont chacune peut être mesurée au planimètre ou par tout autre procédé de quadrature.

On a obtenu (au moyen du planimètre d'Amsler) les mesures suivantes) :

Aire a_1 = 79 Tm		<i>report..</i> 303 Tm
a_2 = 25		Aire a_6 = 64
a_3 = 32		a_7 = 32
a_4 = 51		a_8 = 41
a_5 = 116		a_9 = 32
<u>à reporter.. 303Tm</u>		a_{10} = 20
		a_{11} = 02
Aire totale A =		<u>494Tm</u>

(1) C'est ainsi que dans une rampe parcourue d'un mouvement sensiblement uniforme, le terme correctif s'annule : de même pour une pente de 6 à 8 m/m descendue à régulateur fermé. La correction ne présente guère de valeur appréciable que pour les démarrages ou parties en palier parcourues à régulateur fermé, qui précèdent d'ordinaire les arrêts.

(2) Afin de réduire les dimensions de la figure, on a seulement ramené à moitié l'échelle des abscisses.

Le poids du train étant de 123^T , le travail effectif total ressort à $123 \times 494 = 60.762^{Tm},0$.

On a trouvé, par la méthode chronométrique, pour expression du même travail : $62,166^{Tm}$.

Les deux procédés de mesure comportant sensiblement la même approximation, il convient d'adopter la moyenne des deux chiffres, soit 61.464^{Tm} .

La consommation d'eau, par cheval et par heure, pour le train considéré, ressort finalement à :

$$\frac{2940}{227.6} = 12^1,9.$$

Fig.1. Emploi des observations chronométriques

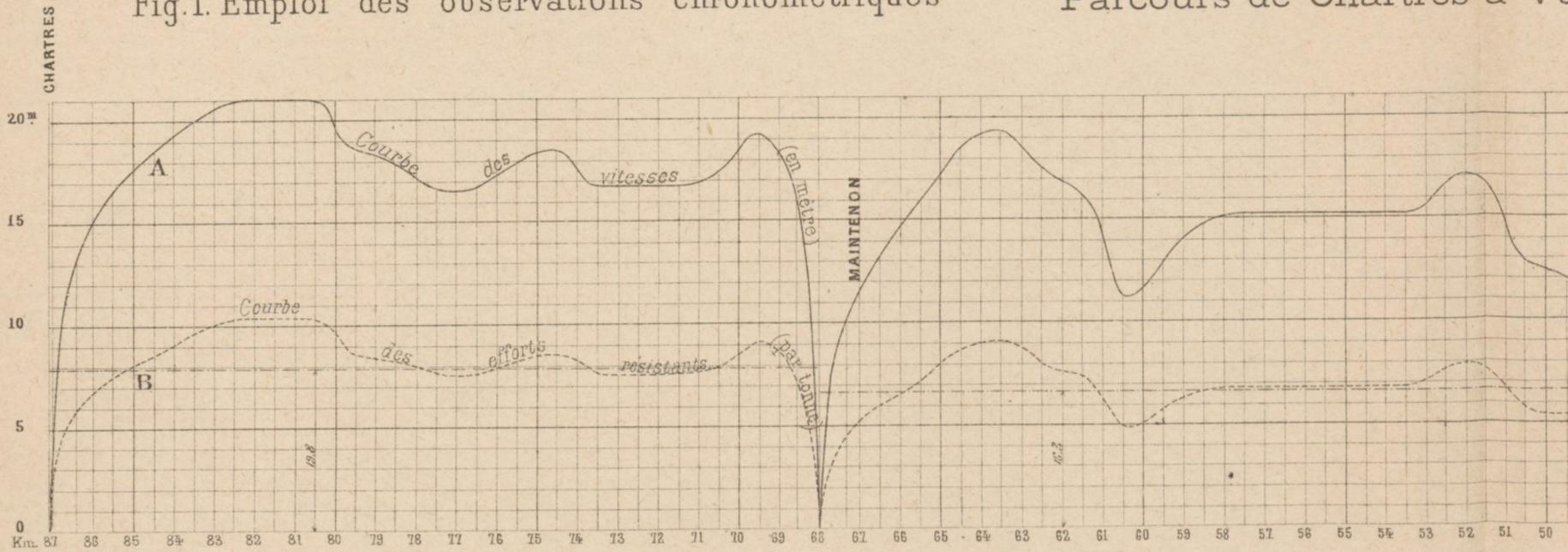


Fig.2. Observation des vitesses décroissantes sur une pente de 4^m/_m (K.13-K.14)

