

NOTE

SUR LES

NOUVELLES MACHINES D'EXPRESS

à simple expansion et à tiroirs cylindriques des Chemins de Fer de l'État

RÉSULTATS OBTENUS EN SERVICE.
COMPARAISON AVEC LES MACHINES COMPOUND

Par M. DESDOUITS,

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

—————
(Pl. IX à XIII).
—————

PREMIÈRE PARTIE.

DESCRIPTION DES MACHINES.

Les Chemins de fer de l'État ont fait en 1897 et 1898 l'acquisition de 10 machines puissantes destinées à renforcer le service des trains express lourdement chargés et des trains rapides.

Six de ces machines, commandées à la Société Alsacienne de constructions mécaniques, sont la reproduction exacte des locomotives compound à quatre cylindres de la Compagnie du Nord (série 2100). Les quatre autres machines, construites par l'usine du Creusot, sont à simple détente et ont reçu la distribution par *tiroirs cylindriques*, système *Ricour*, qui est en usage depuis longtemps aux Chemins de fer de l'État (Voir Pl. IX, X et XI). Les deux séries de locomotives ont des chaudières semblables, avec des pressions de régime de 15 kg et 14 kg.

Le type des machines Nord est universellement connu. Une description complète en a été donnée dans la *Revue Générale* (n^o de juin 1892). Les Chemins de fer de l'État ont bénéficié de l'étude approfondie qui a été faite de ces machines par les ingénieurs de la Compagnie du Nord et de la grande expérience acquise par la Société Alsacienne dans tous les détails de leur construction. Les locomotives de cette série (2701 à 2706) se sont comportées d'une manière

irréprochable dans le service difficile qui leur est imposé sur nos lignes accidentées. Comme puissance, comme souplesse, comme économie de consommation, comme endurance en service, elles ont donné tout ce qu'on était en droit d'attendre d'un type aussi justement réputé.

Les machines de la série Creusot (n° 2751 à 2754) à *simple expansion*, dont il sera spécialement parlé dans cette note, sont dérivées du type ordinaire des locomotives à voyageurs du réseau de l'État, dont elles reproduisent exactement le mécanisme. Les différences essentielles consistent dans l'augmentation de puissance de la chaudière, dans l'élévation du timbre, porté de 9 à 14 kg, ; enfin dans la suspension qui comporte, comme pour les machines Nord, deux essieux accouplés à l'arrière, et à l'avant un truck articulé.

DESCRIPTION
GÉNÉRALE.

Les deux essieux accouplés comprennent entre eux le foyer qui est assez profond. Le bogie, à déplacement latéral, est porté par deux essieux à fusées intérieures. Les cylindres moteurs sont placés extérieurement entre les roues du bogie; les bielles motrices actionnent l'essieu accouplé *N*. Les tiroirs, système *Ricour*, sont placés au-dessus des cylindres, et un peu en saillie à l'extérieur. Le mécanisme de distribution est du système Walschaerts, sans excentrique.

Le foyer est du genre Belpaire; le corps de la chaudière, assez élevé, est garni de tubes à ailettes système Serve. La boîte à fumée est de dimensions modérées, la cheminée courte. Le dôme de vapeur, placé vers le milieu de la longueur de la chaudière est largement proportionné.

FORMES
EXTÉRIEURES.

Les formes extérieures ont été étudiées en vue de réduire, autant qu'il est possible de le faire pratiquement, la résistance opposée par l'air à la marche. A cet effet, le tablier qui règne de chaque côté de la chaudière au-dessus des organes du mouvement se raccorde à l'avant par un plan incliné avec la traverse, dont les dimensions ont été réduites à ce qui est strictement nécessaire pour l'attelage et la fixation des tampons; cette traverse présente en outre une section arrondie.

A l'avant de la boîte à fumée existe un masque en tôle mince dont la forme est celle d'une nappe conique ayant pour directrice la section droite antérieure du corps cylindrique, et qui rencontre le plan incliné suivant une courbe elliptique; ce masque est en deux parties réunies dans le plan diamétral et pouvant se rabattre de part et d'autre de manière à dégager l'accès de la boîte à fumée : celle-ci est fermée à la manière ordinaire par une porte étanche.

La cabine du mécanicien, à laquelle on a donné toute la largeur compatible avec le gabarit, se termine à l'avant par des parois obliques formant une proue ogivale. A l'intérieur de l'abri, il existe à droite et à gauche, entre la paroi latérale et le couvre-roue saillant au-dessus de la plateforme, un espace assez large pour qu'un homme puisse s'y tenir à l'aise. L'espace de droite est occupé par le mécanicien qui a sous la main l'appareil de changement de marche, ainsi que le levier du régulateur, reporté latéralement au moyen d'un parallélogramme articulé; du côté gauche on a pu placer, en même temps qu'un injecteur horizontal, la pompe du frein. La partie milieu de la plateforme, entre les deux couvre-roues, est entièrement libre pour le chauffeur. A l'avant de l'abri, sont percées deux ouvertures vitrées, dont l'une est une simple fenêtre, l'autre une porte complète, permettant de passer de plain-pied sur le tablier pour visiter les pièces du mouvement; l'addition d'une main courante extérieure donne toute facilité pour cette opération.

L'aspect général résultant des formes adoptées pour l'avant de la machine et pour l'abri du mécanicien (1) peut prêter à discussion au point de vue esthétique. Dans le tracé de ces formes il a fallu tenir compte de conditions multiples, dont plusieurs assez difficiles à concilier entre elles. Le public, juge dans la question, s'est montré disposé plutôt à l'approbation qu'à la critique.

En dehors de la particularité des formes extérieures, la disposition la plus caractéristique que présentent les machines de cette série, comparées à celles qui sont en usage sur les différents réseaux français, consiste dans l'emploi des *tiroirs cylindriques*.

Nous croyons intéressant d'entrer dans quelques détails sur ce système de distribution, qui, ainsi que nous l'avons dit, est d'une pratique constante et déjà ancienne au réseau de l'État et en faveur duquel un mouvement assez prononcé se manifeste depuis quelque temps en Amérique et dans divers pays d'Europe.

Les tiroirs cylindriques, qui ne sont en réalité qu'une variante du distributeur primitif de Watt (tiroir en D), et qui depuis longtemps sont employés sous des formes diverses dans les machines de navires, n'avaient été l'objet sur les locomotives que de quelques essais isolés, lorsque M. Ricour, vers 1880, entreprit de les introduire dans la pratique des Chemins de Fer. Après des essais qui furent jugés entièrement favorables, M. Ricour n'hésita pas à adopter les tiroirs cylindriques pour la totalité du matériel à créer en vue de l'exploitation du réseau de l'État, nouvellement constitué.

De 1881 à 1885 il a été mis en service sur ce réseau 60 machines à voyageurs, 22 machines mixtes, 40 machines à marchandises puissantes, 10 machines légères (locomotives-fourgons) pourvues de tiroirs cylindriques.

Ces machines, qui n'ont cessé depuis leur construction de faire un service très actif, ont accompli à ce jour des parcours variant entre 500.000 et un million de kilomètres, sans qu'aucune modification, même de détail, ait dû être apportée ou paraisse devoir être apportée au type de distribution créé par M. Ricour.

La description détaillée des tiroirs cylindriques et l'exposé des avantages pratiques attendus de leur emploi ont fait l'objet d'un mémoire inséré en 1884 aux *Annales des Ponts et Chaussées et des Mines* (Annales des Mines, tome 6; Annales des Ponts et Chaussées, Avril). Une analyse de ce mémoire a été donnée dans le N° d'Octobre 1886 de la *Revue Générale*.

Nous croyons devoir reproduire dans son texte même la description donnée par M. Ricour, qui demeure applicable de tous points à la construction de nos plus récentes machines. Cette description, par les détails minutieux qu'elle renferme, peut, au premier abord, donner l'impression d'un organisme délicat dans sa construction et son montage : l'expérience a répondu à cette préoccupation et montré le caractère absolument pratique du système de distribution proposé.

L'ensemble des dispositions adoptées par M. Ricour a pour objet essentiel de « réaliser « l'étanchéité dans la marche avec régulateur ouvert » et en même temps de « supprimer tout « frottement pendant la marche avec régulateur fermé, en empêchant le contact des segments

(1) On indiquera dans la 2^e partie de cette note l'importance du résultat économique obtenu par l'adoption de ces formes.

« des pistons avec les parois du cylindre, par une disposition analogue à celle de la suspension
« des tiroirs plans au-dessus de leur table.

« Le piston distributeur formant tiroir se compose de trois parties principales, savoir :

- « Une souche mâle (Fig. 6, Pl. XII).
- « Une souche femelle (Fig. 4, Pl. XII).
- « Un segment (Fig. 3, Pl. XII).

« Les deux souches s'emboîtent l'une dans l'autre pour former le corps du piston (Fig. 1).

« *Segment.* — Le segment est une lame cylindrique portant sur sa surface extérieure trois
« rainures *h. h. h.* (Fig. 3), les rainures facilitent le graissage: elles permettent à la contrepres-
« sion dans le cylindre de se transmettre sur tout le pourtour du segment dans la marche avec
« régulateur fermé, enfin elles concourent à rendre plus complète l'étanchéité dans la marche
« avec régulateur ouvert. A l'intérieur du segment se trouve une nervure mince, à faces parfait-
« tement dressées. Cette nervure que l'on voit en *n* (Fig. 3) doit pouvoir coulisser librement
« entre les deux souches du corps de piston, comme cela est indiqué (Fig. 1 partie coupée).

« Les extrémités du segment forment un joint croisé représenté sur la fig. 3 en *ab, cd* ;
« les ouvertures *ab, cd*, permettent au segment de se fermer lorsqu'il supporte une pression
« sur sa surface extérieure.

« Les Fig. 1, 2, 3, 4, 6 font comprendre la disposition des deux souches formant le corps du
« piston.

« *Assemblage et fonctionnement des diverses parties du piston* (Pl. XII fig. 1 à 9). — Lorsque
« les deux souches sont emboîtées l'une dans l'autre et serrées à bloc sur la tige du tiroir *W*,
« il reste entre elles un évidement juste suffisant pour recevoir la nervure *n* appuyée d'une part
« contre la souche mâle *m* et maintenue d'autre part par le rebord de la souche femelle *f*: c'est
« là qu'est le joint empêchant toute fuite de vapeur vers la tige.

« Pour empêcher le segment de prendre un mouvement de rotation autour de son axe, il a
« suffi de le munir d'un ergot ou taquet d'arrêt à tête carrée, vissé dans l'épaisseur du segment,
« ou venu de fonte avec le segment. Cet ergot est dessiné sur la Fig. 3 (Pl. XII).

« Les dispositions suivantes ont été adoptées en vue de maintenir le segment bien centré par
« rapport à l'axe du cylindre distributeur. Le couvre-joint *s* (Pl. XII Fig. VII) qui empêche la
« vapeur de s'échapper par l'ouverture *cd* du segment est logé dans une chambre rectangulaire
« découpée sur la souche femelle. Le couvre-joint *s* glisse très librement dans cette chambre
« (Fig. 1 et 2); il est appuyé contre l'ouverture qu'il doit obturer par un petit ressort à boudin *r*. . . .

« Outre la chambre rectangulaire dans laquelle est logé le couvre-joint *s*, la souche femelle
« porte deux trous cylindriques, dans lesquels glissent les chapeaux *c* (Pl. XII Fig. 8) qui servent
« à guider deux ressorts à boudin *r' r''*. La coupe de ces deux trous cylindriques avec les
« chapeaux *c* et les ressorts *r' r''* mise en place est donnée par la Fig. 2, Pl. XII.

« Le couvre-joint *s* et l'ergot *E* se trouvent aux extrémités d'un même diamètre *XY* du
« segment. Ce diamètre prolongé passe par l'axe du cylindre moteur comme cela est indiqué
« sur la Fig. 2, Pl. XII.

« L'axe du ressort r' couvert par le chapeau c forme avec la verticale le même angle que
« l'axe du ressort r du couvre-joint s . Enfin le troisième ressort r'' a son axe sur la verticale
« passant par le centre du piston.

« Les deux ressorts rr' ont la même tension ; le troisième ressort r'' est réglé de manière à
« centrer exactement le segment.

« Le segment équilibré par les trois ressorts $rr'r''$ est concentrique avec le cylindre dans
« lequel il se meut, et comme il a un diamètre d un peu plus petit que le diamètre D de ce cylindre,
« il ne touche la paroi en aucun point.

« Les trois ressorts $rr'r''$ sont comparables à trois petits tampons ne donnant aucune bande
« appréciable au segment, tout en le maintenant rigoureusement centré. Les petits tampons
« se contractent lorsqu'une pression extérieure s'exerce sur le segment, et celui-ci se referme
« alors sur lui-même jusqu'à ce que les lèvres ab, cd de la coupure se touchent.

« Cette propriété importante du segment d'être entièrement libre lorsque le régulateur est
« fermé, ne l'empêche pas d'être parfaitement étanche dès que le régulateur est ouvert.

« En effet, dès que la vapeur arrive dans la boîte à tiroir entre les deux pistons distributeurs,
« elle pénètre dans l'intervalle i laissé libre entre le segment et le corps de chaque piston, et
« elle applique la surface cylindrique du segment contre la paroi du cylindre, en même temps
« qu'elle presse énergiquement la nervure n contre le rebord plan de la souche mâle m ,
« la fermeture produite est analogue à celle d'une soupape appuyée sur son siège ».

Les deux pistons dont l'ensemble forme un même tiroir sont montés sur une tige commune, à l'intérieur d'une capacité cylindrique juxtaposée au cylindre moteur. La distance entre les deux pistons correspond à la longueur même du cylindre moteur, dont les lumières d'admission et d'échappement sont dirigées dans deux plans perpendiculaires à l'axe ; la longueur du conduit parcourue alternativement par les courants d'admission et d'échappement se trouve ainsi réduite autant que possible. Chacun des deux pistons distributeurs est guidé par une fourrure ou *chemise* rapportée à l'intérieur de la capacité cylindrique et exactement centrée. A la partie inférieure de cette chemise s'ouvre un orifice correspondant à la lumière du cylindre moteur et entretoisé par des nervures obliques (Fig. 2) destinées au soutien du segment distributeur.

La vapeur d'admission pénètre dans la boîte à tiroir par sa partie moyenne, entre les deux pistons : l'échappement se fait par les deux extrémités et aboutit à un tuyau collecteur unique.

L'emploi des tiroirs cylindriques a pour effet de réduire dans une forte proportion la capacité totale des *espaces morts*. Cette particularité, qui peut constituer un avantage pour certaines machines à allure lente, n'est pas à rechercher dans le cas de la locomotive, ni généralement des machines à mouvement rapide et à distribution par coulisse. Dans ces machines la présence d'assez grands espaces morts est nécessaire pour éviter qu'il se produise des compressions exagérées aux fonds de course.

Les premières machines à tiroirs cylindriques, construites avec des espaces morts réduits (environ 2 % du volume des cylindres) ont été bientôt reconnues manquer de « liberté » aux grandes vitesses. On a pu remédier en grande partie à ce défaut en supprimant le recouvrement des tiroirs à l'échappement et en employant même un *découvrement* assez prononcé. Mais un résultat beaucoup plus complet a été obtenu en rétablissant une capacité d'espace mort égale ou même un peu supérieure à celle des machines à tiroirs plans : on y est parvenu pour les

machines déjà construites, en substituant aux pistons moteurs à faces parallèles des pistons forgés d'une seule épaisseur, et en augmentant l'écartement des fonds de cylindres au moyen de rondelles rapportées.

SOUAPES
DE
RENTRÉE D'AIR.

Concurremment avec l'emploi des tiroirs cylindriques et comme disposition complémentaire reconnue indispensable, M. Ricour a adapté à ses machines des *souapes de rentrée d'air* implantées sur la conduite d'arrivée de vapeur et dont le mémoire précité (Pl. XII Fig. 2) définit ainsi le fonctionnement :

« Au moment de l'ouverture du régulateur, le clapet *b* de la soupape vient appuyer sur son siège et la machine fonctionne comme si la soupape n'existait pas. Dès que le régulateur est fermé, tout change : pendant la période qui correspond à l'admission, le piston moteur tend à produire le vide derrière lui, mais aussitôt le clapet de la soupape se soulève, livre passage à l'air extérieur ; cet air suit la tubulure *t*, se précipite à l'intérieur de la boîte à tiroir et de là dans le cylindre. Au retour du piston, l'air aspiré précédemment est refoulé dans la tuyère de l'échappement ; la locomotive est transformée en machine soufflante ; il n'y a plus introduction de gaz chauds chargés de cendres ; les pistons, les tiroirs sont baignés dans de l'air frais et pur. Les stries des tiroirs disparaissent ; les glaces prennent un poli miroitant ; tous les frottements deviennent plus doux et l'usure des pièces de la distribution diminue dans une large mesure.

» D'autre part, la basse température maintenue dans les cylindres par le courant d'air frais, place la locomotive dans des conditions au moins aussi avantageuses que les machines de la marine par l'emploi des huiles minérales ».

Le rôle de la soupape de rentrée d'air, dans les machines à tiroirs cylindriques, ne se borne pas à la protection des tiroirs et des cylindres contre l'action nuisible des gaz chauds et de l'échappement. Cet organe agit également pour empêcher la dépression qui, dans la marche à régulateur fermé, tend à se produire derrière le piston pendant la période correspondant à l'admission. Cet effet est évité dans les machines à tiroirs plans par le soulèvement du distributeur. Avec les tiroirs cylindriques, la soupape de rentrée d'air est indispensable pour éviter la production d'un effort résistant qui affecterait notablement la marche à régulateur fermé.

RÉSULTATS
OBTENUS DANS
L'EMPLOI
DES TIROIRS
CYLINDRIQUES.

L'application des tiroirs cylindriques a été faite, ainsi que nous l'avons dit, il y a près de 20 ans à toutes les machines neuves en construction pour le réseau de l'Etat. Parmi celles-ci, la série des locomotives à voyageurs (N^{os} 2069 à 2099 et 2500 à 2528) a été construite sur le modèle d'un groupe de machines de construction un peu antérieure déjà existant sur le réseau, avec cette seule différence que le distributeur cylindrique était substitué aux tiroirs plans.

Les deux séries de machines ont fait concurremment depuis cette époque et font encore aujourd'hui, dans des conditions identiques, le service des trains de voyageurs ordinaires. On s'est trouvé par suite dans les conditions les plus favorables pour comparer entre eux, au point de vue expérimental et pratique, les deux systèmes de distribution.

L'expérience a fait nettement ressortir, en faveur des tiroirs cylindriques, les avantages suivants :

1°. *Augmentation de l'effort de traction.* — L'effort de démarrage, avec l'admission maximum, est supérieur d'environ 10 % à celui que donnent des machines à tiroirs plans, ayant mêmes

proportions des cylindres et des roues motrices et même pression de régime. En outre l'effort maximum peut être maintenu plus longtemps, pendant la période d'accélération du train.

L'augmentation de l'effort moteur en valeur absolue a évidemment pour cause la réduction — on pourrait dire la suppression presque complète — des résistances passives inhérentes au système des tiroirs à coquille. La facilité de soutenir la marche à grande admission, sans entraînement violent du combustible et sans chute de pression brusque, est une conséquence de la disposition des conduits d'échappement qui donnent un tirage moins sec, bien qu'é suffisant pour assurer une très bonne production de la chaudière.

Le bénéfice constaté à l'égard des démarrages existe également et pour les mêmes causes dans la traction des trains lourds sur fortes rampes. Avec une valeur de l'effort théorique $\frac{p d^2 l}{D}$ égale à 6200 kilogs, ces machines soutiennent à la vitesse d'environ 30 kilom. un effort effectif d'environ 5000 kilogs (1), ce qui fait ressortir à plus de 0,80 la valeur du coefficient d'utilisation.