Echelle des vitesses: 5^m/_m p. m.
— d° — des temps: 10^m/_m p. 100 secondes

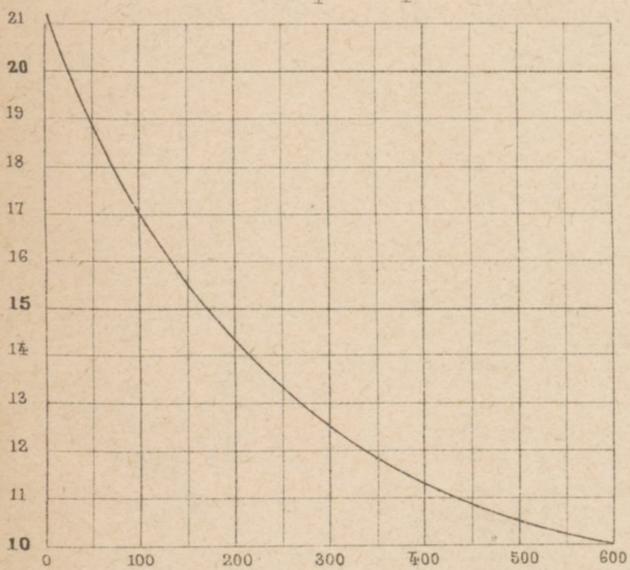


Fig.3. Valeurs de l'accélération (négative) en fonction de la vitesse.