Aux grandes vitesses, avec une admission de vapeur de 25 à 30 % — et à la condition d'avoir un volume suffisant d'espaces morts — ces machines fournissent également un excellent travail de traction. Elles soutiennent sans difficulté, avec des trains de charge modérée, une allure de 90 à 100 kilom.

2° *Facilité de conduite.* — La conduite des machines à tiroirs cylindriques est plus facile que celle des machines à tiroirs plans. La manœuvre du mécanisme de changement de marche exige un effort bien moindre. Même pour les plus puissantes machines à marchandises, le déplacement et le renversement de la marche se font rapidement et avec l'effort d'une seule main.

La conduite du feu est également plus facile, grâce à l'action plus régulière du tirage.

3° *Economie de consommation.* — Un certain nombre de dépôts possèdent à la fois des machines à tiroirs plans et des machines à tiroirs cylindriques et ces machines sont mélangées dans les roulements. Les relevés de comptabilité permettent donc de comparer leur dépense en combustible. On a constaté d'une manière générale, en faveur des tiroirs cylindriques une économie de consommation qui peut être évaluée en moyenne à 2 ou 3 %.

4° *Economie d'entretien.* — Les dépenses d'entretien courant sont notablement diminuées par l'emploi des tiroirs cylindriques; l'usure des tiroirs est nulle (2), celle du mécanisme de commande est très faible. Le personnel des dépôts qui, au début, avait manifesté à l'égard de ce système de distributeurs des préventions assez vives, n'a pas tardé à lui devenir entièrement favorable. L'économie annuelle obtenue sur l'entretien peut être évaluée à deux ou trois cents francs par machine.

Les premières machines à tiroirs cylindriques, construites vers 1880, ont été timbrées à 9 kg, comme les machines à tiroirs plans similaires. Ultérieurement la pression de régime de ces machines a été portée à 10 kg, après réépreuve des chaudières.

(1) Cet effort correspond à 300 T. remorquées en rampe de 10 mm. ou 220 T. en rampe de 15 mm.

(2) Nous avons encore en service, sur une machine, des tiroirs dont les segments datent de la construction, en 1884, et qui ont parcouru, jusqu'à ce jour, 500.000 kil.

En 1882, M. Ricour, prenant une initiative qui, à cette époque, pouvait paraître hardie, adopta pour la construction de 10 petites machines tenders-fourgons, le timbre de 12 kg. Ces machines, d'un type remarquable à tous égards, n'ont cessé de se comporter parfaitement en service : elles ont une dépense d'entretien extrêmement réduite.

Quelques machines à voyageurs anciennes ayant reçu des chaudières neuves ont été également timbrées à 12 kg : les résultats obtenus par cette transformation ont été de tous points favorables.

Lorsque, dans ces dernières années, l'obligation de faire circuler sur les lignes difficiles du réseau de l'Etat des trains express lourdement chargés, et des « rapides » atteignant la vitesse de ceux des grands réseaux, a motivé l'acquisition de machines nouvelles puissantes, nous n'avons pas hésité, en présence des résultats acquis, à proposer pour la distribution de vapeur l'emploi du système Ricour, à *tiroirs cylindriques avec simple expansion*, en adoptant pour le reste de la construction les dispositions devenues en quelque sorte classiques de la machine du Chemin de fer du Nord, et en portant le timbre de la chaudière à 14 kg.

Quatre machines ont été construites sur ces données.

Deux d'entre elles (n^{os} 2751 et 2752) sont entièrement identiques pour le mécanisme moteur et de distribution aux machines du type ordinaire à voyageurs en service depuis 1882. Leurs cylindres moteurs ont 0^m,44 de diamètre et 0^m,65 de course, avec un diamètre des roues motrices de 2^m,03 (Pl. IX, X et XI).

Pour les deux autres machines (n^{os} 2753 et 2754) le diamètre des cylindres a été porté à titre d'expérience à 0^m,46. Ultérieurement ce diamètre a été ramené, pour l'une d'elles, à 0^m,42, par l'addition d'une fourrure.

Les données générales et dimensions caractéristiques de ces locomotives sont réunies dans le tableau ci-contre.

(A suivre).

NOTE

SUR LES

NOUVELLES MACHINES D'EXPRESS

à simple expansion et à tiroirs cylindriques des Chemins de Fer de l'Etat

RÉSULTATS OBTENUS EN SERVICE.
COMPARAISON AVEC LES MACHINES COMPOUND

(Suite). (1)

Par M. DESDOUITS,

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

DEUXIÈME PARTIE.

RÉSULTATS OBTENUS EN SERVICE. EFFORT DE TRACTION.
PUISSANCE. RENDEMENT ÉCONOMIQUE.
COMPARAISON AVEC LES MACHINES COMPOUND.OBSERVATIONS
GÉNÉRALES.

La valeur pratique d'une machine destinée à une certaine nature de service peut être considérée soit au point de vue de la *puissance utile*, c'est-à-dire des conditions de charge et de vitesse qu'elle permet de réaliser, soit au point de vue de la *dépense* moyennant laquelle ces résultats sont obtenus.

Pour une machine destinée à remorquer des trains express ou rapides, à l'égard desquels les exigences du public vont chaque jour en croissant, la considération d'économie passe nécessairement au second rang. Le prix d'acquisition, la dépense même d'entretien ne seront considérés qu'à titre accessoire. Quant à la consommation de combustible, en dehors du grand intérêt qu'elle présente au point de vue économique, elle constitue un des éléments essentiels qui concourent à définir la puissance effective d'une machine donnée.

(1) Voir *Revue Générale*, N^o de Mars 1900.

A ce titre, elle devra toujours être considérée en même temps que les valeurs de l'effort et de la vitesse réalisée.

Si le service d'une locomotive pouvait être rigoureusement spécialisé, comme celui de certains moteurs fixes qui travaillent dans des conditions déterminées d'effort et de vitesse, la valeur de cette machine pourrait être considérée comme entièrement définie par le chiffre de sa dépense en combustible pour les conditions de travail normal : la machine qui dépense le moins pour la même production de travail est évidemment celle qui pourra, le cas échéant, avec le même générateur, fournir le plus grand supplément de puissance, en vue d'une augmentation soit des charges remorquées, soit des vitesses.

Une telle spécialisation n'est pas et ne peut pas être réalisée dans le service des locomotives. En admettant même que des machines distinctes soient affectées à la traction des express lourds et à celle des trains rapides proprement dits, on n'obtiendra pas encore à beaucoup près un régime constant de l'effort et de la vitesse.

Les démarrages, la montée des rampes même modérées, les circonstances accidentelles de mauvais temps ou de surcharge entraînent nécessairement des variations de l'effort à développer et par suite de la vitesse réalisable.

Dans l'appréciation de la valeur d'une machine, ou d'un type de machine donné, il est nécessaire de faire entrer en ligne de compte les conditions variables de régime qui peuvent lui être imposées, en d'autres termes toutes les combinaisons possibles de l'effort de traction et de la vitesse. Il y a là une étude essentiellement complexe, à laquelle on devra appliquer la méthode ordinaire des recherches analytiques.

L'analyse dont il s'agit doit avoir un caractère *purement expérimental* ; les considérations théoriques seront réservées pour la discussion des résultats, s'il y a lieu.

Étude analytique du fonctionnement d'une machine locomotive. — Supposons que la vitesse, par exemple, soit prise comme variable indépendante. On aura à déterminer pour toutes les valeurs de cette variable, depuis zéro jusqu'aux limites extrêmes de la pratique, les valeurs correspondantes de l'effort effectivement réalisé ; cet effort est fonction à la fois des *proportions de l'appareil mécanique* et de la *quantité de vapeur fournie* par la chaudière.

La dépense de vapeur est non mesurée, mais *définie* par la fraction de course des pistons pendant laquelle a lieu l'admission (la chaudière étant toujours supposée à sa pression de régime) : cette dépense est d'ailleurs fonction de la vitesse. Soit :

- v une certaine vitesse de régime ;
- e l'effort de traction correspondant ;
- k la fraction d'introduction aux cylindres ;
- p le poids de vapeur dépensé par tour de roues ;

le fonctionnement d'une machine donnée pourra être considéré comme entièrement défini par la connaissance de deux relations :

$$\text{L'une entre la vitesse, l'effort et la fraction d'admission} \dots \dots \dots f(v, e, k) = 0 \quad (1)$$

$$\text{La deuxième entre la dépense et la fraction d'admission} \dots \dots \dots \varphi(p, k) = 0 \quad (2)$$

$$\text{L'élimination de } k \text{ entre ces deux équations donnera une troisième relation entre la vitesse, l'effort et la dépense} \dots \dots \dots \psi(v, e, p) = 0 \quad (3)$$

La relation (1) peut être considérée comme définissant le fonctionnement *mécanique* de la machine, abstraction faite de sa dépense.

La relation (3) fera connaître les conditions *économiques* de fonctionnement, et déterminera en outre les limites *d'effort* et de *vitesse*, compatibles avec la production du générateur.

Nous considérerons en premier lieu l'équation du fonctionnement mécanique $f(v, p, k) = 0$.
Suivant la méthode générale pour l'étude des fonctions, il faudra donner successivement à l'une des variables une série de valeurs assez rapprochées, entre les limites extrêmes qu'elle comporte, et déterminer pour chacune de ces valeurs, la relation particulière entre les deux autres variables. Dans l'espèce on prendra les fractions d'introduction, par exemple par $1/10^{\text{es}}$ de la course depuis 20 % : et pour chaque admission on aura à déterminer les valeurs de l'effort correspondant dans toute l'échelle des vitesses.

Chacune des relations ainsi trouvées étant représentée graphiquement, on obtiendra un faisceau de courbes groupées suivant une loi géométrique et constituant par leur ensemble une représentation complète du fonctionnement de la machine considérée.

La détermination de l'effort utile e correspondant à une certaine vitesse v de la locomotive, s'obtient avec la plus grande facilité au moyen du pendule dynamométrique.

Nous ne reviendrons pas sur la théorie de cet appareil dont la description et le mode d'emploi ont été donnés dans la *Revue Générale* (Octobre 1883). Nous nous bornerons à rappeler que :
« l'appareil étant placé à l'intérieur d'un véhicule quelconque du train avec le plan d'oscillation »
« du pendule dirigé parallèlement au sens de la marche, le style trace une ligne $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ »
« dont l'ordonnée positive ou négative représente à tout instant, en *fraction du poids du train*, l'excès de l'effort moteur développé par la machine sur la résistance propre du »
« train. Si à un moment quelconque, on supprime l'action de la vapeur, la variation de »
« l'ordonnée ($\beta \gamma$) représentera, à l'échelle de l'instrument, la valeur de l'effort moteur qui »
« vient de disparaître ».

Pour l'étude qui nous occupe, chaque mesure de l'effort correspondant à un certain *degré d'admission*, devra être accompagnée du relevé de la *vitesse* existante à l'instant considéré. Si la machine possède un indicateur de vitesse bien réglé, il suffira de lire la position de l'aiguille au moment où on a fermé le régulateur. — A défaut d'un appareil donnant directement la mesure des vitesses, on se servira de relevés chronométriques obtenus suivant les procédés ordinaires au moyen des repères de la voie. On notera en même temps l'indication du manomètre : s'il existait, à l'instant considéré, une légère différence avec la pression de régime, on opérerait une correction proportionnelle sur la valeur de l'effort enregistré par le pendule.

Enfin, pour traduire en valeurs absolues les mesures de l'effort, on aura dû relever avec soin le poids réel du train affecté à l'expérience (tare et chargement).

La méthode dont nous venons de rappeler le principe est d'une application facile et très rapide. Dans une seule journée, on peut, en se servant même d'un train d'exploitation, déterminer pour une machine donnée toute la série des courbes *d'effort et de vitesse* correspondant aux divers crans d'admission. Les résultats seront contrôlés et au besoin rectifiés d'après la loi de continuité géométrique. On procédera ensuite à quelques mesures de vérification, et on arrivera finalement à une représentation graphique absolument correcte du fonctionnement de la machine considérée.

ÉQUATION
DU
FONCTIONNEMENT
MÉCANIQUE.

MESURE
DE L'EFFORT
EFFECTIF
CORRESPONDANT
À UNE VITESSE
DONNÉE.
EMPLOI
DU PENDULE
DYNAMO-
MÉTRIQUE.

Nous avons fait l'application de cette méthode à nos nouvelles machines d'express *compound* et *non compound*.

Le diagramme N° 1, ci-dessous, représente le fonctionnement de la machine N° 2752, à *simple expansion* munie de cylindres moteurs au diamètre normal de 0^m44 (1).

On a pris comme abscisses les vitesses en kilomètres à l'heure; les ordonnées sont les valeurs de l'effort effectif, en kilogrammes.

Les courbes superposées correspondent aux différentes fractions d'admission, échelonnées par 1/10^{es} de la course, depuis 0,20 jusqu'à 0,70 (2).

Le diagramme II est celui de l'une des machines *compound* type Nord (N° 2.701). Les deux distributions avaient été liées, une fois pour toutes à 40/60, rapport reconnu avantageux dans les essais du Chemin de Fer du Nord (3). Les courbes successives se rapportent aux divers degrés d'admission dans le petit cylindre.

Un examen comparatif sommaire des diagrammes I et II fait ressortir certains caractères communs, en même temps que des différences spécifiques nettement appréciables.

CARACTÈRES
GÉNÉRAUX
DES
DIAGRAMMES.

On constate d'une manière générale que, pour une admission déterminée, la courbe des efforts a une direction initiale à peu près parallèle à l'axe des abscisses et s'infléchit ensuite de plus en plus vers cet axe, qu'elle tend à venir couper sous une certaine obliquité. L'abaissement de la courbe est relativement lent pour les admissions modérées telles que 0,20, 0,30. Il s'exagère à mesure que l'on passe aux admissions élevées 0,40, 0,50 jusqu'au fond de course. Cet abaissement est tel aux grandes vitesses, que les courbes des admissions supérieures viennent couper celles des admissions inférieures. Par exemple, sur le diagramme N° I, à la vitesse de 80 kilom., l'effort de la 6^e division (admission 0,60) est devenu moindre que celui de la 5^e (admission 0,50); l'effort de la 7^e division est encore plus réduit. On voit clairement que dans ces conditions l'emploi des admissions élevées doit être absolument exclu, puisqu'elles donnent, avec une dépense et une fatigue de la machine plus grandes, un effort de traction *plus faible* que les admissions modérées. C'est un fait dont la constatation n'échappe pas à l'instinct d'un mécanicien habile: mais les indications du diagramme viennent le préciser d'une manière très utile.

Si on compare à ce point de vue les diagrammes N° I et N° II on reconnaît que *l'abaissement des courbes supérieures, aux grandes vitesses est notablement plus prononcé pour la machine compound que pour la machine à simple expansion*. C'est là un caractère spécifique fort important dont nous aurons par la suite à faire ressortir la portée.

COURBE
DES
EFFORTS MAXIMA.

Soit que les courbes des différentes admissions s'échelonnent les unes au-dessus des autres jusqu'à l'introduction maximum, comme il arrive dans toute la région des vitesses modérées; soit qu'elles viennent à se couper entre elles, comme nous le constatons aux grandes vitesses, il existe toujours, pour leur ensemble, une courbe enveloppe qui définit, en fonction de la

(1) On donnera plus loin la comparaison de cette machine avec deux autres de la même série ayant respectivement des diamètres de cylindres de 0^m46 et 0^m42 (Annexe A).

(2) Les fractions d'admission sont données à titre de simples indications. On ne s'est pas attaché à une mesure rigoureuse, difficile à obtenir et qui serait d'ailleurs sans objet immédiat.

(3) Voir l'étude de M. l'Ingénieur Barbier (*Revue Générale*, n° de Juillet 1898)

DIAGRAMME I. — MACHINE 2752 A SIMPLE EXPANSION.

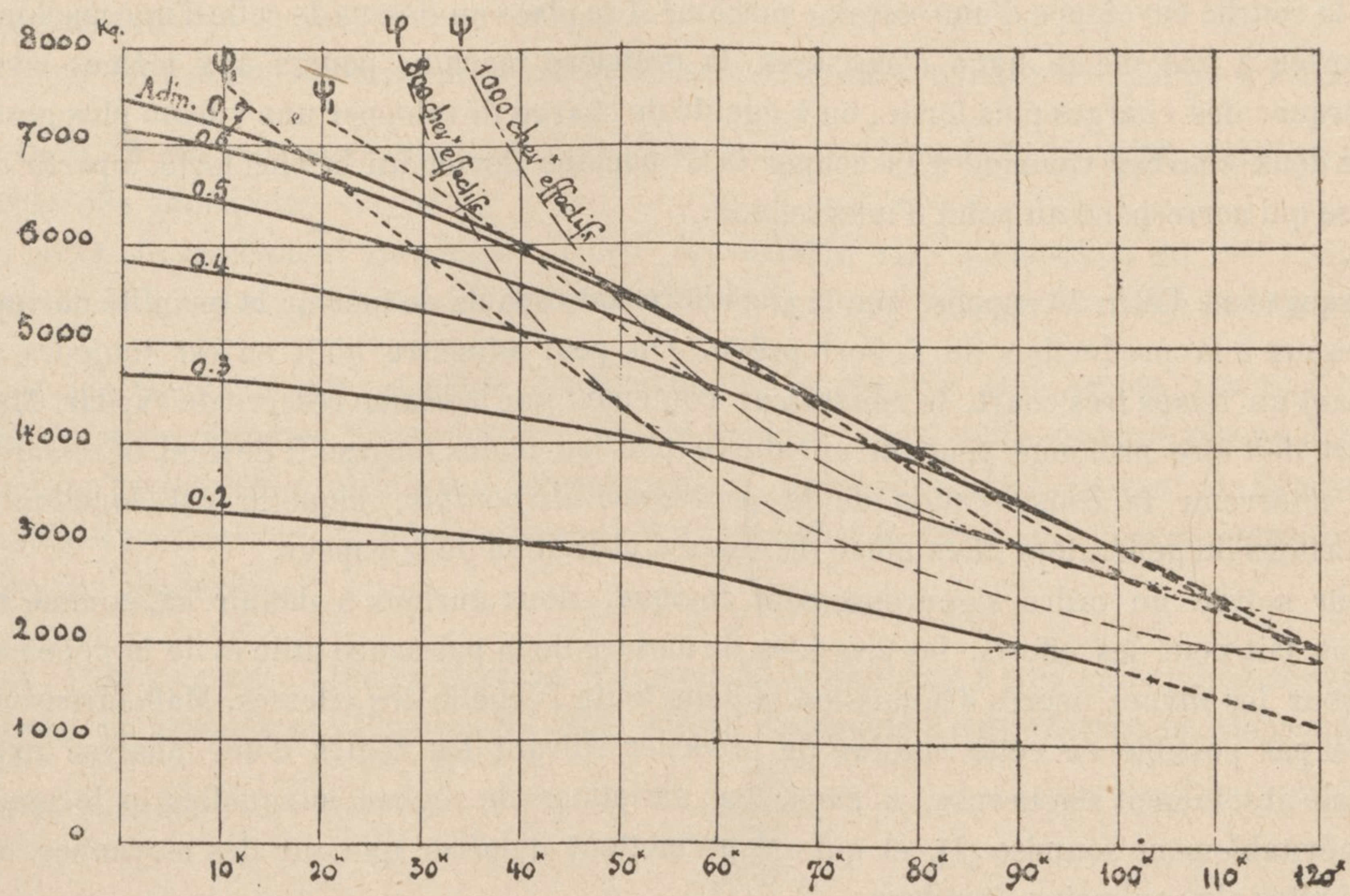
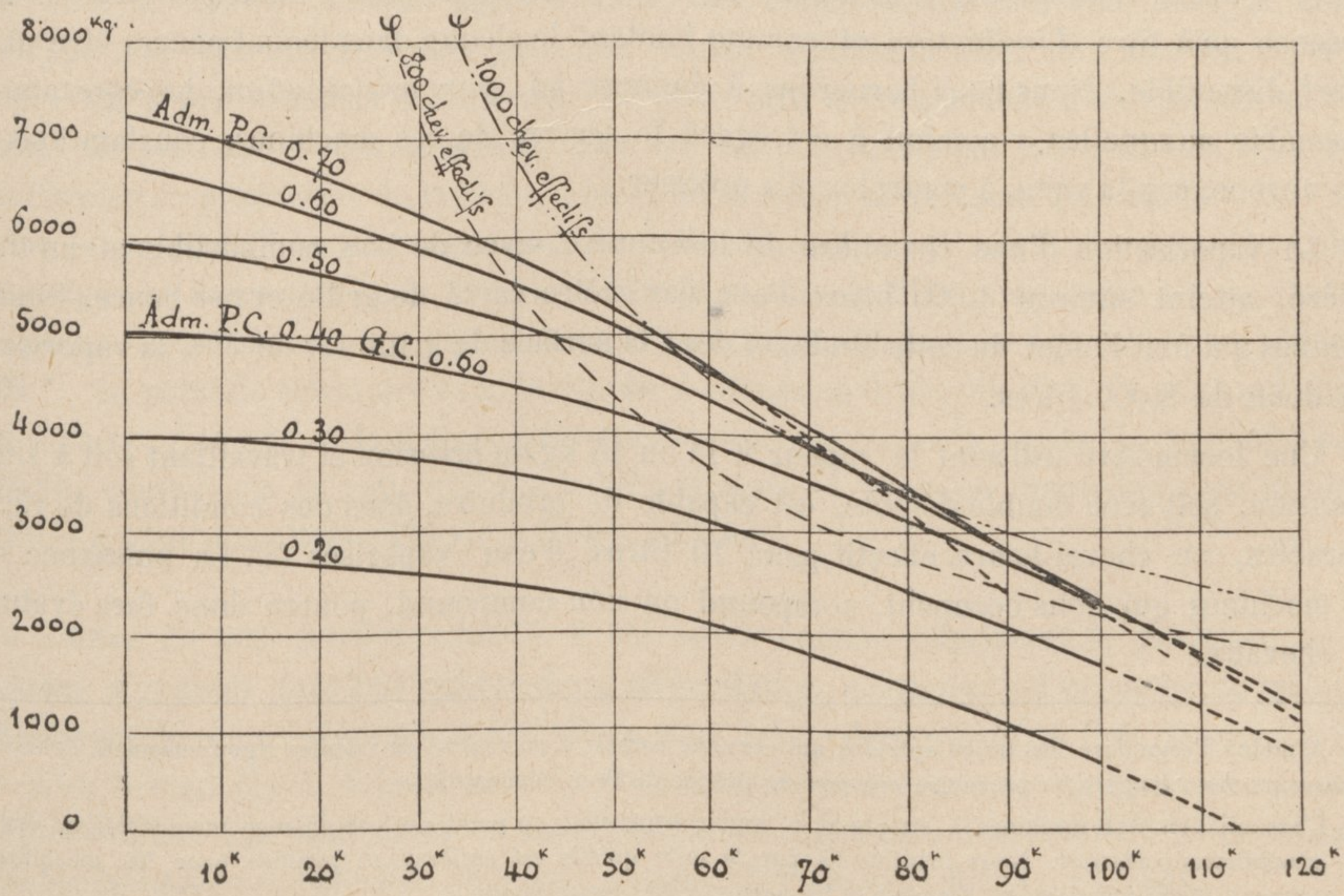


DIAGRAMME II. — MACHINE COMPOUND 2701 (TYPE N° 2138 NORD).



vitesse l'effort que la machine ne peut en aucune façon dépasser, quelle que soit d'ailleurs la production du générateur. Cette courbe est une caractéristique importante du fonctionnement de chaque type de machine.

Si la courbe enveloppe d'une certaine machine *A* se place au-dessus de celle d'une machine *B*, rapportée à une même ligne d'abscisses, la première machine pourra aux mêmes vitesses remorquer des charges plus fortes, ou à égalité de charge développer une vitesse plus grande. Si les deux courbes viennent à se couper la 2^e machine deviendra la plus forte, à partir de la vitesse qui correspond au point d'intersection.

LIMITATION
DES EFFORTS
EN FONCTION
DE LA PUISSANCE
DISPONIBLE.

Ce qui vient d'être dit suppose que la chaudière soit capable de fournir la quantité de vapeur nécessaire à la production de l'effort prévu. On peut admettre qu'il en est toujours ainsi pendant un temps très court, le générateur contenant une certaine réserve de vapeur. Mais si l'effort doit être prolongé pendant une durée plus ou moins longue, il devient nécessaire de faire intervenir la considération de la *puissance disponible*, laquelle est fonction des proportions du générateur et en outre du degré d'utilisation de la vapeur.

Pour suivre un ordre rigoureusement logique, nous aurions à définir ici, comme nous l'avons fait pour les efforts, les procédés de mesure de la puissance utile et de la dépense en eau pour les divers degrés d'admission et dans toute l'échelle des vitesses. Malheureusement il n'est pas possible en cette matière de procéder suivant les règles d'une analyse expérimentale absolument rigoureuse, à cause des variations de régime auxquelles la locomotive est inévitablement soumise (1), et qui ne permettent d'opérer que sur des moyennes, entre des limites plus ou moins étendues.

En ce qui concerne la puissance utile, la recherche d'une évaluation tout à fait précise serait même illusoire, car la production de la chaudière et par suite le développement de puissance dépendent de circonstances accessoires qui échappent à toute mesure, comme la qualité du combustible et l'habileté du chauffeur.

Nous n'avons d'ailleurs à considérer, dans cette partie de notre étude, les valeurs de la puissance qu'à titre *d'indication* et comme limitant le champ dans lequel pourra être utilisé l'effort disponible. Nous nous bornerons à énoncer ici, *par anticipation*, les constatations d'ensemble auxquelles a conduit à cet égard le service de ces machines, constatations que nous aurons, par la suite, à contrôler et à préciser.

1^o La vaporisation d'une chaudière de locomotive, avec de bon combustible et un tirage modéré, atteint environ 4,000 litres d'eau par mètre carré de grille et par heure. Pour les machines qui font l'objet de cette étude, et dont la surface de grille est de 2^m2, la vaporisation sera donc de 8,000 litres.

2^o Une locomotive utilisant la vapeur à 14 ou 15 kg de pression et travaillant soit à simple expansion, soit avec double détente, est capable de produire, dans des conditions de régime favorables, un cheval-heure effectif pour 10 litres d'eau vaporisés (2). La puissance utile des machines qui nous occupent, compound ou non compound, pourra donc être évaluée à 800 chevaux.

(1) A moins d'organiser des trains spéciaux qui seraient soumis à un régime de vitesses rigoureusement définies sur des parcours assez longs pour permettre une mesure précise de l'eau dépensée.

(2) L'assimilation des machines à simple et à double expansion, au point de vue du rendement s'éloigne des idées assez généralement admises. Nous montrerons par la suite qu'elle est entièrement justifiée pour les machines qui nous occupent, et qui fonctionnent, les unes et les autres, à très haute pression.

3° On doit considérer comme conditions de *régime favorables* celles qui comportent une *détente effective* de 3 à 5 volumes, soit :

— pour les machines à simple expansion, un régime d'admission compris entre 0,20 et 0,35 de la course ;

— pour les machines compound, toute admission aux petits cylindres supérieure à 0,30.

4° Dans le cas des machines à *simple détente*, le coefficient d'utilisation s'abaisse avec l'emploi des admissions élevées.

La perte de rendement commence à être appréciable vers l'admission de 0,4 : elle est d'environ 20 %, avec 0,5 d'introduction et atteint 30 %, avec l'admission à fond de course.

Pour les machines *compound* le rendement des admissions supérieures, favorable aux faibles vitesses, diminue beaucoup aux allures rapides : mais cette circonstance ne doit pas influencer sur l'économie générale du fonctionnement, puisque l'emploi des grandes admissions est exclu d'avance aux grandes vitesses, pour lesquelles il donne un effort moindre que les admissions modérées.

Soit : P la puissance utile en chevaux d'une machine donnée ; v une valeur quelconque de la vitesse, en kilomètres à l'heure ; p l'effort effectif disponible à cette vitesse, en kilogrammes.

On a la relation :

$$P = \frac{p \times 75}{v \frac{1000}{3600}}$$

Si la puissance P est supposée constante à toutes les vitesses, la relation ci-dessus entre p et v représente une courbe hyperbolique qui peut être construite à l'échelle des diagrammes I et II, et reportée sur ceux-ci. C'est la courbe φ tracée en traits pointillés sur chacun des deux diagrammes, dans l'hypothèse d'une puissance utile égale à 800 chevaux. Cette courbe, qu'on pourrait appeler limite des efforts *utilisables*, rencontre la courbe enveloppe des efforts *réalisables* en deux points, délimitant ainsi une aire en forme de fuseau : les points compris à l'intérieur de cette aire correspondent à des efforts qu'il est possible de produire temporairement, mais qui ne pourraient pas être soutenus, à cause de l'insuffisance de production de la chaudière, et de la baisse de pression qui s'en suivrait.

Pour la machine à simple expansion, la perte de rendement relative aux grandes admissions exige une correction de la courbe φ , dans la région où celle-ci rencontre les courbes des admissions supérieures. Suivant ce qui a été dit plus haut, l'ordonnée doit subir une réduction de 20 % au point de rencontre avec la courbe d'admission 0,50 ; de 30 % au point qui correspond à l'admission à fond de course. Avec ces données on tracera la courbe de correction φ_1 qui n'affecte, comme on le voit, que les faibles vitesses et vient se raccorder avec la courbe primitive φ pour une vitesse d'environ 50 kil. à l'heure.

Le chiffre de 800 chevaux effectifs a été admis comme exprimant la puissance de nos machines d'express dans l'hypothèse d'une alimentation continue, qui permette de maintenir indéfiniment le même niveau à la chaudière sans baisse de pression. Si l'on disposait à l'origine d'un niveau élevé, il sera possible de marcher sans alimenter pendant une durée de quelques minutes : la production de vapeur est alors augmentée d'environ 1/4 et la puissance utilisable *pendant cette période de temps*, passe de 800 chevaux à 1,000 chevaux.

On a tracé sur les diagrammes I et II la courbe ψ qui correspond à cette dernière hypothèse et que l'on peut appeler courbe limite des efforts *temporairement réalisables*. On a construit en outre sur le diagramme de la machine à simple détente, en opérant comme il a été fait pour la courbe φ , la ligne de correction ψ_1 relative à la région des grandes admissions avec faibles vitesses.

Au moyen de ces données, nous pouvons aborder l'étude détaillée du fonctionnement de nos machines d'express, dans toutes les conditions de leur service.

ÉTUDE
DÉTAILLÉE
DU
FONCTIONNEMENT
DES MACHINES.

Nous aurons à considérer successivement :

1° Les *démarrages* : opération commune à toutes sortes de trains.

2° La *traction des trains lourds* soit en *palier*, soit en *rampe* aux vitesses compatibles avec la charge de ces trains et avec le profil des lignes parcourues : service des *express ordinaires*.

3° Enfin la traction des trains dits « *rapides* » et « *extra-rapides* ».

1° **Démarrages.** — Le terme de démarrage, dans son sens le plus large, s'entend de l'ensemble des opérations effectuées pour amener un train partant du repos à sa vitesse de régime. En principe le démarrage doit être exécuté de manière à atteindre ce résultat *dans le moindre temps possible* tout en évitant de faire tomber la pression de la chaudière, ce qui ferait perdre ultérieurement le bénéfice de temps réalisé. On devra donc, pendant toute l'opération du démarrage, demander à la machine la totalité de l'effort compatible avec la puissance de production, mais non davantage. Tenant compte de ce que cette opération n'est pas de longue durée, et de ce que le niveau de l'eau est ordinairement élevé après un stationnement, on pourra, le feu étant supposé en bon état, faire usage des courbes *supérieures* ψ (machine compound) et ψ, ψ_1 (machine à simple expansion) pour définir l'effort limité aux différentes vitesses. (1)

Examinons les phases successives de l'opération.

On voit sur les diagrammes I et II que depuis la vitesse zéro jusqu'à 45 kilomètres environ, il est possible d'utiliser l'*effort total* de la machine avec l'admission à *fond de course*. (Nous supposons, bien entendu, que l'adhérence du rail permette l'application de cet effort : il en est ainsi ordinairement avec l'emploi de la sablière à vapeur).

La machine 2752 à simple expansion donne à fond de course un effort initial de 7400^{kg}. La machine compound fournit un effort sensiblement égal : 7300 kgr. *L'efficacité* des deux machines est donc *la même* pour cette première partie de l'opération ; la question *d'économie*, évidemment secondaire en l'espèce, étant réservée.

Cette situation se maintient à peu près sans changement jusqu'à la vitesse caractérisée par la rencontre des courbes ψ . Quand la vitesse atteint 40 kilomètres la machine à simple expansion, avec l'admission toujours à fond de course, donne 6200 kgr, tandis que la machine compound fournit seulement 6000 kgr.; en fait, dans le cas de la machine à simple détente, pour éviter un échappement trop violent, on ramène ordinairement la marche, dès les premiers tours de roues, à une admission comprise entre 0,50 et 0,60. Les valeurs de l'effort effectif se retrouvent alors

(1) Nous faisons abstraction de la manœuvre consistant, dans le cas de la machine compound, à admettre directement la vapeur de la chaudière aux grands cylindres. Cette manœuvre rarement employée par les mécaniciens ne l'est jamais que pendant quelques instants. Elle ne donne d'ailleurs pour le travail de démarrage qu'un appoint insignifiant.

sensiblement égales pour les deux types de machines. A partir de la rencontre de la courbe ψ , qui est la même pour les deux machines, et qui, par conséquent, limite aux mêmes valeurs l'effort utilisable, le régime du démarrage devient identique, de part et d'autre. Cet état de choses persiste jusqu'à une vitesse voisine de 90 kilomètres, au delà de laquelle, pour la machine compound, la courbe des efforts *possibles* passe au-dessous de la courbe ψ .

La vitesse de 90 kilomètres est rarement dépassée, au moins comme allure de régime; sauf pour certains trains extra rapides dont le cas fera l'objet d'une étude spéciale. — On peut donc dire, en résumé, que depuis l'instant initial du démarrage jusqu'à la réalisation de la vitesse de pleine marche, les deux machines compound et non compound, ont des efforts disponibles *égaux*, et qu'elles doivent par conséquent effectuer des démarrages identiques.

Si, en raison de l'état du feu, ou du niveau trop peu élevé à la chaudière, on est conduit à substituer la considération des courbes φ et φ_1 à celle des courbes ψ , les valeurs de l'effort disponible seront encore les mêmes de part et d'autre, à l'exception d'une courte période comprise entre les vitesses de 20 et 40 kilomètres. — Dans cette région la courbe φ_1 , qui limite l'effort de la machine à simple expansion, empiète sur les courbes des admissions supérieures, tandis que dans le cas de la machine compound, celles-ci ne sont pas encore atteintes par la courbe φ . Il résulte de là une différence d'utilisation, mais très faible et essentiellement passagère. La puissance totale de démarrage n'en est pas modifiée dans une mesure appréciable: elle reste, dans cette hypothèse comme dans la précédente, pratiquement *équivalente* pour les deux types de machines.

Nous donnerons quelques exemples de démarrages exécutés avec nos machines express des deux types. Tous ces exemples se rapportent à une même charge de train (130^r remorquées) et à une section de ligne en palier. Les mécaniciens avaient reçu pour seule instruction de développer toute l'énergie du moteur, jusqu'à la *réalisation* de la vitesse de régime: 90 kilom.

Les conditions dynamiques de ces démarrages ont été enregistrées au moyen du pendule d'inertie. On a déduit par le calcul la loi des vitesses successivement atteintes et celle des espaces parcourus en fonction du temps; les résultats ont été d'ailleurs contrôlés par des observations chronométriques.

Les diagrammes I et I bis représentent des démarrages exécutés avec une machine à simple expansion (N^o 2752). Les diagrammes II et II bis se rapportent à une machine compound (N^o 2706).

Sur chacun de ces diagrammes on a tracé: 1^o la courbe des vitesses acquises et celles des espaces parcourus, déduites de la loi des efforts; 2^o la courbe des résistances spécifiques en fonction de la vitesse: (ces résistances étaient mesurées directement sur le train d'expérience).

Les diagrammes I et II ont été obtenus dans les conditions de pleine action des machines, avec la pression de la chaudière à la charge des soupapes, et sans patinage.

Les diagrammes I bis et II bis correspondent à des opérations dans lesquelles le patinage a obligé à modérer l'effort moteur initial.

Nous constatons par la comparaison des diagrammes I et II que l'énergie du démarrage a été très sensiblement la même pour les machines des deux types. L'effort a été un peu

ÉGALITÉ
DU TRAVAIL
DE DÉMARRAGE
POUR
LES MACHINES
COMPOUND
ET A SIMPLE
EXPANSION.

EXEMPLES
DE DÉMARRAGES
EN SERVICE.

plus grand à l'instant initial pour la machine à simple expansion (7400 kg. contre 7000 kg); par contre cet effort a été plus soutenu dans le cas de la machine compound.

DIAGRAMME I. — MACHINE 2752 A SIMPLE EXPANSION.
Train 86 du 28 Novembre 1899. — Démarrage à Château-la-Vallière.
Poids du train 230^t.

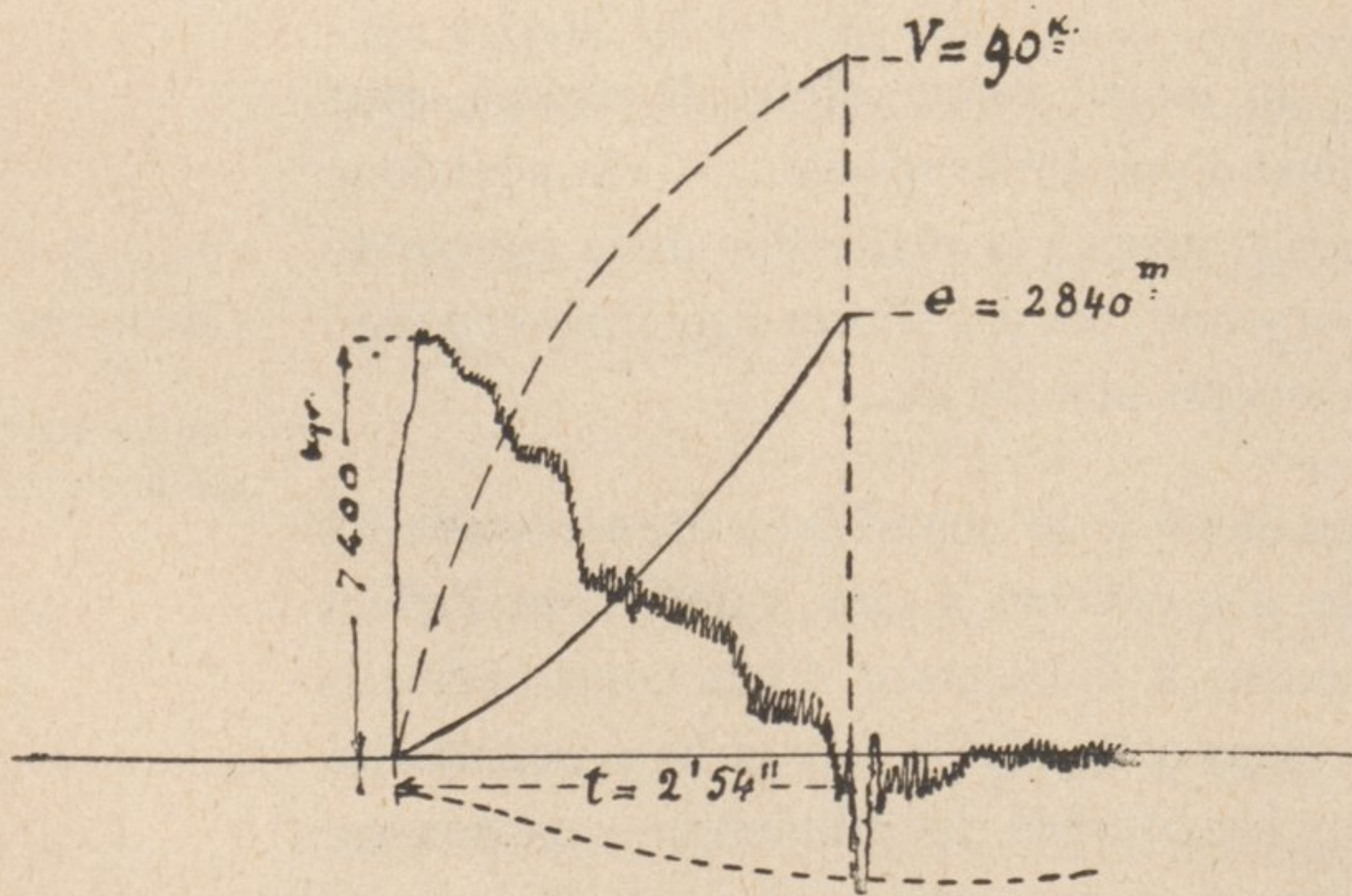


DIAGRAMME II. — MACHINE 2706 COMPOUND.
Train 86 du 30 Novembre 1899. — Démarrage à Noyant.
Poids du train 230^t.