Echelle des vitesses: 5^m/_m p. m.
— d° — des accélérations: grandeur

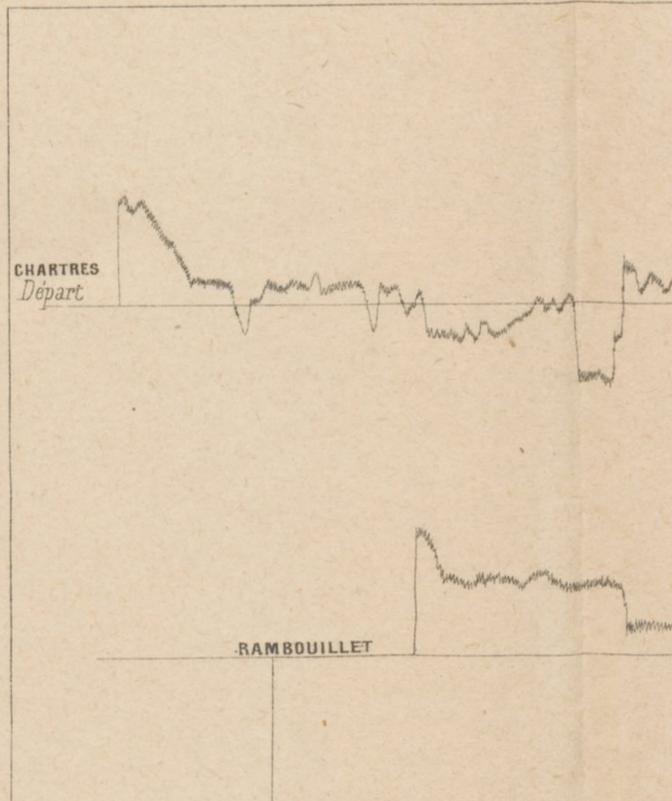
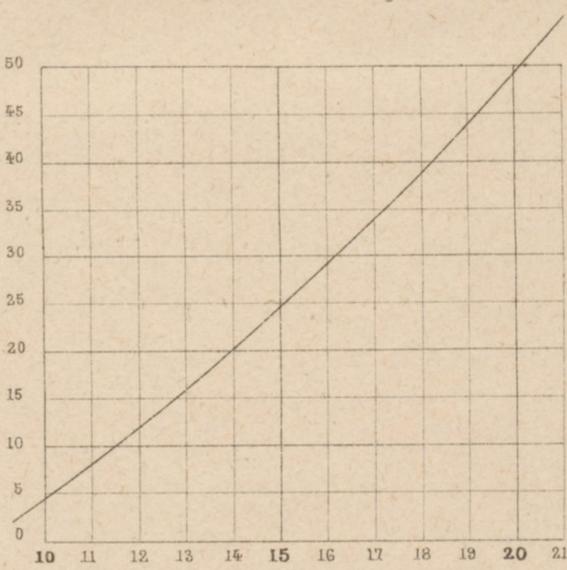
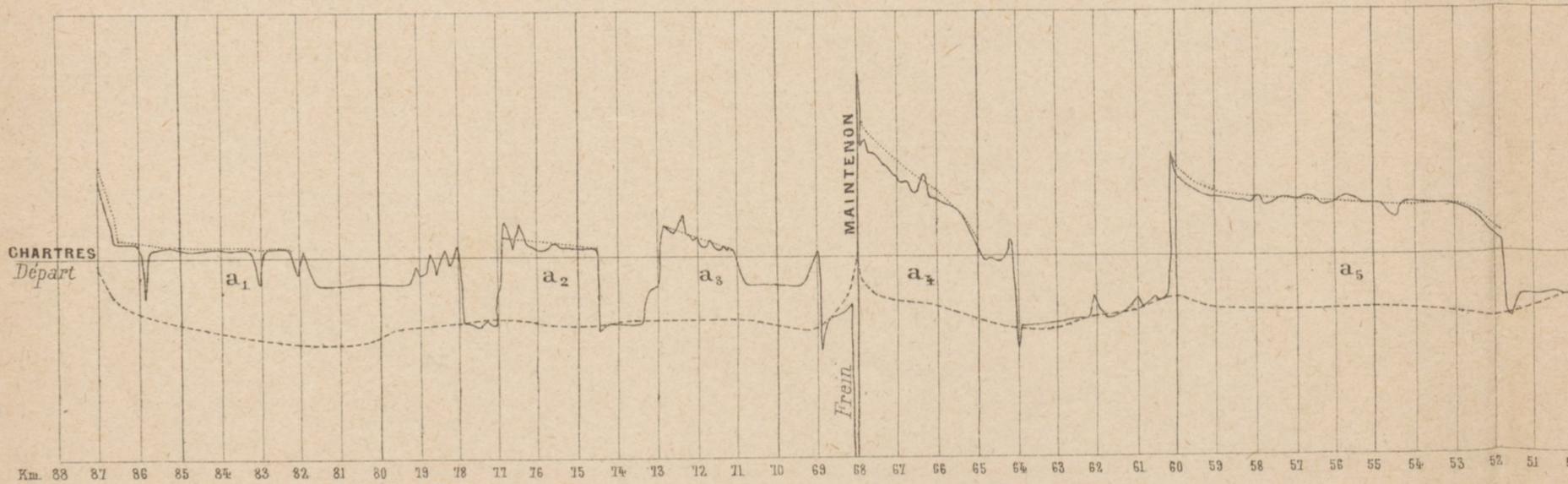


Fig.5. Diagramme transformé avec les

Diagramme du travail effectif
Echelle des espaces 5^m/_m p. Km
— d° — des efforts 1^m/_m p. 1/1000



LE 12 FÉVRIER 1894

Paris à Versailles (70 kil. 4)

Echelles $\left\{ \begin{array}{l} \text{Espaces : } 5^{\text{mm}} \text{ pour } 1 \text{ Km.} \\ \text{Vitesses : } 2^{\text{mm}} 5 \text{ pour } 1^{\text{m}} \\ \text{Résistances : } 2^{\text{mm}} 5 \text{ pour } 1/1000 \text{ du poids} \end{array} \right.$