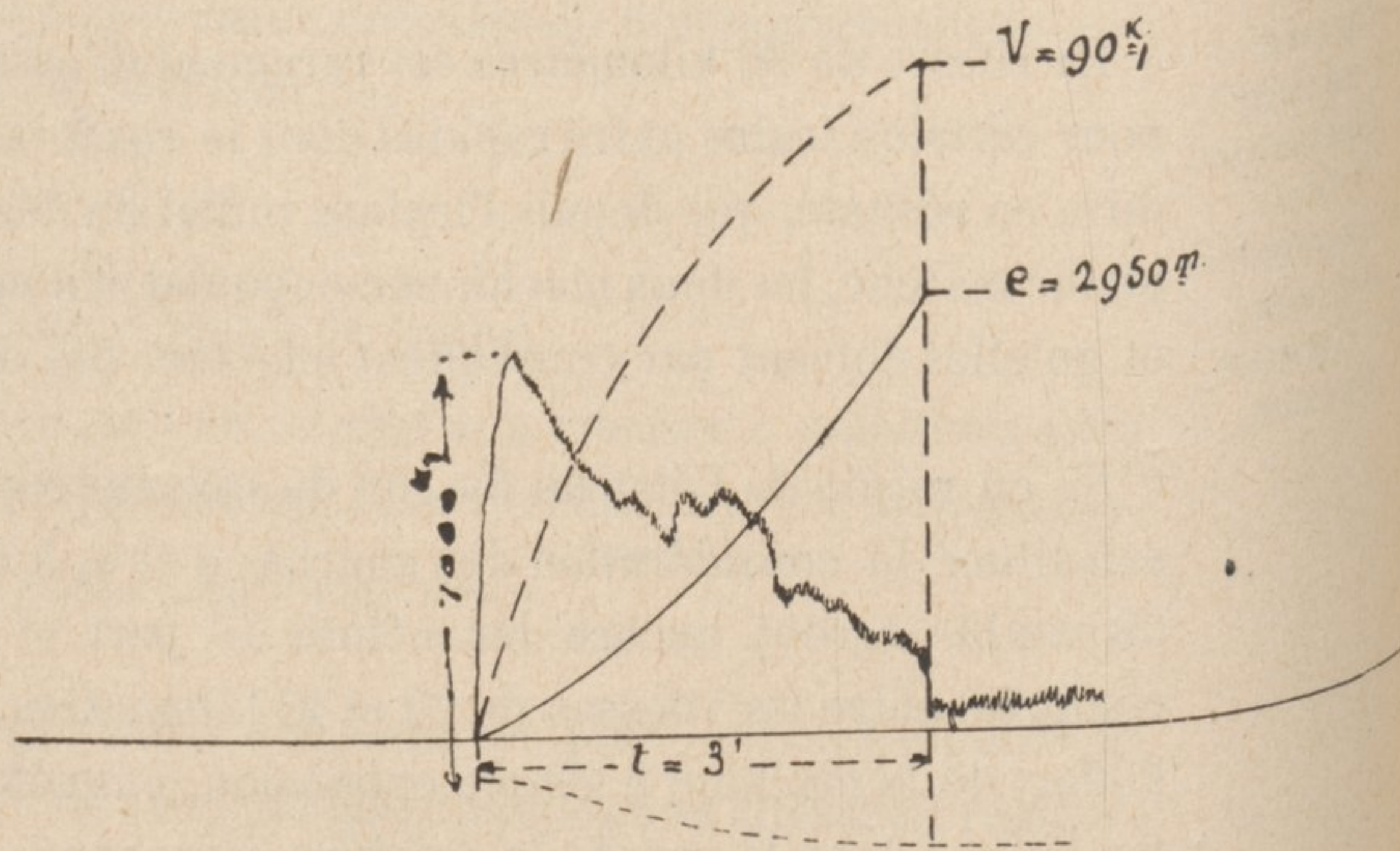


DIAGRAMME I bis. — MACHINE 2752.
Train 86 du 28 Novembre 1899. — Démarrage à Saumur.
Poids total 230^t.

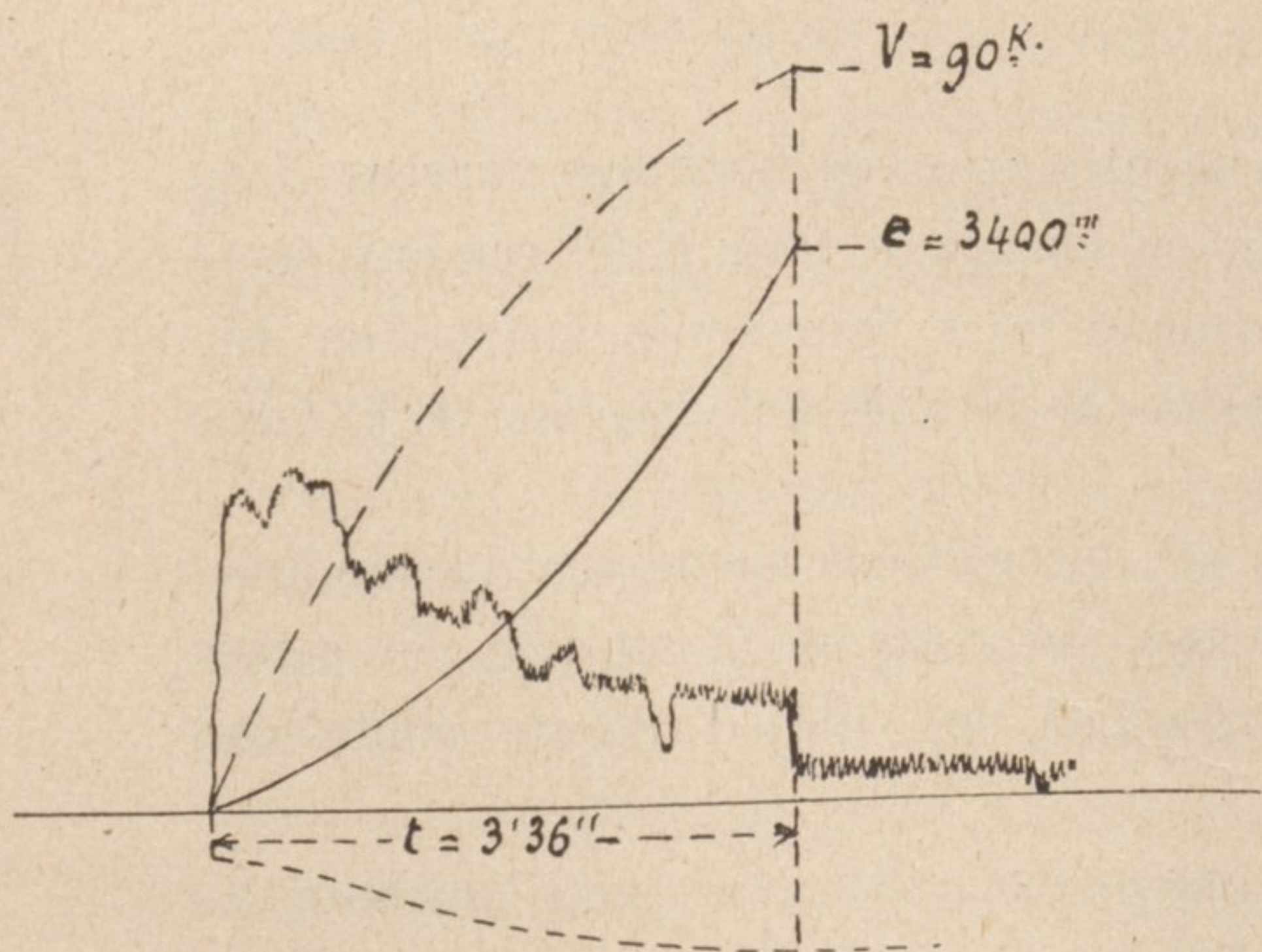
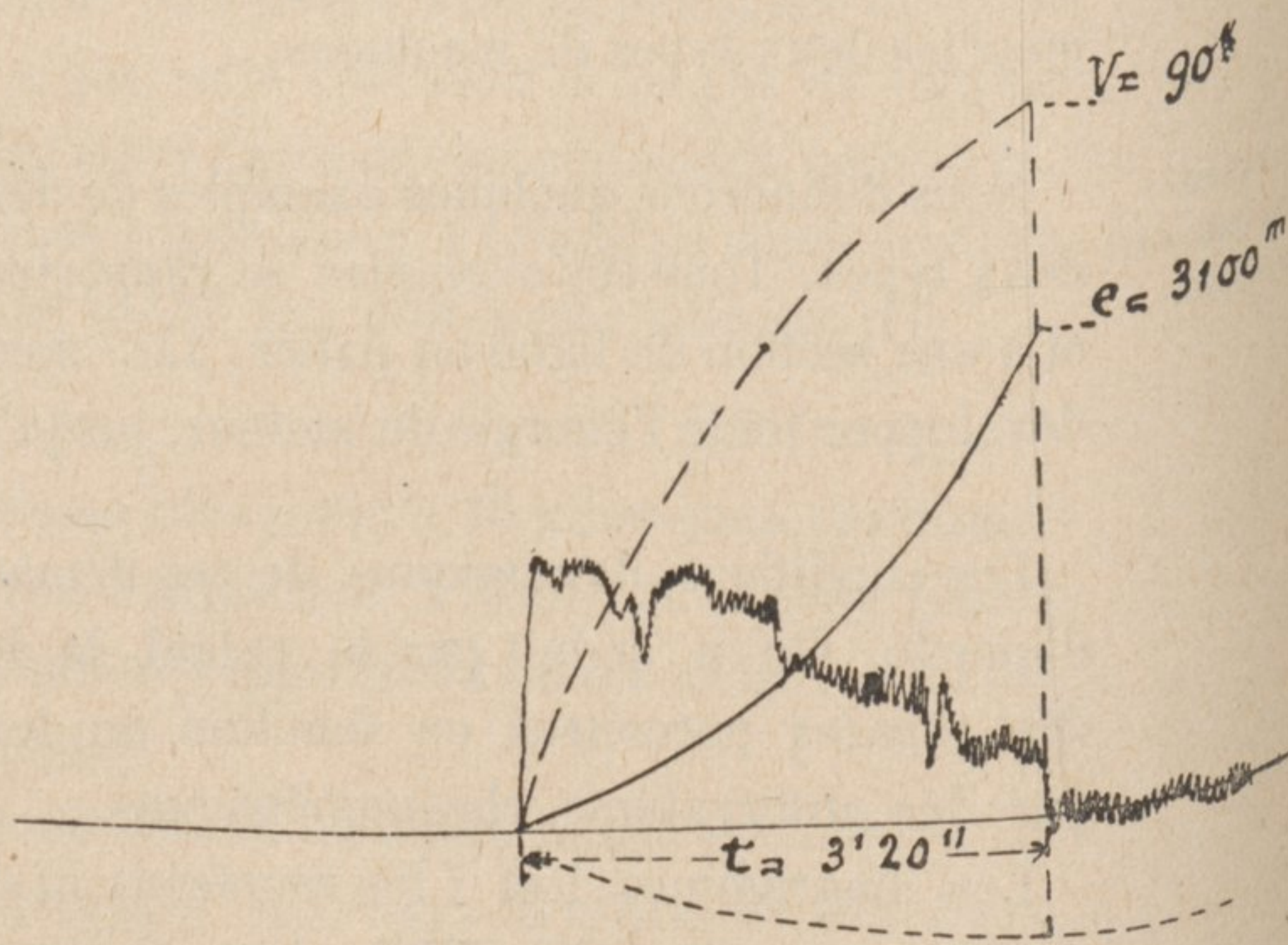


DIAGRAMME II bis. — MACHINE 2706.
Train 86 du 30 Novembre 1899. — Démarrage à Saumur.
Poids total 230^t.



La durée totale de l'opération a été très sensiblement la même pour les deux machines : 2^m54 et 3^m.

La perte de temps due au démarrage (différence entre le temps employé pour atteindre la vitesse de régime et celui qui eût été nécessaire pour faire le même parcours à cette vitesse) a été :

Pour la machine 2752 (Diagr. I).....	60 secondes
» 2706 (Diagr. II).....	62 secondes.

Dans les opérations I bis et II bis qui peuvent être considérées comme des démarrages en service ordinaire les pertes de temps sont respectivement de 80 et 76 secondes.

En résumé, il y a équivalence complète entre les résultats fournis par les machines des deux séries.

PÉRIODE INITIALE
DU DÉMARRAGE.

Dans ce qui précède, nous avons considéré le démarrage à partir de l'instant où la machine commence son *mouvement* en avant. Rigoureusement le temps doit être compté depuis l'*ouverture du régulateur*. Il existe parfois une période d'hésitation de quelques secondes qui dépend de la position initiale des bielles, et dans une certaine mesure du type de la machine : il peut même arriver qu'on soit obligé de renverser la marche afin d'obtenir un léger déplacement des organes, qui permette de repartir ensuite en avant.

La machine à simple expansion se trouve, à cet égard, dans des conditions meilleures que la machine compound, puisque, toutes choses égales d'ailleurs, l'action initiale de la vapeur s'exerce sur de plus grandes surfaces de pistons.

On a été conduit, pour la machine compound, à ajouter un tuyautage avec une valve spéciale permettant d'introduire directement la vapeur dans les grands cylindres : on obtient alors un démarrage plus certain et plus immédiat.

Cette particularité ne doit pas être considérée comme un avantage propre au système compound. Il s'agit là d'une addition destinée à compenser une cause d'infériorité : on pourrait, par une disposition au moins aussi simple, assurer le démarrage au point critique des machines à simple expansion, et accroître l'effort initial, si cela était reconnu utile.

Nous donnons ci-après quelques résultats d'expériences, dans lesquelles on a compté pour des trains de même composition et pour différentes machines démarrant en palier, sur bon rail, les temps écoulés entre l'ouverture du régulateur et le 1^{er} coup d'échappement.

Machine à simple expansion 2752.....	5" 7" 6" 8" moyenne 6' 5
Machine compound 2700, sans manœuvre de la valve de démarrage	} 7" 6" 5" 8" moyenne 6" 5
Machine compound, avec manœuvre de la valve de démarrage.....	

Le bénéfice en faveur de la machine compound — ou du moins de la valve de démarrage — est en moyenne de 2 secondes.

Ce gain de temps est tout à fait minime. Il suffit toutefois pour déterminer chez les personnes présentes sur la machine la sensation d'un départ plus rapide. Cette impression a dû contribuer dans une certaine mesure à l'opinion assez répandue, mais non justifiée en fait, que la machine compound possède une grande supériorité pour les démarrages.

ADHÉRENCE
AU DÉMARRAGE.

En principe, la machine compound à 4 cylindres doit avoir moins de tendance au patinage en marche que la machine à simple expansion, puisque pour une même valeur moyenne de l'effort moteur les maxima sont moins prononcés. Il n'a pas été possible de faire à cet égard des expériences réellement comparatives : les machines des deux séries, malgré la valeur élevée de leur effort de démarrage patinent peu. On peut admettre néanmoins qu'il existe un léger avantage en faveur des machines de la série compound.

Le patinage à l'*instant initial* est plus à craindre dans le cas des machines compound, si on démarre avec la valve d'introduction directe.

DÉPENSE
DE VAPEUR
POUR
LE DÉMARRAGE.

L'opération du démarrage, telle qu'elle a été décrite, et qui constitue ce qu'on pourrait appeler le démarrage *absolu*, entraîne, à égalité de travail utile, une dépense de vapeur plus grande avec la machine à simple expansion qu'avec la machine compound. Nous

constatons en effet que jusqu'à 40 ou 50 km. de vitesse il a fallu avec la machine à simple détente faire usage d'un degré d'admission trop élevé, qui comporte 20 à 30 % de perte sur l'utilisation normale de la vapeur. Ce régime d'admission défavorable correspond à un parcours d'environ 1000 mètres, pendant lequel l'effort développé (5000 à 6000 kg.) est à peu près le triple de l'effort moyen de traction en pleine marche; l'excédent de dépense imputable à la perte de rendement pendant cette période pourra donc être évalué à $3 \times 0,25 = 0,75$ de la dépense d'un kilomètre du train normal.

Cette perte est sans importance appréciable pour des trains ayant à effectuer de longs parcours sans arrêt, comme certains rapides; elle est assez sensible, au contraire, pour les trains express ordinaires, notamment pour ceux du Réseau de l'Etat, assujettis à des arrêts dont l'intervalle moyen n'excède pas 20 kilomètres.

Il convient toutefois d'observer que nous nous sommes placés, pour l'étude de cette question, dans des conditions *extrêmes*, qu'il est généralement possible d'atténuer, de manière à réaliser une amélioration notable du rendement économique en ne sacrifiant que très peu sur l'énergie du démarrage. Si on admet par exemple une diminution de 10 % de l'effort initial, la durée totale du démarrage augmentera, au maximum, de 10 à 15 secondes; d'autre part le degré d'introduction étant ramené aux environs de 0,45, la perte de rendement est réduite à peu près de moitié, et l'excédent de consommation ne représentera plus, par démarrage, que 0,40 de la dépense d'un kilom. de train normal.

En fait, c'est presque toujours ainsi que l'on opère, à moins de circonstances exceptionnelles. Dans les démarrages représentés par les diagrammes I, I bis, page 306 le mécanicien agissant de sa propre initiative, et en vue de ménager la pression, a réduit l'admission, dès la période initiale, à 0,50 environ, et peu après à 0,45; ces démarrages exécutés dans des conditions relativement économiques, ont été cependant aussi énergiques que ceux de la machine compound.

TRAINS EXPRESS. 2° **Traction des trains Express ordinaires.** — Nous considérerons comme trains express ordinaires, par opposition aux trains « rapides », dont il doit être parlé plus loin, ceux dont la charge est égale ou supérieure à 200^{r.}, avec un maximum de 280 à 300^{r.}; et nous admettrons que ces trains aient à circuler sur des rampes pouvant atteindre 10 m/m par mètre. Nous traiterons cette question sur des exemples, échelonnés de telle sorte que la marche d'un train quelconque puisse être rapportée à l'un des cas examinés, ou intercalée entre deux d'entre eux.

CONDITIONS
DIVERSES
DE CHARGE
ET DE PROFIL.