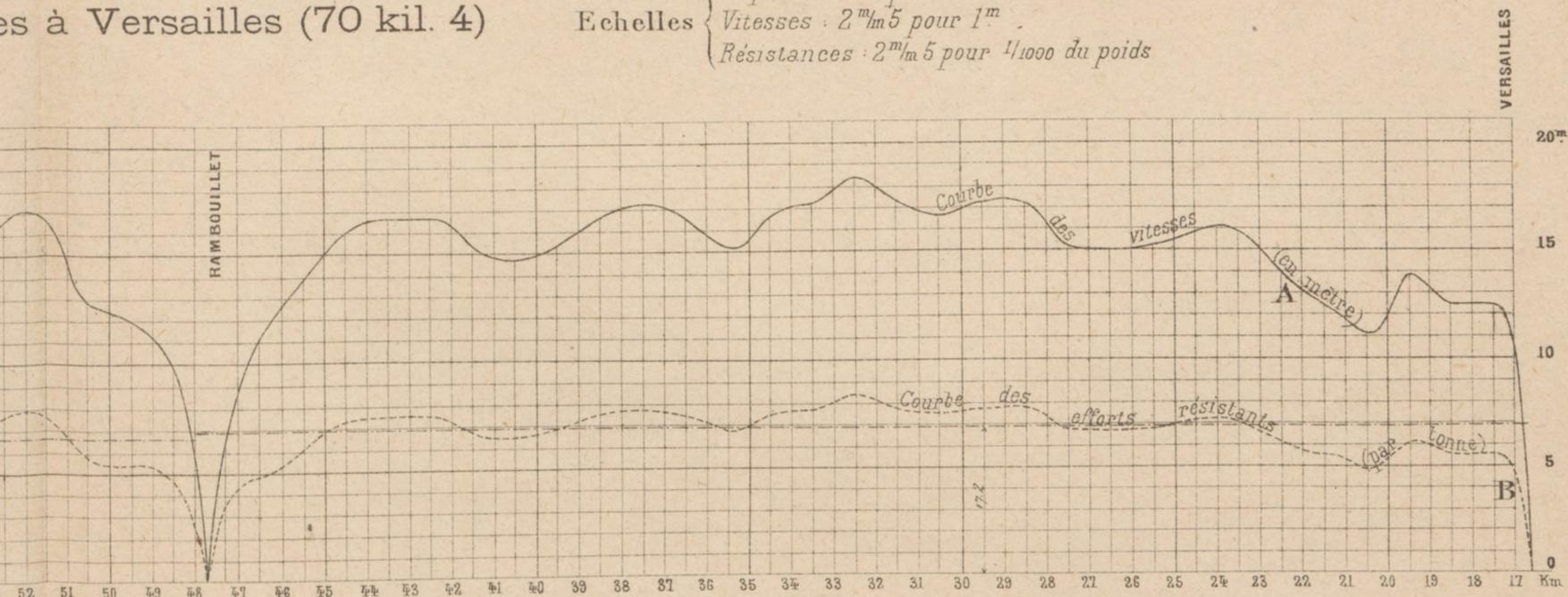
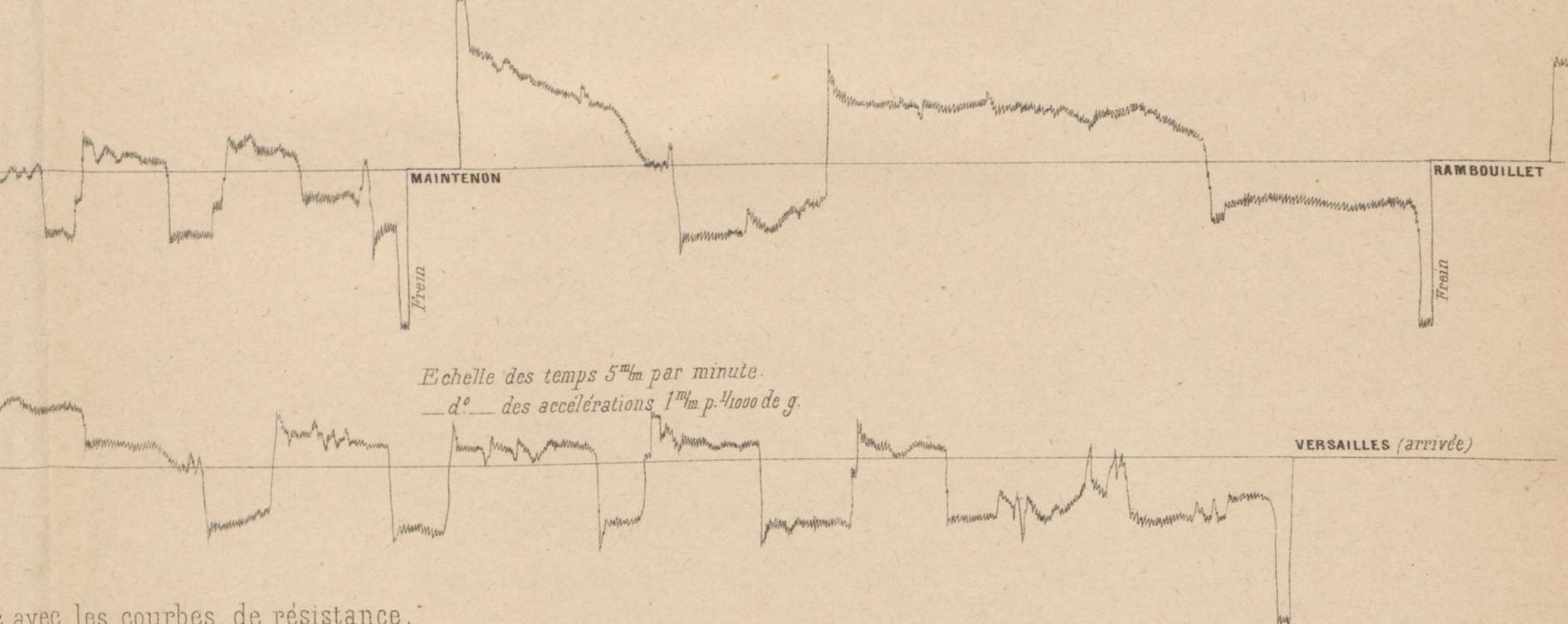