Nous considérerons successivement :

- | | |
|-----|---|
| a) | un train de 200 T. remorquées en palier |
| b) | — d° — rampe de 5 m/m |
| c) | — d° — rampe de 10 m/m |
| a') | un train de 300 T. remorquées en palier |
| b') | — d° — rampe de 5 m/m |
| c') | — d° — rampe de 10 m/m |

La machine, avec son tender à l'état de chargement moyen, sera supposée peser 80 tonnes.

Nous avons d'abord à évaluer la résistance opposée par ces trains à la marche, aux différentes vitesses.

Il n'existe pas actuellement de formules sur laquelle les techniciens se soient mis d'accord pour calculer les résistances à la traction. De telles formules devraient contenir d'ailleurs un assez grand nombre de coefficients indéterminés, étant donnée la variété des types de matériel existants.

Nous ferons usage de formules très simples, spécialement établies pour les conditions de charge et de vitesse que nous avons en vue, et dont les coefficients sont tirés d'expériences directes, exécutées sur *le matériel même* des Chemins de Fer de l'Etat. Les résultats obtenus dans ces expériences se rapprochent beaucoup, entre les limites de vitesse considérées, de ceux indiqués par M. F. Barbier dans l'importante étude qu'il a consacrée aux machines compound du Chemin de Fer du Nord (*Revue Générale*, Juillet 1898). Ils comportent, comme ces derniers, des chiffres de résistance spécifique notablement inférieurs à ceux que l'on tire des formules anciennes de Harding, de Wullemin, etc. Nos chiffres sont même plus faibles que ceux de M. Barbier; et il doit en être ainsi, parce que pour réaliser des conditions expérimentales bien définies nous avons opéré seulement par *temps calme*, tandis que les coefficients du Chemin de Fer du Nord se rapportent à des conditions atmosphériques *quelconques*: ce qui suffit pour expliquer un écart d'environ 10 %. Il nous a paru préférable pour la netteté des résultats, de conserver l'hypothèse d'un temps favorable ou à peu près favorable, nous nous sommes borné à augmenter de 2 à 3 % les chiffres de résistance minimum obtenus par temps absolument calme.

Nous prendrons comme formules applicables à la résistance en palier : pour le train de 200^T remorquées,

$$F = (200 + 80) \times 0,9 v \begin{cases} F \text{ résistance en kilogr.} \\ v \text{ vitesse en kilom.} \end{cases}$$

et pour le train de 300^T,

$$F = (300 + 80) \times 0,8 v,$$

formules reconnues exactes pour la vitesse de 80 kilom. et qui peuvent être appliquées avec une approximation suffisante entre 50 et 100 kilomètres.

Les formules de résistance en rampe seront :

pour R = 5 mm. :

$$\text{train de } 200^T \quad F = (200 + 80) (0,09 v + 5)$$

$$300^T \quad F = (300 + 80) (0,08 v + 5)$$

et pour R = 10 mm. :

$$\text{train de } 200^T \quad F = (200 + 80) (0,09 v + 10)$$

$$300^T \quad F = (300 + 80) (0,08 v + 10)$$

Chacune de ces formules est représentée graphiquement par une portion de droite.

Si on reporte sur chacun des diagrammes I et II (page 301) les tracés relatifs aux diverses hypothèses que nous venons de définir, on aura immédiatement, pour chacune des deux machines considérées la solution des deux questions qui constituent tout le problème de la traction :

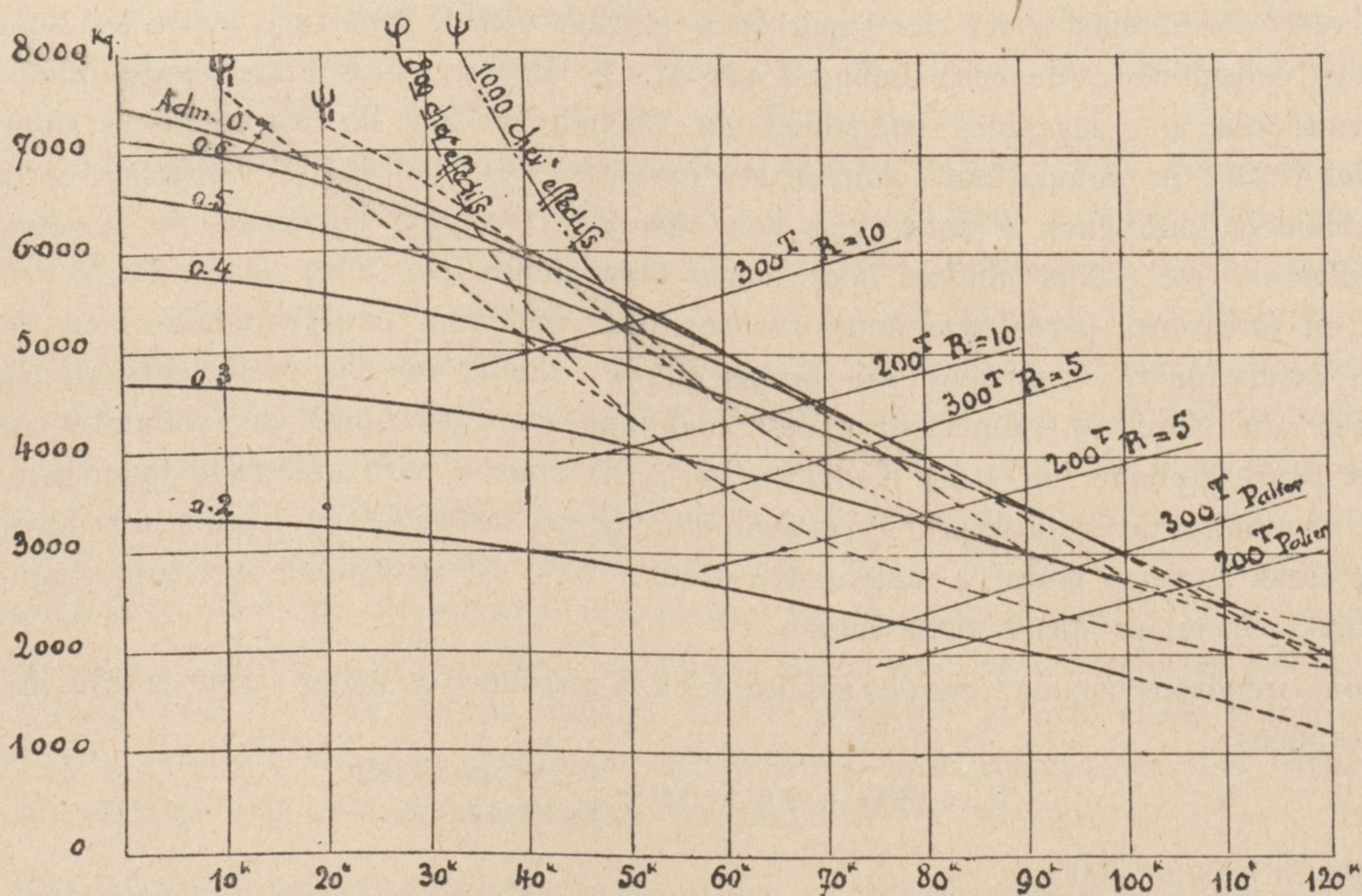
1° A quelle vitesse chacun des trains considérés peut-il être remorqué sur les divers profils ?

2° De quel degré de détente faudra-t-il faire usage pour réaliser l'effort exigé ?

TRAIN DE 200^t
EN PALIER.

Considérons le train de 200^t remorquées en palier. — On voit sur le diagramme N° I (de la page 301 reproduit ci-dessous) que la machine à simple expansion pourra atteindre une vitesse de 107 kilomètres avec 0,35 d'admission : mais seulement pendant quelques instants, parce que la consommation de travail est, dans ces conditions, supérieure à la production maxima de la machine (courbe ψ , 1000 ch^x effectifs).

DIAGRAMME I.



Une vitesse de 103 kilomètres pourra être soutenue pendant quelques minutes, avec admission de 0,30, l'alimentation étant supprimée.

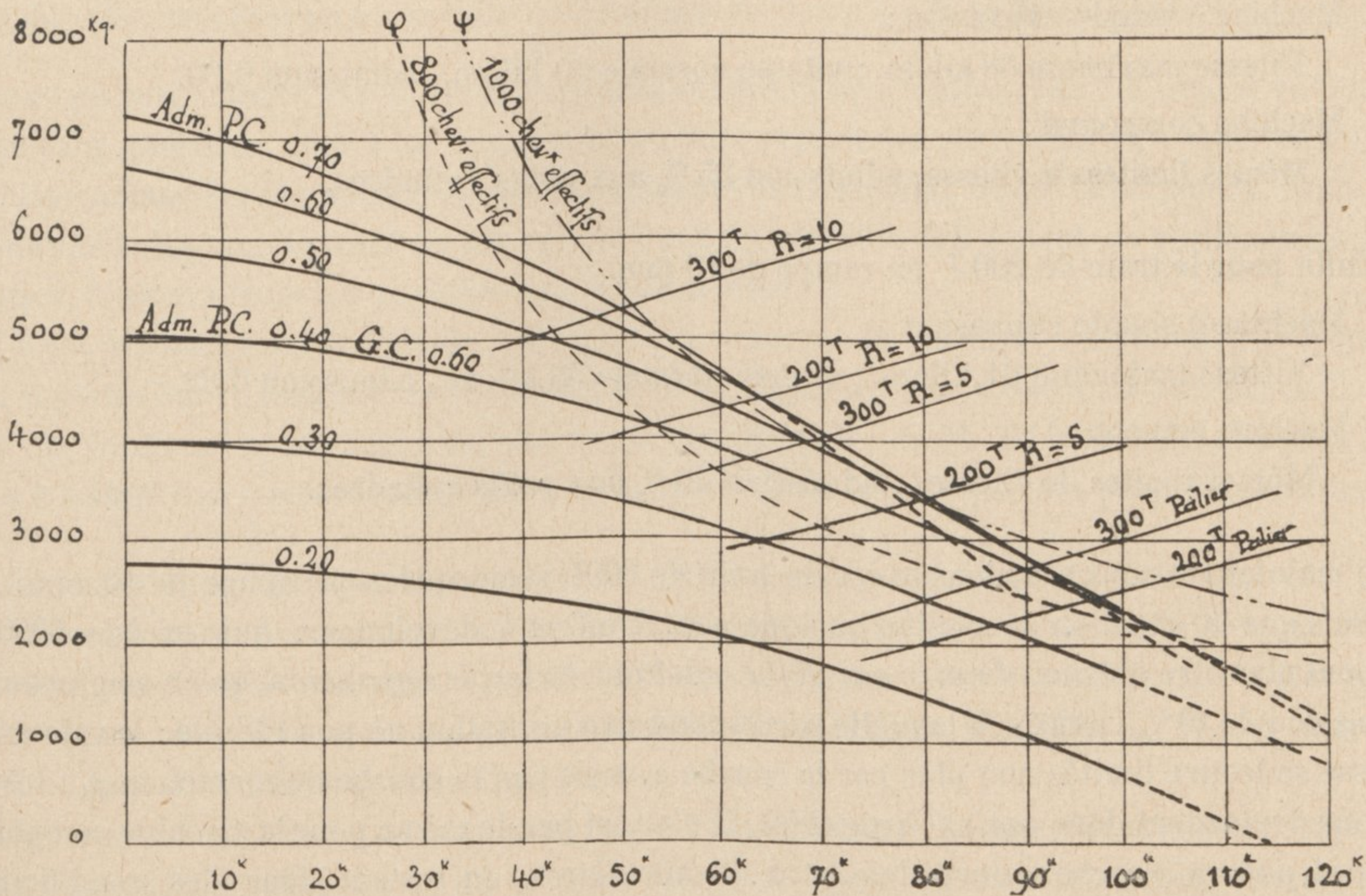
Enfin on pourra marcher d'une manière continue, en utilisant la production normale de la chaudière (courbe φ , 800 ch^x effectifs) à la vitesse de 93 kilom. avec 0,25 d'admission ; ou si on le préfère avec une introduction un peu plus grande en réduisant la pression par l'étranglement du régulateur (1).

La machine compound (Diagr. II, page 301, reproduit ci-dessous) donne, pour le même train, une vitesse *maximum* de 97 kilom. avec 40 % d'admission au petit cylindre. La vitesse normale (courbe φ) est la même que pour les machines à simple expansion : 93 kilom., avec 30 à 35 % d'admission.

On remarquera que dans le cas de la machine compound, le maximum d'effort aux grandes vitesses se place au-dessous de la courbe ψ : il est déterminé non par la limite de production de la chaudière, mais par les conditions mêmes de fonctionnement de l'appareil moteur de la machine : La limite d'effort ne serait pas reculée lors même qu'on augmenterait dans une mesure quelconque les proportions du générateur.

(1) L'étranglement du régulateur est une pratique volontiers suivie par les mécaniciens, dont elle diminue la fatigue. — Il vaut mieux étrangler un peu le passage de vapeur que de marcher à une admission inférieure à 0,25 : mais en règle générale, il est préférable d'utiliser la pleine pression de la chaudière.

DIAGRAMME II.



Nous aurons à revenir plus tard sur ce point important qui intéresse surtout le service des trains rapides.

En procédant de la même manière pour un train de 300^T remorquées (chiffre qu'on peut considérer comme la limite extrême de la charge d'un train de voyageurs) nous trouvons que la machine à simple expansion pourra soutenir, pendant quelques instants, l'allure de 99 kilom., et pendant quelques minutes celle de 95 kilom. avec 0,30 et 0,35 d'admission. Elle marchera normalement à 85 kilom. avec 0,25 d'introduction.

La machine compound donne pour le même train une vitesse limite de 92 kilom. : c'est là encore un maximum absolu indépendant de la production. L'allure normale déterminée par la courbe φ est la même que pour la machine à simple expansion : 85 kilom. ; elle est obtenue avec une admission de 0,35 aux petits cylindres.

En procédant de la même manière on trouve :

Pour le train de 200^T en rampe de 5 mm.

Machine à simple expansion :

Vitesse maximum (1) 79 kilom. ; vitesse normale 69 kilom. ; admission 0,27.

Machine compound :

Mêmes valeurs de la vitesse maximum et de la vitesse normale ; admission : 32 % aux petits cylindres.

(1) Nous considérons désormais comme *maximum* la vitesse qui peut être soutenue temporairement en supprimant l'alimentation.

Il n'y a pas d'intérêt pratique à considérer une allure plus rapide qui ne peut être soutenue que pendant quelques instants.

TRAIN DE 300^T
EN PALIER.

TRAINS
DE 200 ET 300^T
EN
RAMPE DE 5^m/m.

Pour le train de 300^T en rampe de 5 mm. :

Machine à simple expansion :

Vitesse maximum 68 kilom. ; vitesse normale 60 kilom., admission 0,30.

Machine compound :

Mêmes limites de vitesse, admission 35 % aux petits cylindres.

TRAIN DE 200^t
EN
RAMPE DE 10^m/m.

Enfin pour le train de 200^T en rampe de 10 mm. :

Machine à simple expansion :

Vitesse maximum 61 kilom. ; vitesse normale 53 kilom., admission 0,32.

Machine compound :

Mêmes limites de vitesses ; admission 40 % aux petits cylindres.

TRAIN DE 300^t
EN
RAMPE DE 10^m/m.

Si maintenant nous abordons le cas du train de 300^T remorquées en rampe de 10 mm. nous voyons que la situation se modifie quelque peu. L'effort à développer, qui excède 5000 kg. ne peut plus être obtenu, *dans le cas de la machine à simple expansion*, qu'en employant une admission de 40 % environ, à laquelle correspond une utilisation un peu réduite ; la valeur de la vitesse se trouve limitée non plus par la courbe φ , mais par la courbe de correction φ_1 : les conditions deviennent donc *moins favorables*. Il n'en est pas de même pour la machine compound ; celle-ci pourra marcher normalement à 43 kilomètres, en restant dans des conditions de détente économiques ; tandis que la machine à simple expansion tombera à 41 kilomètres, tout en dépensant davantage.

Il convient de faire observer que nous nous sommes placés ici dans un cas *extrême* qui ne se réalisera presque jamais dans la pratique. S'il existait un service de trains dans lequel des charges de 300 tonnes dussent être remorquées normalement sur des rampes continues de 10 mm., on n'affecterait certainement pas à ce service des machines à roues de 2 mètres, compound ou non compound.

Il a paru utile de pousser jusqu'à ce cas extrême l'analyse des conditions de fonctionnement de nos locomotives d'express, afin de montrer par un exemple comment il se rencontre, pour chaque type de machine, certaines conditions de régime qui constituent en quelque sorte une limite d'élasticité au delà de laquelle les qualités propres de cette machine s'altèrent et peuvent disparaître. Nous venons de rencontrer cette limite pour la machine à simple expansion du côté des charges excessives. Nous aurons à faire une constatation analogue en ce qui concerne la machine compound, quand nous examinerons les conditions de réalisation des très grandes vitesses.

Si nous atténuons tant soit peu l'hypothèse extrême où nous nous étions placés, en admettant que sur les sections en rampes de 10 mm, la charge remorquée n'excède pas 260^T (chiffre qui ne sera encore atteint que rarement dans la pratique) nous rentrons dans des conditions normales ; on retrouve la parité complète entre les machines des deux systèmes.

On conclut de cette analyse que pour tout service de trains express appelés à circuler sur des lignes dont la déclivité ne dépasse pas 10 mm. par mètre, avec un maximum de vitesse de 90 à 100 kilomètres, et des charges n'excédant pas habituellement 260 tonnes remorquées, la machine à simple expansion et la machine compound devront donner des résultats tout à fait équivalents comme puissance et comme rendement économique.

Résultats obtenus en service. — Nous avons maintenant à rapprocher de ces conclusions les résultats fournis en *service courant* par les deux types de machines.

Nous ne reviendrons pas ici sur la constatation des efforts réalisés aux différentes vitesses. Il serait sans intérêt de citer à cet égard telle ou telle expérience particulière puisque les courbes des diagrammes I et II sont la représentation même de l'ensemble de ces expériences. Nous nous bornerons à dire que le tracé de ces courbes une fois établi a fait l'objet de vérifications nombreuses, toujours trouvées parfaitement concordantes.

Il n'est pas sans intérêt d'ajouter qu'en ce qui concerne la machine compound type Nord, on a pu reporter sur le diagramme les résultats de quelques-uns des essais exécutés par la Compagnie du Nord sur ses machines les plus nouvelles (Mémoire de M. Barbier, déjà cité page 309). On a constaté une concordance entière avec les résultats fournis par nos propres machines.

Les constatations faites en service doivent surtout nous intéresser au point de vue de la puissance et du rendement économique obtenus pour chaque type de machine. C'est en effet de ces résultats que doit ressortir la justification des règles que nous avons énoncées par anticipation pour obtenir le tracé des courbes limitatives de l'effort effectif ($\varphi, \varphi_1, \psi, \psi_1$) et qui ont servi de base à la discussion des diagrammes.

Rigoureusement, ainsi que nous en avons fait plus haut la remarque, les mesures corrélatives de la *puissance* développée et de la *consommation* d'eau ou de combustible, devraient être prises comme celle des efforts effectifs, dans toute l'échelle des vitesses, et aux divers degrés d'introduction.

Mais, comme nous l'avons fait également remarquer, des opérations de cette nature, sans présenter de *difficultés* matérielles, exigeraient la constitution de trains spécialisés pour ces expériences, et combinés de manière à compenser par des artifices spéciaux les variations du profil, fréquentes surtout sur le réseau de l'Etat, et qui viennent modifier à tout moment les conditions de régime.

Nous nous bornerons donc à considérer le rendement en bloc et à un point de vue simplement comparatif, en faisant le rapprochement des chiffres de consommation courante relevés pour les deux types de machines qui nous occupent, dans un service identique.