Fig. 4. Emploi du pendule dynamométrique

Diagramme original



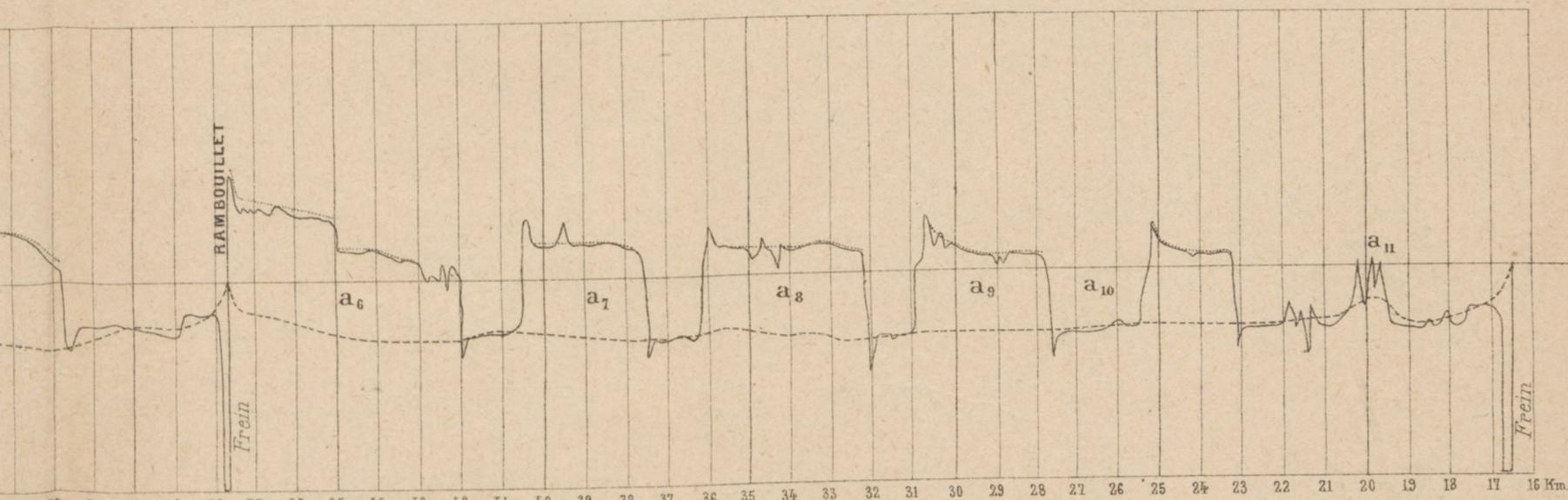
Echelle des temps 5^{mm} par minute.
— d° — des accélérations 1^{mm} p. $1/1000$ de g.

avec les courbes de résistance.

travail effectif.

ces 5^{mm} p. Km.

1^{mm} p. $1/1000$ du poids du train



(9516)