Les machines *compound* type Nord sont, nous l'avons dit, au nombre de *six*, toutes exactement semblables comme construction (n^{os} 2701 à 2706).

Les machines à *simple expansion* (type Creusot) ont été construites au nombre de *quatre*. Mais tandis que ces machines devaient primitivement être d'un modèle unique, avec des cylindres moteurs de 0^m,44 de diamètre, comme les machines anciennes dont elles sont dérivées, il fut décidé, à titre d'essai, que l'alésage des cylindres serait porté pour *deux* d'entre elles à 0^m,46.

Les résultats de cet essai ont été nettement contraires aux cylindres agrandis : il a été reconnu qu'à la vitesse des trains express ceux-ci donnaient, avec une dépense de vapeur plus grande par cylindrée, un effort moteur plus faible (Voir annexe A). Il a donc fallu éliminer des essais les machines qui avaient reçu ces cylindres et dont l'une, d'ailleurs, a subi depuis une transformation en sens inverse.

Dans ces conditions, le groupe de machines à simple expansion à mettre en comparaison avec les locomotives du type Nord s'est trouvé réduit à deux unités (n^{os} 2751 et 2752).

Ces deux machines elles-mêmes ont fonctionné d'abord avec des éléments de régulation différents. La machine 2752 a été mise en service avec des tiroirs à segments larges, présentant un léger recouvrement (2^{mm}) du côté de l'évacuation. Pour la machine 2751, on avait adopté à titre d'essai des segments de largeur réduite, donnant un découverturement de 7^{mm} du côté de l'échappement : c'est la solution qui avait été appliquée aux machines à voyageurs anciennes, comme correctif de l'insuffisance des espaces morts, et qui avait donné de très bons résultats.

L'expérience a fait reconnaître que pour les nouvelles machines fonctionnant à haute pression avec des espaces morts largement proportionnés, l'emploi d'un recouvrement négatif à l'échappement n'était plus justifié et donnait même une augmentation de dépense. On est donc revenu aux segments larges avec recouvrement de 2^{mm}.

C'est dans ces conditions que les machines 2751 et 2752 ont été définitivement mises en roulement avec les six machines compound 2701-2706, à partir du mois de juin 1899, dans le service des trains express et rapides du dépôt de Thouars.

Nous donnons ci-après les chiffres de consommation, extraits des relevés de comptabilité, pour la période de 3 mois comprise entre le 21 juillet et le 20 octobre 1899. La consommation de combustible est rapportée au kilomètre de train. On a indiqué d'autre part, pour chaque machine, le tonnage moyen remorqué, la proportion du temps gagné, enfin la consommation de matières grasses.

Tableau A.

Dépôt de Thouars.				
TRAINS EXPRESS : PARIS-THOUARS ; THOUARS-BORDEAUX.				
TRAINS RAPIDES : PARIS-THOUARS ; THOUARS-ROYAN.				
<i>Période du 21 Juin au 20 Octobre 1899.</i>				
	CONSOMMATION de combustible par 1000 km. de train.	TONNAGE moyen remorqué.	MINUTES gagnées par 1000 km. de trains.	CONSOMMATION de matières grasses par 1000 km. de trains.
Machines à simple expansion :				
N ^{os} 2751	10 ^k 10	139 ^t	30 ^m 0	22 ^k 0
2752	9,05	141	29,6	34,0
Moyennes.....	9,57 ⁽¹⁾	140 ^t	29 ^m 8	28 ^k 0
Machines compound :				
N ^{os} 2701.....	9,42	145	32,5	37,0
2702.....	8,93	136	35,3	40,5
2703.....	9,30	148	29,1	32,5
2704.....	8,93	145	25,4	38,0
2705.....	9,67	141	32,4	34,0
2706.....	10,27	145	29,3	38,2
Moyennes.....	9 ^k 42	142 ^t ,8	30 ^m 7	36 ^k 0

(1) Les deux machines qui ont concouru à la formation de cette moyenne présentent comme on le voit des consommations très différentes.
La machine 2751 qui avait éprouvé au début de son service un grippage de cylindre est passée aux ateliers en Octobre dernier et a été remise ensuite en service. L'excédent de consommation a disparu et la machine 2751 est passée au rang des plus économiques.

Si on compare les moyennes fournies par ce tableau, on trouve pour la consommation de combustible, un avantage de 0 k., 15, ou 1,6 % en faveur du groupe des machines compound. Il convient de forcer un peu ce chiffre pour tenir compte de la légère différence existant sur le tonnage : nous admettons donc une différence de 2 % (1).

Cette différence est minime. Au point de vue de la dépense en argent, elle est plus que compensée par la différence en sens inverse de 25 % sur le graissage (2).

Au point de vue du rendement de la vapeur et de la puissance utilisable, nous trouvons dans les résultats constatés la justification rigoureuse des hypothèses sur lesquelles nous sommes appuyés pour l'étude analytique du fonctionnement des deux types de machines.

La différence de 2 % sur la consommation de combustible correspond, en effet, très exactement à l'influence des *démarrages*, seule opération pour laquelle nous avons constaté une utilisation médiocre de la vapeur, et, par suite, un excédent de dépense à la charge des machines à simple expansion. Les trains express du réseau de l'Etat sont assujettis à des arrêts relativement nombreux : ils ont en moyenne un démarrage par 20 kil., de parcours. Chaque démarrage entraînant un supplément de dépense évalué (page 308) à 0 k., 4 de parcours en pleine marche, on aura de ce chef un excédent de $\frac{0,4}{20}$, soit précisément 2 % de la dépense totale de traction.

Les démarrages mis à part, il y a *égalité de consommation* et par suite de rendement économique moyen pour les deux types de machines.

Avant de tirer de ce fait des conclusions formelles à l'égard des deux systèmes de distribution de la vapeur, il convient de rechercher si quelques circonstances particulières, en dehors du régime de détente, ont pu exercer une certaine influence sur les résultats obtenus avec les deux groupes de machines.

Les circonstances qui ont pu favoriser les machines à simple expansion, sont :

1° Les formes de moindre résistance adoptées pour l'avant et pour la cabine du mécanicien.

2° L'emploi des tiroirs cylindriques.

Par contre, les machines type Nord ont bénéficié des circonstances suivantes :

1° Conditions plus favorables de suspension et de roulement.

2° Choix du personnel de conduite.

Examinons dans quelle mesure ont pu influencer ces diverses circonstances.

Formes de moindre résistance. — L'orientation oblique donnée aux surfaces de front réduit à peu près de moitié la résistance de l'air par unité de surface projetée.

La résistance d'un plan normal étant d'environ 32 kg. par mètre carré à la vitesse de

(1) La différence sur le tonnage est de 2 %. Mais dans la traction d'un train express à tonnage modéré le travail de la charge remorquée n'excède pas le 1/3 du travail total, dont la plus grande partie est appliquée à la machine et au tender. La correction que nous indiquons est donc suffisante.

(2) 9 k., 57 — 9 k., 42 = 0 k., 15 de charbon à 20 fr. la tonne, valant 0 fr. 0030.

0 k., 036 — 0 k., 028 = 0 k., 008 d'huile à 0 fr. 50 le kilo, — 0 fr. 0040.

20 mètres par seconde, ou 72 kil. à l'heure (vitesse moyenne de nos trains express) la résistance des surfaces fuyantes peut être estimée à 16 kg. par mètre carré.

Les machines de la série 2750, qui ont un abri très spacieux, présentent une surface projetée de 7 mètres carrés; la résistance *réduite* doit être évaluée, d'après ce qui précède, à : $7 \times 16 = 112$ kgr.

Les machines type Nord présentent une surface de front plus faible : $5^m2,20$, la résistance de l'air sur cette surface sera $32 \times 5,2 = 166$ kgr.

Le bénéfice en faveur des machines 2750 est 54 kgr. soit environ 3 % de l'effort de traction d'un train moyen.

Si l'on tient compte de ce que ce bénéfice existe seulement pour les parcours effectués en vitesse, tandis que la dépense relative aux démarrages, à la montée des rampes, aux manœuvres, n'est pas modifiée, on peut conclure que l'influence des formes affinées se traduit par une économie d'environ 2 % sur l'ensemble du service.

Emploi des tiroirs cylindriques. — Nous ne possédons pas d'éléments pour évaluer dans le cas particulier qui nous occupe, l'économie de consommation imputable à l'emploi des tiroirs cylindriques. Nous ne pouvons que nous référer aux constatations faites sur les machines à voyageurs d'ancien type (1^{re} partie, page 197). Nous admettrons comme pour ces dernières, un bénéfice de 2 %.

Meilleures conditions de roulement des machines type Nord. — Les machines type Nord ont des roues motrices de 2^m13 de diamètre avec des fusées de 0^m19 ; les machines de la série Creusot ont des roues de 2^m03 avec fusées de 0^m19 .

D'autre part le bogie des machines Nord a des roues de 1^m04 avec fusées de 0^m13 ; celui de la machine Creusot des roues de 0^m96 avec fusées de 0^m15 .

Un calcul établi sur ces données, montre qu'il doit exister en faveur de la machine Nord un bénéfice d'environ 25 kgr. sur la résistance au roulement : c'est approximativement $1\frac{1}{2}$ % de l'effort total de traction d'un train moyen.

Choix du personnel de conduite. — Les machines de la série Nord ayant été livrées les premières, on a affecté à la conduite de ces machines les agents qui occupaient les premiers rangs sur la liste de classement du dépôt; il n'est certainement pas exagéré d'attribuer à ce fait une influence de $2\frac{1}{2}$ %; étant donné surtout qu'il s'agit d'un type de machines exigeant de la part du mécanicien des qualités particulières d'observation et d'initiative.

On voit en résumé qu'il y a compensation entre les circonstances qui ont pu favoriser les machines de l'une ou de l'autre série; en sorte que ces machines se sont trouvées, pour la comparaison des systèmes de détente, dans des conditions tout à fait équivalentes.

Nous pouvons dès lors, appliquer aux distributions elles-mêmes les conclusions énoncées plus haut et dire que les deux systèmes de détente ont accusé, pour les conditions variées de la traction de nos express, *le même* rendement économique.

Il convient de remarquer que les lignes du réseau de l'Etat sont caractérisées par un profil constamment accidenté, avec de longues rampes de $10\frac{m}{m}$ par mètre, sur lesquelles circulent normalement des trains dont la charge atteint 250^T. De telles conditions ne sont

certainement pas de nature à favoriser les machines à simple expansion: et on doit considérer comme certain que sur un profil analogue à celui des lignes principales des grands réseaux français, les résultats économiques obtenus avec ces machines ressortiraient d'une manière encore plus nette.

Nous avons cru devoir insister sur le cas des express ordinaires, à vitesses modérées, et à charges relativement élevées, parce que les trains de cette nature sont de beaucoup les plus nombreux dans nos roulements, et que par suite c'est à eux que se rapportent plus spécialement les chiffres de consommation fournis par les relevés statistiques.

Il nous reste maintenant à examiner le cas des trains de très grande vitesse.

3° Trains rapides. — On désigne ordinairement sous le nom de « rapides », les trains dont la vitesse de pleine marche est supérieure à 80 kil. Un assez grand nombre de ces trains sont aujourd'hui tracés à 90 kil., quelques-uns à 100 kil. On peut prévoir qu'il sera demandé bientôt de dépasser ce dernier chiffre.

La puissance des machines étant limitée, des vitesses aussi élevées ne peuvent évidemment être obtenues qu'avec une réduction correspondante des charges remorqués.

Nous avons déjà considéré, à l'occasion des trains express ordinaires le cas d'une charge de 200 tonnes; nous avons reconnu qu'avec ce tonnage la machine à simple expansion pouvait atteindre *en palier* et soutenir pendant quelque temps une vitesse de 103 kil.; tandis que la machine compound avec la même charge ne peut dépasser 97 kil.

Pour ne pas multiplier à l'excès les exemples, nous passerons sans transition au cas d'un train relativement léger. Nous supposerons 100 tonnes remorquées, avec 80 tonnes de machine et tender.

L'équation des résistances de ce train sera :

sur palier.....	$R = (100 + 80) \times 0,096 v$
en rampe de 5 $\frac{m}{m}$	$R = (100 + 80) \times (0,096 v + 5)$
en rampe de 10 $\frac{m}{m}$	$R = (100 + 80) \times (0,096 v + 10)$

La représentation graphique de ces résistances étant reportée sur les diagrammes I et II de la page 301 et reproduits ci-après, on voit que le train considéré pourra être remorqué en palier par la machine à simple expansion, *temporairement* à la vitesse de 118 kil. avec 30 % d'admission, et *d'une manière continue* à 112 kil. avec une admission de 0,25: par conséquent dans de très bonnes conditions économiques.

La machine compound dans les mêmes conditions ne pourra pas dépasser 107 kil., limite absolue et indépendante de la production de la chaudière (1).

Si nous considérons le même train sur une rampe de 5 $\frac{m}{m}$, nous voyons de même que la machine à simple expansion soutiendra au moins temporairement une vitesse de 104 kil., tandis que la machine compound ne peut, en aucune manière, dépasser 95 kil.

Enfin, dans une rampe de 10 $\frac{m}{m}$ la machine à simple expansion atteindra momentanément

(1) Il s'agit ici bien entendu de la marche *en palier* absolu: une pente même de 1/2 millimètre permettrait de réaliser une vitesse plus grande.

TRAIN DE 100^t
REMORQUÉES
EN PALIER
ET EN RAMPE.

92 kil. et soutiendra pendant quelque temps 84 kil.; la machine compound ne pourra en aucun cas dépasser 83 kil. (1).

DIAGRAMME I.

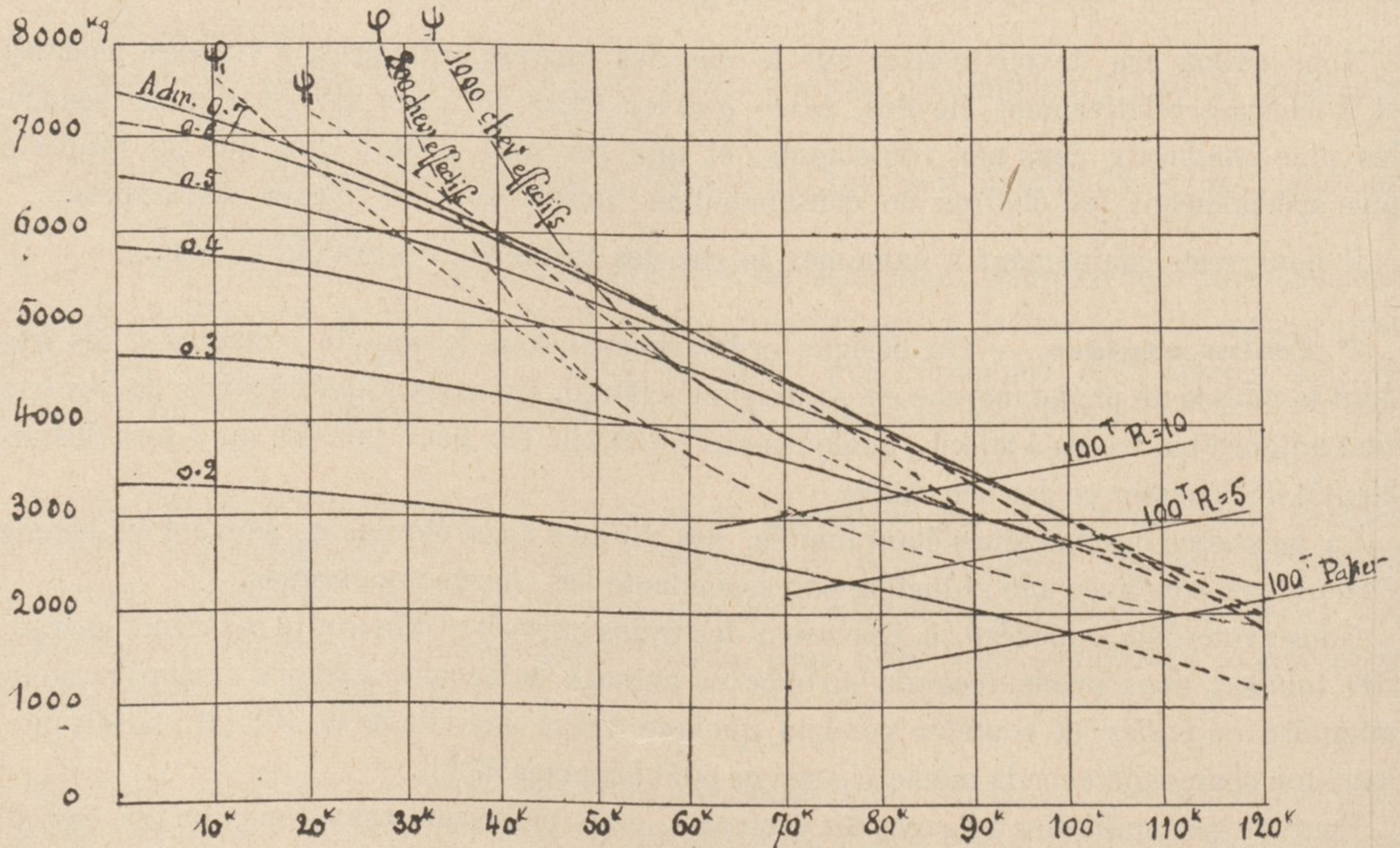
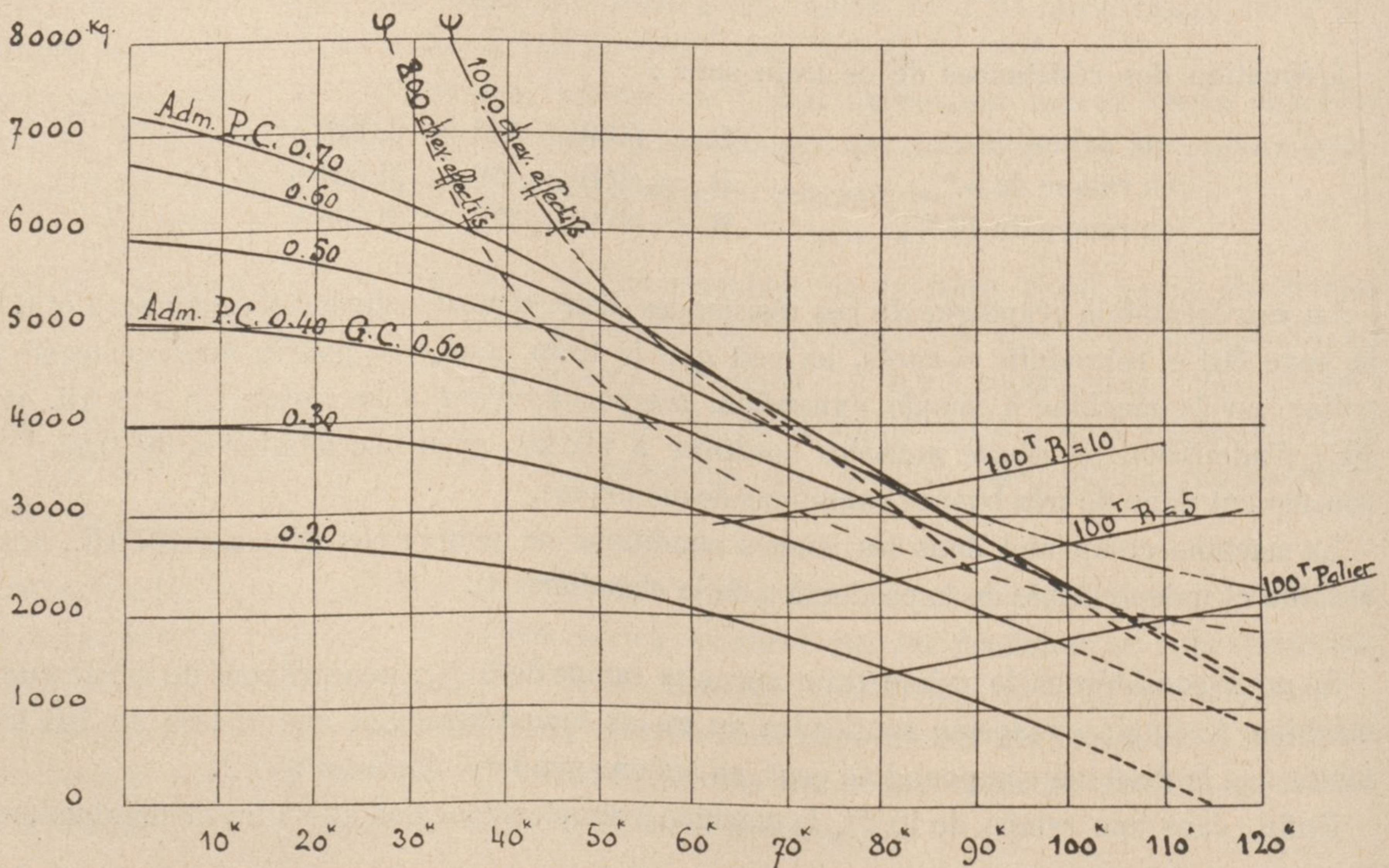


DIAGRAMME II.



(1) Une vérification remarquable des constatations auxquelles nous sommes arrivés nous est fournie, en ce qui concerne la machine compound par les expériences du Chemin de fer du Nord relatées dans le mémoire déjà cité de M. Barbier. Nous venons de constater qu'une charge de 100 t était remorquée en rampe de 5 m/m par nos machines compound

Tous ces exemples concourent à démontrer que pour la réalisation des *très grandes vitesses*, soit en palier, soit même en profil accidenté, la machine à simple expansion donnera des résultats plus avantageux que la machine compound : cette dernière n'étant pas à même d'utiliser aux vitesses extrêmes, toute sa puissance de production.

EXPÉRIENCES
COMPARATIVES.

Comme confirmation expérimentale nous citerons une série d'essais exécutés pendant l'été 1899, entre Versailles et Chartres, avec un train de 120 T remorquées (Train 99 Paris-Royan). La distance est de 70 km 5; il est alloué pour ce parcours 59 minutes y compris le démarrage à Versailles en rampe de 7 m/m et plusieurs ralentissements à 40 kilomètres.

Les trains du service d'été retardés entre Paris et Versailles par suite des travaux de doublement des voies, regagnaient entre Versailles et Chartres tout le temps possible. Il a été constaté avec les machines à simple expansion des durées de parcours de 52^m et de 51^m30. Pour les machines compound, le parcours le plus rapide a été de 53 minutes.

Il est essentiel d'observer que pour les machines de la série 2750 à simple expansion, la vitesse est limitée par la production de la chaudière, qui a seulement 2^m2 de surface de grille. Si cette surface était augmentée de 15 à 20 % et portée à 2^m300 ou 2^m400 comme il a été fait pour la plupart des machines récemment construites, la locomotive à simple expansion deviendrait apte à soutenir d'une manière continue la vitesse de 118 km. en palier ou celle de 100 km. en rampe de 5 m/m avec 100 T remorquées. La machine compound au contraire ne pourra, quand même on accroîtrait dans une mesure quelconque la puissance du générateur, augmenter son effort moteur à moins d'augmenter également les proportions du mécanisme moteur.

Nous ne concluons pas de là que le système compound soit par lui-même impropre à la réalisation des très grandes vitesses. Quelque approfondies qu'aient été les études déjà faites sur ce type de machines, il est possible qu'elles reçoivent encore des perfectionnements : la voie à suivre est même indiquée par les derniers travaux du Chemin de Fer du Nord. Mais une observation semblable s'applique, a fortiori, aux machines utilisant les hautes pressions par simple expansion. Le modèle actuel des Chemins de Fer de l'État constitue un premier essai ; et dès à présent il paraît démontré que la marche de ces machines aux très grandes vitesses sera encore améliorée, non seulement par l'adoption d'un type de chaudière plus puissante, capable d'utiliser leur grande capacité d'effort, et par l'augmentation du timbre porté à 15 k, ou même à 16 kg, ; mais aussi par l'emploi de cylindres distributeurs et de passages de vapeur plus largement proportionnés (Voir annexe A). Il est au moins très probable que dans cette

type Nord à la vitesse maximum de 96 kil. on a trouvé plus haut que la même machine, remorquant 200 T sur la même rampe donne un maximum de 79 kil. Si on interpole entre ces deux chiffres pour un train de 144 T, on trouve 90 kil.

Or nous voyons sur le graphique des expériences rapportées par M. Barbier que le train 12 du 15 Janvier 1897, d'Amiens à Paris, a été remorqué par la machine Nord 2158, avec une charge de 144 T, sur la rampe de 5 m/m existant entre Creil et Survilliers, précisément à 90 km. Au passage des paliers des gares, la vitesse se relevait un peu mais elle tendait ensuite à revenir à 90 km. Une observation semblable s'applique au train 9 du 18 Mars pour le parcours de St-Denis à Survilliers. Le graphique nous montre la valeur de la vitesse tendant vers 90 km. et se relevant seulement au passage des paliers.

La machine 2158 a une chaudière plus puissante que nos 2700, qui sont la reproduction du type 2138 Nord. On voit que le renforcement du générateur n'a pas influé sur le travail moteur effectivement réalisé aux grandes vitesses.

marche parallèle vers le progrès, le système à simple expansion conservera l'avantage pour la traction des trains très rapides: le domaine de la machine compound s'étendant plutôt du côté des trains à marche relativement lente et à très grand effort de traction (Voir annexe B).

Dépense de vapeur par cheval effectif. Comparaison avec les moteurs fixes.

Dans tout ce qui précède, les machines ont été considérées au point de vue des résultats fournis en service: leur valeur comparative a été appréciée d'après les efforts de traction et les vitesses qu'elles sont capables de réaliser. Il y a évidemment un grand intérêt à rapporter le fonctionnement de ces mêmes machines aux unités mécaniques usuelles et à établir ainsi une comparaison avec les moteurs fixes qui, exempts des sujétions spéciales imposées aux locomotives, ont été construits et réglés en vue de l'utilisation la plus parfaite du combustible et de la vapeur produite.

La valeur économique d'un moteur est définie par le *poids de vapeur* exigé pour la production d'un cheval effectif. Le travail effectif est mesuré pour les moteurs fixes sur l'arbre de couche: il doit être pris, pour les locomotives *au contact de la roue motrice et du rail*.

On peut procéder par deux *méthodes*, consistant: l'une dans la mesure du travail moteur transmis par la machine; l'autre dans l'évaluation de la somme des travaux résistants. La première de ces méthodes comporte l'emploi du pendule dynamométrique: la deuxième, encore plus simple comme forme expérimentale, n'exige que des mesures chronométriques avec la connaissance du poids du train et du profil des lignes parcourues. (1) Nous donnerons les résultats de quelques expériences exécutées par cette dernière méthode sur les machines mêmes qui font l'objet de cette étude.

A. — MACHINE N° 2751 (à simple expansion).

Train N° 86 du 24 Novembre 1899. — Temps calme.

Parcours de Château-du-Loir à Chartres: 130 km.

Altitudes 51^m — 143^m. Différence + 92^m.

Composition du train:

2 D ^f	21 ^T
2 voitures Z.....	36
1 restaurant.....	29
3 voitures X.....	30
Voyageurs et bagages.....	16
	132 ^T
Machine et Tender (2/3 de chargement)	96 ^T
	228 ^T

(1) Voir pour le développement de ces méthodes la note intitulée « Puissance et utilisation des machines locomotives » (*Revue Générale*, N° d'Avril 1894).

Le parcours a été effectué en..... 130 minutes.

A déduire : Démarrage à Château-du-Loir.....	1'	}	22'
Arrêt, stationnement, démarrage à Pont-de-Braye.	4		
d° Bessé.....	3		
d° Courtalain ..	8		
d° Brou	3		
Arrêt et démarrage. — Bifurcation Le Mans.....	2		
Arrêt à Chartres	1	}	108'
Reste.....	108'		

Vitesse moyenne 72^k,2. Résistance mesurée directement dans la descente de Droué 6^{km},8 par tonne.

Travail de la résistance au roulement, par tonne 130 × 68 =.....	884 TM
» de la gravité	92
1/2 force vive amortie par les freins.....	100
Travail par tonne.....	1076 TM

Travail total en chevaux-heures $\frac{228 \times 1076}{270} = 909 \text{ ch}^{\text{h}}$.

Dépense d'eau brute 9^T,1.

Dépense brute par cheval-heure $\frac{9.100}{909} =$	10 ^l ,01
A défalquer dépense du frein, de l'arrosage et de l'injecteur.....	0,40
Dépense (nette) de vapeur par cheval effectif (entraînements compris)..	9 ^l ,61

B. — MACHINE N° 2752 (à simple expansion).

Train N° 99 du 30 Novembre 1899. — Temps calme.

Parcours de Chartres à Château-du-Loir : 130 km.

Altitudes : 143 m. — 51 m. Différence : 92 m.

Composition du train :

2 D ^t	23 ^T
3 voitures Z.....	54
1 restaurant... ..	29
Voyageurs et bagages	7
	113 ^T
Machine et tender (2/3 de chargement).....	95
Poids total.....	208 ^T

Le parcours a été effectué en 102 minutes.

A déduire : Démarrage à Chartres.....	1	}	7
Ralentissement à 30 k. à Courtalain..	2		
Arrêt et démarrage à Mondoubleau..	3		
Arrêt à Château-du-Loir.....	1		
Reste.....	95 minutes.		

Vitesse moyenne 82 km. Résistance mesurée directement 7^k,75 par tonne.

Travail de la résistance au roulement, par tonne $130 \times 775 =$	1007 TM
» de la gravité	92
1/2 force vive amortie par les freins.....	70
	985 TM

Travail total en chevaux-heures $\frac{208 \times 985}{270} = 759^{\text{ch}^{\text{h}}}$.

Dépense d'eau brute 7^T,1.

Dépense brute par cheval-heure $\frac{7.100}{759} =$	9 ^l , 35
A défalquer dépense du frein, de l'arrosage et de l'injecteur.....	0, 40
	8 ^l , 95

C. — MACHINE N° 2704 (Compound).

Train N° 99 du 24 Novembre 1899. — Temps calme.

Parcours de Chartres à Château-du-Loir : 130 km.

Altitudes : 143 m. — 51 m. Différence : 92 m.

Composition du train :

2 D ^f	23 ^T
3 voitures Z.....	54
1 restaurant.....	29
Voyageurs et bagages.....	7
	113 ^T
Machine et tender (2/3 de chargement).....	95
	208 ^T

Le parcours a été effectué en 99 minutes.

A déduire : Démarrage à Chartres..... 1	}	4
Arrêt et démarrage à Courtalain 2		
Arrêt à Château-du-Loir..... 1		

Reste..... 95 minutes.

Vitesse moyenne 82 km. Résistance mesurée directement dans la descente de Mondoubleau : 7 k., 7 pour la vitesse moyenne de 82 km.

Travail de la résistance au roulement, par tonne $130 \times 7,7 =$	1001 TM
» de la gravité.....	92
1/2 force vive amortie par les freins.....	60
	969 TM

Travail total en chevaux-heures $\frac{208 \times 969}{270} = 747^{\text{ch}^{\text{h}}}$.

Dépense d'eau brute 7^T,5.

Dépense brute par cheval-heure $\frac{7.500}{747} =$	10 ^l ,04
A défalquer dépense du frein, de l'arrosage et de l'injecteur	0,40
Dépense (nette) de vapeur par cheval effectif (entraînements compris)....	<u>9^l,64</u>

D. — MACHINE N° 2706 (Compound).

Train N° 86 du 30 Novembre 1899. — Temps : vent contraire.
 Parcours de Bessé-sur-Braye au palier supérieur de Boursay : 32 km.
 Altitudes : 72 m. — 202 m. Différence + 130 m.

Composition du train :

2 D ^r	21 ^T
2 voitures Z.....	36
1 restaurant.....	29
3 voitures X.....	30
Voyageurs et bagages	16
	<u>132^T</u>
Machine et tender (2/3 de chargement)	96
	<u>228^T</u>

Le parcours a été effectué en..... 31 minutes.
 A déduire : Démarrage à Bessé..... 1'
 Reste..... 30 minutes.

Vitesse moyenne 62 km. Résistance mesurée directement dans la descente de Droué 6^k,1 par tonne.

Travail de la résistance au roulement, par tonne $32 \times 6,1 =$	195 TM
» de la gravité.....	+ 130
1/2 force vive amortie par les freins.....	20
Travail par tonne.....	<u>345TM</u>

Travail total en chevaux-heures $\frac{228 \times 345}{27} = 288$ ch^h.

Dépense d'eau brute 2^r.750.

Dépense brute par cheval-heure $\frac{2.750}{288} =$	9 ^l ,54
A défalquer dépense du frein, de l'arrosage et de l'injecteur.....	0,40
Dépense (nette) de vapeur par cheval effectif (entraînements compris)...	<u>9^l,14</u>

Le rapprochement des résultats obtenus dans cette série d'expériences, donne lieu à des constatations intéressantes.

On a trouvé pour les machines de la *série compound* :

Au train 99 du 24 Novembre (train rapide, faible charge) une dépense de.....	9 ^l ,64	par cheval effectif
Au train 86 du 30 Novembre (charge plus forte, parcours en rampe).....	9,14	»
Moyenne.....	<u>9,39</u>	»

Avec les machines à *simple expansion* on a obtenu :

Au train 86 du 24 Novembre (parcours en rampe, démarrages nombreux).....	9 ^l ,61
Au train 99 du 30 Novembre (rapide).....	8,95
Moyenne.....	<u>9^l,28</u>

On voit que les résultats moyens sont très sensiblement les mêmes pour les deux séries de machines, avec un léger avantage en faveur de la simple expansion.

Si on considère séparément dans chacune de ces deux séries le service des trains rapides à charge réduite et celui des express ordinaires, caractérisé par un plus grand effort de traction et une vitesse moindre, on voit que la machine compound donne un certain avantage en faveur des trains plus lourds et moins rapides : la machine à simple expansion accuse, au contraire, une supériorité marquée pour les trains rapides à charge réduite.

Dans un roulement qui comprend des trains de l'une et de l'autre sorte, il s'établit une compensation : c'est ainsi que nous avons trouvé pour les deux types de machines les mêmes résultats moyens en service.

Si maintenant on considère les valeurs *absolues* de la dépense par cheval et qu'on les rapproche des chiffres obtenus dans les expériences faites sur des machines fixes, on arrive à ce résultat nettement caractérisé que la locomotive à *simple ou à double expansion*, dans les conditions de régime qu'elle réalise pour le service de nos trains express ou rapides, *constitue un moteur au moins aussi économique que les meilleures machines fixes*, pourvues de distribution dites perfectionnées.

Dans les expériences exécutées au Creusot sur les *machines Corliss* et dont les résultats ont été résumés avec une grande autorité par M. l'Ingénieur en Chef Delafond (1), les chiffres de consommation les plus faibles, constatés à l'allure la plus favorable pour chaque machine, ont été les suivants :

Marche sans condensation : 10^k.74 par cheval effectif.
Marche avec condensation : 9^k.34 »

On voit que la dépense de nos locomotives d'express, dans les conditions moyennes de leur fonctionnement, est de beaucoup inférieure au premier de ces deux chiffres, et très sensiblement égal au second.

Le chiffre de dépense le *plus faible* en valeur absolue est celui qui a été fourni par la locomotive

(1) *Annales des Mines*. Année 1884.

à simple expansion dans le service des trains rapides, c'est-à-dire avec une vitesse de 250 à 300 tours et une introduction aux cylindres de 25 à 30 %; la pression de régime étant maintenue à 14 kilog. :

Une machine d'atelier qui réaliserait le même type de construction et fonctionnerait dans les mêmes conditions de régime n'aurait pas seulement sur les moteurs spéciaux l'avantage du prix d'acquisition, du poids et de l'encombrement : elle procurerait encore une *économie de combustible*

Dépense totale en service de la machine à simple expansion et de la machine compound.

Dans l'étude comparative que nous avons faite des machines d'express à simple et à double expansion, nous nous sommes exclusivement attaché à la considération du *service fait* : et la consommation de vapeur elle-même a été envisagée spécialement au point de vue du *travail produit*.

Il convient de considérer également le côté pécuniaire de la question.

La comparaison doit porter : 1° sur le prix d'acquisition ; 2° sur la dépense en matières consommables, combustible et graissage ; 3° sur les frais d'entretien.

a) Le prix d'acquisition est nécessairement plus élevé pour la locomotive compound qui comporte quatre mouvements complets et un arbre coudé, que pour la machine à simple expansion. La différence a été évaluée par M. l'Ingénieur en chef Salomon (*Revue Générale*, n° de Septembre 1897), à 12,000 fr. : en admettant qu'elle puisse s'abaisser jusqu'à la moitié de ce chiffre, et en prenant seulement 5 % pour l'intérêt et l'amortissement du capital, on devra compter une dépense annuelle de 300 fr., soit à raison de 100.000 kil. parcourus, 0 fr. 003 par kilomètre.

b) La dépense en combustible est égale pour les deux types de machines. La dépense de graissage est plus forte pour les machines compound d'environ 8 grammes par kilomètre ; c'est un excédent de $0 \text{ k. } 008 \times 0 \text{ fr. } 50 = 0 \text{ fr. } 004$ par kil.

c) Les frais d'entretien courant sont nécessairement plus élevés dans le cas de la machine à quatre cylindres. On peut compter pour les levages et les révisions périodiques un excédent de dépense d'environ 200 fr. par an, soit par kilomètre 0 fr. 002.

d) La nécessité de remplacer après un certain parcours les essieux coudés est une cause de dépense importante à la charge de la machine compound (1).

Nous nous abstenons de donner une évaluation de la dépense spéciale due à cette cause ; nous bornant à constater qu'elle s'ajoute à l'excédent déjà relevé pour l'intérêt du prix d'achat, le graissage et l'entretien courant et qui, d'après les évaluations données plus haut, serait de 0,009 par kilomètre de train ; soit environ 3 % de la dépense totale de traction.

(1) Nous devons constater toutefois que dans les machines récemment construites, la durée de service de ces essieux paraît être sensiblement prolongée. Sur les 6 machines qui nous ont été livrées en 1897 par la Société alsacienne et qui ont effectué des parcours de 220 à 250.000 kil., aucun essieu n'accuse encore de traces de fatigue.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Nous résumerons les faits principaux qui ressortent de cette étude, en suivant l'ordre dans lequel ils se sont présentés, et en nous maintenant rigoureusement sur le terrain des constatations expérimentales.

1° Les *pressions élevées* introduites depuis quelques années dans le régime des locomotives peuvent être *très avantageusement utilisées, sans qu'il soit nécessaire de recourir à la double expansion*, principalement dans le service des trains express et rapides, *en admettant la vapeur vive*, sur une fraction de course comprise entre 25 et 35 %, dans des *cylindres de dimensions modérées*, avec d'assez grands espaces morts et des passages de vapeur largement proportionnés.

2° Si on compare, en service, deux séries de machines d'express :

L'une à *simple expansion* avec des cylindres de 0^m,44 de diamètre sur 0^m,65 de course ; roues de 2^m,03 ; timbre 14 kil., tiroirs cylindriques :

L'autre du type *compound*, à quatre cylindres : de 0^m,34 et 0^m,52 de diamètre sur 0^m,65 de course, roues de 2^m,13 ; timbre 15 kg., tiroirs plans ;

les deux séries de machines ayant des chaudières d'égale puissance et sensiblement les mêmes poids sur les essieux,

On est conduit aux constatations suivantes :

a) La machine à *simple expansion* est capable de développer, à toutes les vitesses, un effort au moins égal à celui de la machine *compound*. Aux vitesses faibles, ou modérées (démarrages : traction de trains lourds en rampes prolongées), le *maximum* d'effort est sensiblement le même de part et d'autre ; aux grandes vitesses (trains express sur profil facile, et trains rapides proprement dits), l'effort réalisé par la machine à *simple expansion* est plus grand que celui de la machine *compound* : la différence va en s'accroissant aux vitesses extrêmes. Au-dessus de 100 kilomètres la machine *compound* ne peut plus remorquer, même en palier, que des charges très réduites, quelle que soit d'ailleurs la production de son générateur : la machine à *simple expansion*, au contraire, pourra remorquer, jusqu'aux vitesses de 110 et même 120 kil., des trains relativement lourds, sous la seule condition d'avoir une puissance suffisante de la chaudière.

b) La dépense de vapeur nécessaire à la production d'un même effort de traction est très sensiblement la même pour les deux types de machines, dans toute l'échelle des vitesses habituellement admises aux trains express.

La production des grands efforts à faible vitesse (période initiale des démarrages) coûte moins de vapeur avec la machine *compound* ; mais il n'en résulte pas de différence dans l'énergie des démarrages. Aux très grandes vitesses (trains rapides et extra-rapides) la machine à *simple expansion* devient la plus économique, en même temps que la plus énergique.

La machine *compound* aura l'avantage au point de vue de l'énergie comme de l'économie dans un cas unique, celui où on voudrait faire remorquer par des locomotives d'express, à défaut d'un type approprié, des charges exceptionnellement élevées sur de fortes rampes continues.

c) La dépense d'eau par cheval effectif, dans les conditions de service normal des trains

express, est d'environ 9 litres 1/2, tant pour la locomotive à *simple expansion*, que pour la machine *compound*. Dans ces conditions de régime, la machine locomotive est aussi économique que les moteurs fixes considérés comme les plus parfaits.

Aux très grandes vitesses (250 à 300 tours), la dépense de la locomotive à simple expansion s'abaisse jusqu'à 9 kg 0. : cette machine atteint alors un *rendement supérieur à celui des meilleurs moteurs fixes, travaillant avec ou sans condensation*.

Au point de vue pratique et économique, la comparaison entre la locomotive à simple expansion avec tiroirs cylindriques, et la machine *compound* à quatre cylindres donne lieu aux observations suivantes :

d) La conduite de la machine à simple expansion est plus facile que celle de la machine *compound* ; elle peut être confiée à des agents moins expérimentés sans qu'on ait à craindre de voir l'utilisation économique compromise par un réglage défectueux de la détente.

e) La dépense de graissage est sensiblement plus faible pour la machine à simple expansion.

f) La dépense des levages et de l'entretien courant est moindre pour la machine à simple expansion que pour la machine à quatre cylindres. On économise, en outre, la dépense afférente au remplacement des essieux coudés.

g) Pour l'exécution d'un même service, le capital engagé est moindre avec l'emploi des machines à simple expansion.

En résumé :

Pour le service des *trains express ordinaires*, les deux types de machines sont *équivalents* comme *production de travail* : la machine à *simple expansion* a l'*avantage économique* ;

Pour le service des *trains rapides et extra-rapides*, la machine à *simple expansion* l'emporte comme *production de travail*, et comme *économie*.

Pour remorquer exceptionnellement, *sur de fortes rampes*, des trains chargés jusqu'à la *limite d'effort utilisable*, la machine *compound express* développera plus de puissance et aura une consommation moindre que la machine *similaire* à simple expansion. Avec un *diamètre de roues approprié* à cette nature de service, la machine à simple expansion retrouvera ses avantages.

ANNEXE A.

Résultats obtenus avec des cylindres de diamètre variable appliqués à une même locomotive.

Les machines de la série 2750 ont fourni les éléments d'une étude comparative très intéressante, sur l'effet produit par une variation de diamètre des cylindres, au point de vue du *rendement mécanique et économique*.

On a vu que, sur les quatre machines de cette série, *deux* avaient reçu à la construction des cylindres de 0^m44 de diamètre (N^{os} 2751-2752), les *deux* autres des cylindres de 0^m46 de diamètre (N^{os} 2753-2754).

D'autre part on a, ultérieurement, ramené à 0^m42 le diamètre des cylindres de la machine 2753, par l'addition d'une fourrure intérieure.

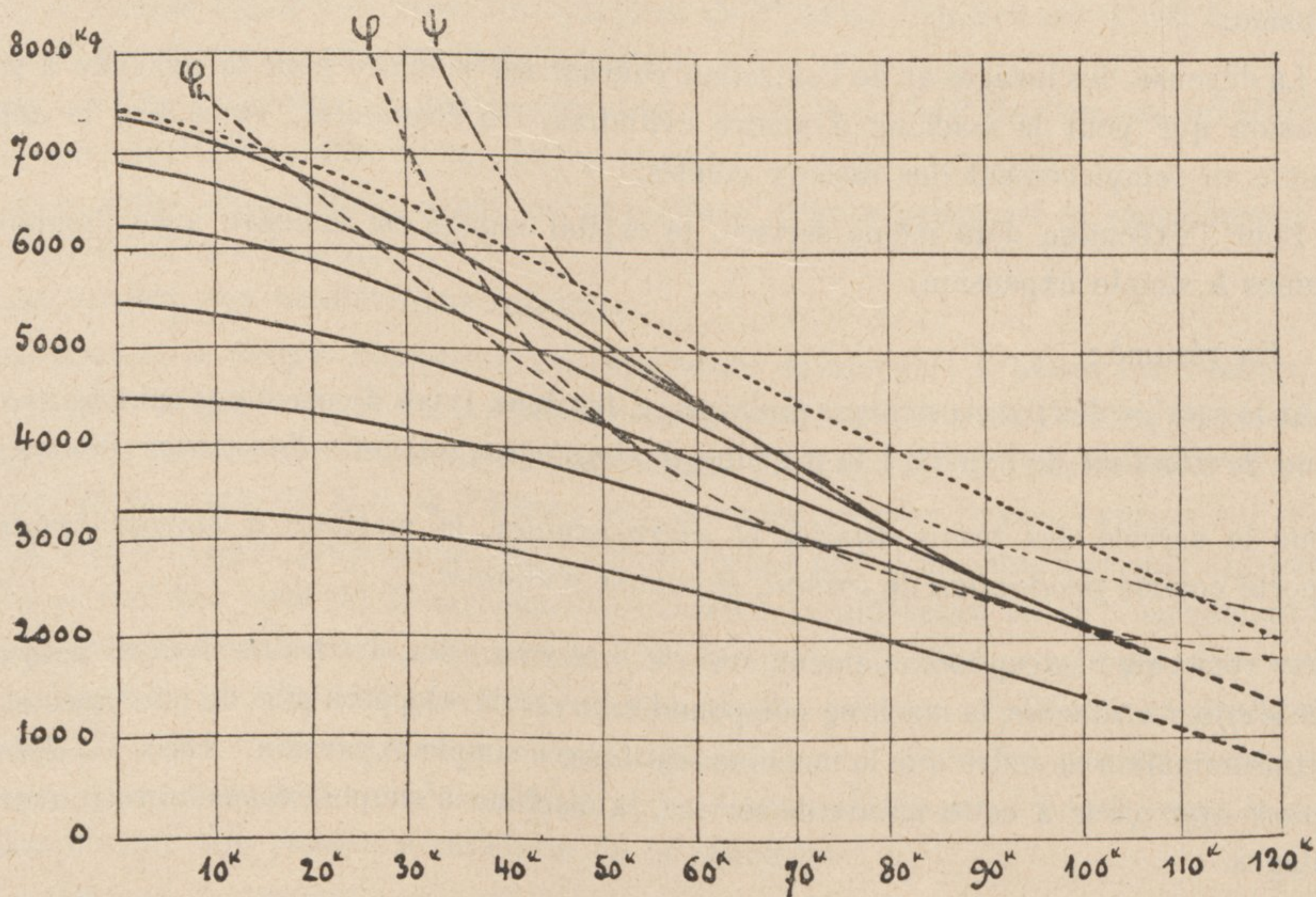
On s'est donc trouvé posséder, pour une série de machines *d'ailleurs identiques entre elles*, une véritable *échelle de diamètres* : circonstance particulièrement favorable pour étudier l'influence du volume des cylindres sur le fonctionnement général du moteur.

On a suivi pour cette étude la même méthode que pour la comparaison entre la machine à simple expansion du type normal, et la machine compound.

1^o MACHINE
A CYLINDRES
AGRANDIS.

Le digramme n^o III ci-dessous est celui de la machine 2754, à cylindres de 0^m46 de diamètre. Nous le comparerons avec celui de la machine 2752 à cylindres de 0^m44 (diagr. I page 301).

DIAGRAMME III.



On constate, à première vue, que les courbes *d'effort réalisable* aux différentes admissions s'abaissent *bien plus rapidement* dans le cas de la machine à cylindres agrandis. L'amointrissement de l'effort utile est surtout accusé pour les admissions supérieures. C'est ainsi qu'avec une introduction de 50%, on tombe de 6300 kilogr., valeur initiale, à 4500 kilogr. pour la vitesse de 60 kilom. : et à 2100 kilogr. pour celle de 100 kilomètres.

La comparaison entre les deux machines devient bien sensible, si on reporte sur le diagr. N^o III la courbe *enveloppe* des efforts fournie par le diagramme N^o I. On constate que pour toutes les vitesses, la machine à cylindres agrandis donne un maximum d'effort *plus faible*, avec une *admission égale ou plus grande* et par conséquent avec un excès de dépense.

La différence, peu marquée aux faibles vitesses, est très appréciable à l'allure de 60 kilom. ; aux vitesses des trains rapides l'infériorité d'effort atteint et dépasse 30 %. On peut prévoir avec certitude que dans ces conditions la machine à cylindres agrandis donnera des résultats inférieurs sous le double rapport de la *puissance* et de l'*économie*.

Les machines 2753 et 2754 ont été mises en service dans le roulement des express de Thouars, concurrentement avec les machines 2751 et 2752 et avec les machines compound type Nord. Elles ont assuré ce service dans des conditions convenables, mais en réalisant avec difficulté les vitesses extrêmes, et surtout en *montant péniblement les rampes* avec des trains lourds.

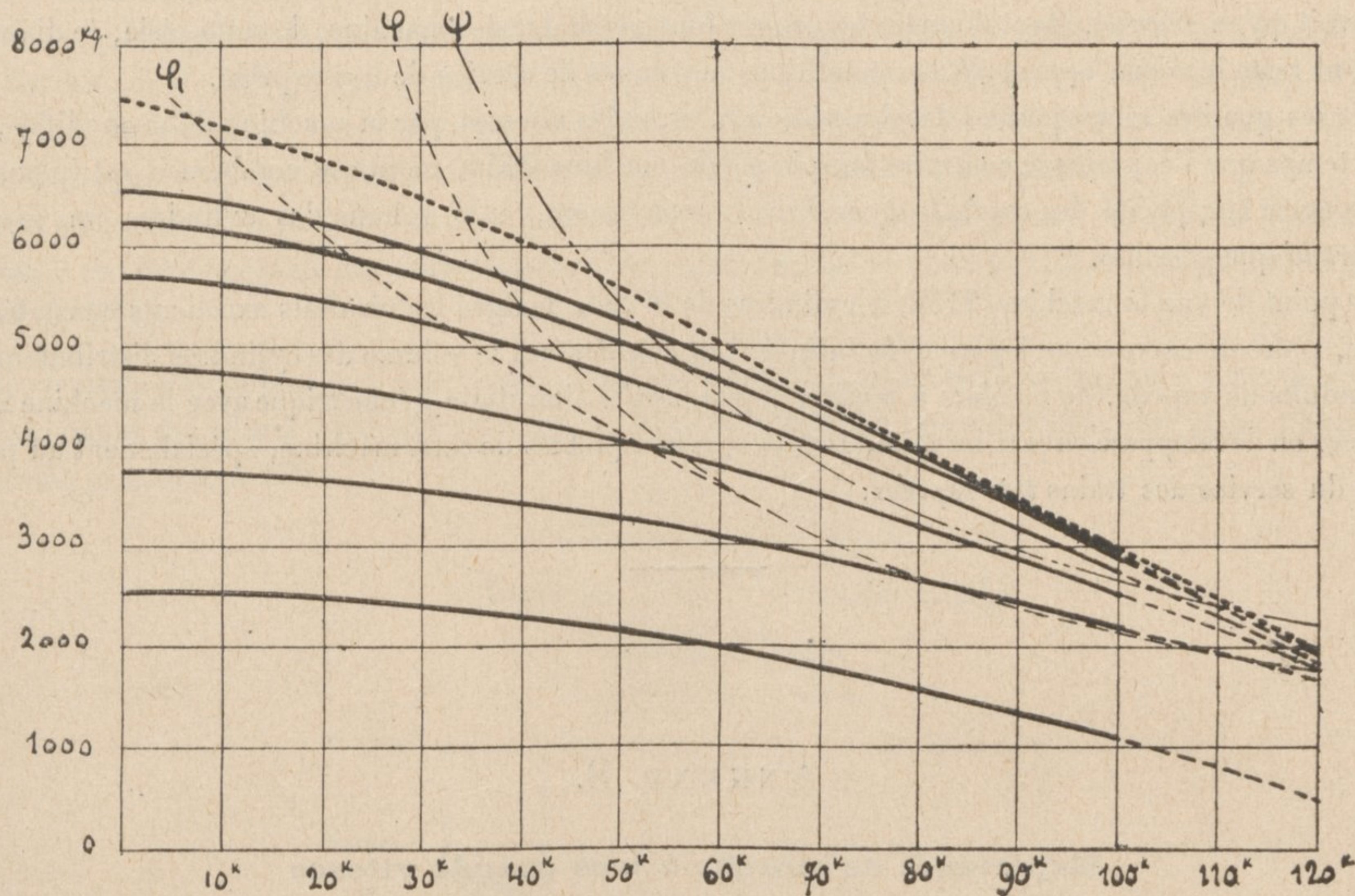
Elles ont accusé sur l'ensemble des autres machines d'express, et en particulier sur le groupe des machines 2751 et 2752 un *excès de consommation* d'environ 10 %.

Elles n'ont pas été employées au service des rapides pour lequel elles auraient eu une consommation d'eau exagérée (1).

Ainsi qu'il a été dit plus haut, la machine 2753 a été modifiée par l'addition, à l'intérieur de ses cylindres, d'une fourrure en fonte qui en ramène le diamètre à 0^m,42.

Le diagramme N° IV ci-dessous, fait voir la modification profonde qui en est résultée pour le régime de cette machine.

DIAGRAMME IV.



La valeur *initiale* de l'effort, pour chaque degré d'admission se trouve naturellement, diminuée. Mais cet effort se soutient d'une manière tout à fait remarquable aux grandes vitesses, particulièrement pour les admissions élevées.

Aux vitesses très faibles, le maximum d'effort de la machine modifiée est de 6500 kilogr., tandis que la machine 2754 donne 7400 kilogr.. Mais à la vitesse de 40 kilom. l'effort maximum est devenu le même pour les deux machines. A 80 kilom. l'effort des cylindres de 0^m,42 l'emporte de 600 kilogr. sur celui des cylindres de 0^m,46.

Comparée avec la machine 2752, à cylindres de 0^m,44 (diagr. I page 301) la machine 2753 modifiée accuse un effort inférieur, aux vitesses faibles ou moyennes : mais la différence s'atténue rapidement à

(1) Nos trains rapides 98 et 99 parcourent sans arrêt la distance de 239 kilomètres entre Chartres et Thouars. Une étape de cette longueur ne peut être franchie, même avec un tender de 20 tonnes, que par des machines à faible consommation.

2^o MACHINES
A CYLINDRES
RÉDUITS.

mesure que la vitesse augmente. A 100 kilomètres le maximum est le même de part et d'autre: 2800 kilogr. soit 400 kilogr. de plus que pour la machine *compound* et 800 kilogr. de plus que pour la machine à grands cylindres.

Ce *maximum* d'effort est obtenu pour la machine 2752 avec une admission de 30 à 35 % : pour la machine 2753 modifiée il exige une admission d'environ 60 % : l'avantage économique doit être en faveur de la première. Mais si, à la même vitesse, on a besoin de réaliser un effort un peu moindre que le *maximum*, par exemple 2400 kilogr. chiffre encore supérieur à ce qui est nécessaire pour la traction d'un train rapide, on voit que l'effort exigé sera atteint par la machine 2752 avec 26 % d'admission, par la machine 2753 avec 30 à 32 %. Le volume de vapeur sera sensiblement le même dans les deux cas, et on peut prévoir que le rendement économique sera le même de part et d'autre.

En fait on a constaté que les deux machines développent exactement la même puissance et réalisent sensiblement les *mêmes résultats économiques* dans le service des *trains rapides*.

Pour la traction des trains à fortes charges circulant sur des lignes accidentées, la machine à cylindres *réduits* est moins avantageuse que la machine à cylindres *moyens* : mais elle l'emporte, comme *puissance* et comme *économie*, sur la machine à *grands* cylindres.

On voit qu'en résumé, étant données les proportions générales des machines de cette série, le diamètre de 0^m,44 reste le mieux approprié aux conditions moyennes de service de nos express.

Mais les qualités remarquables développées aux grandes vitesses par la machine 2753 modifiée, en même temps que l'expérience contraire fournie par la machine 2754, montrent combien il est important d'avoir entre la capacité des *conduits de vapeur* et *espaces morts*, et le volume des cylindres un *rapport* aussi *grand* que possible.

A ce point de vue la machine 2752, à cylindres de 0^m,44, malgré les résultats excellents constatés en service, présente encore une légère défectuosité : en augmentant le volume des cylindres distributeurs et des conduits de vapeur, de manière à réaliser à peu près la similitude géométrique avec la machine 2753 modifiée, on développera encore les qualités déjà si remarquables de cette machine, spécialement au point de vue du service des *trains très rapides*.

ANNEXE B.

Expérience de marche à très grande vitesse

TRAIN SUD-EXPRESS-MIDI.

La rédaction de cette Note était terminée, lorsque nous avons eu l'occasion, grâce à l'obligeance de M. Moffre, Ingénieur en chef du matériel et de la traction de la Compagnie du Midi, d'expérimenter une des machines de la série 2750, dans des conditions de vitesse qu'il est interdit de réaliser sur les lignes accidentées du réseau de l'État.

La machine 2752 a été affectée pendant une période de quelques semaines à la traction du train « Sud-Express » entre Bordeaux et Hendaye.

La marche de ce train sur la section de Bordeaux à Bayonne (198^{km}) est tracée, dans les deux sens, à la vitesse exceptionnelle de *cent kilomètres*.

La composition normale pendant la saison d'hiver (1) est de deux grandes voitures sleeping, un wagon-

(1) La charge est plus forte dans la saison d'été : il est ajouté *une* et parfois *deux* grandes voitures sleeping.

restaurant, et deux fourgons de la Compagnie des wagons-lits, formant avec leur chargement, un poids moyen de 125 tonnes.

Le profil de la section parcourue, sans offrir de difficultés particulières, présente néanmoins dans chaque sens, des rampes prolongées de 5^m/m. Les deux points extrêmes de la ligne sont à la même altitude.

La Compagnie du Midi assure normalement le train « Sud-Express » avec ses puissantes machines compound série 1751, dont la surface de grille est de 2^{m²} 46 et qui, attelées avec un tender de 16 mètres cubes de capacité, pèsent en ordre de marche 90^r, ce qui porte à 215^r le poids brut du train.

La machine 2752 État, avec son tender à bogies contenant 20 mètres cubes d'eau, forme un poids de 100^r, en ordre de marche, mais si l'on tient compte seulement de la valeur du chargement moyen, on peut estimer à 7 tonnes la surcharge résultant de l'excès de poids du tender (1).

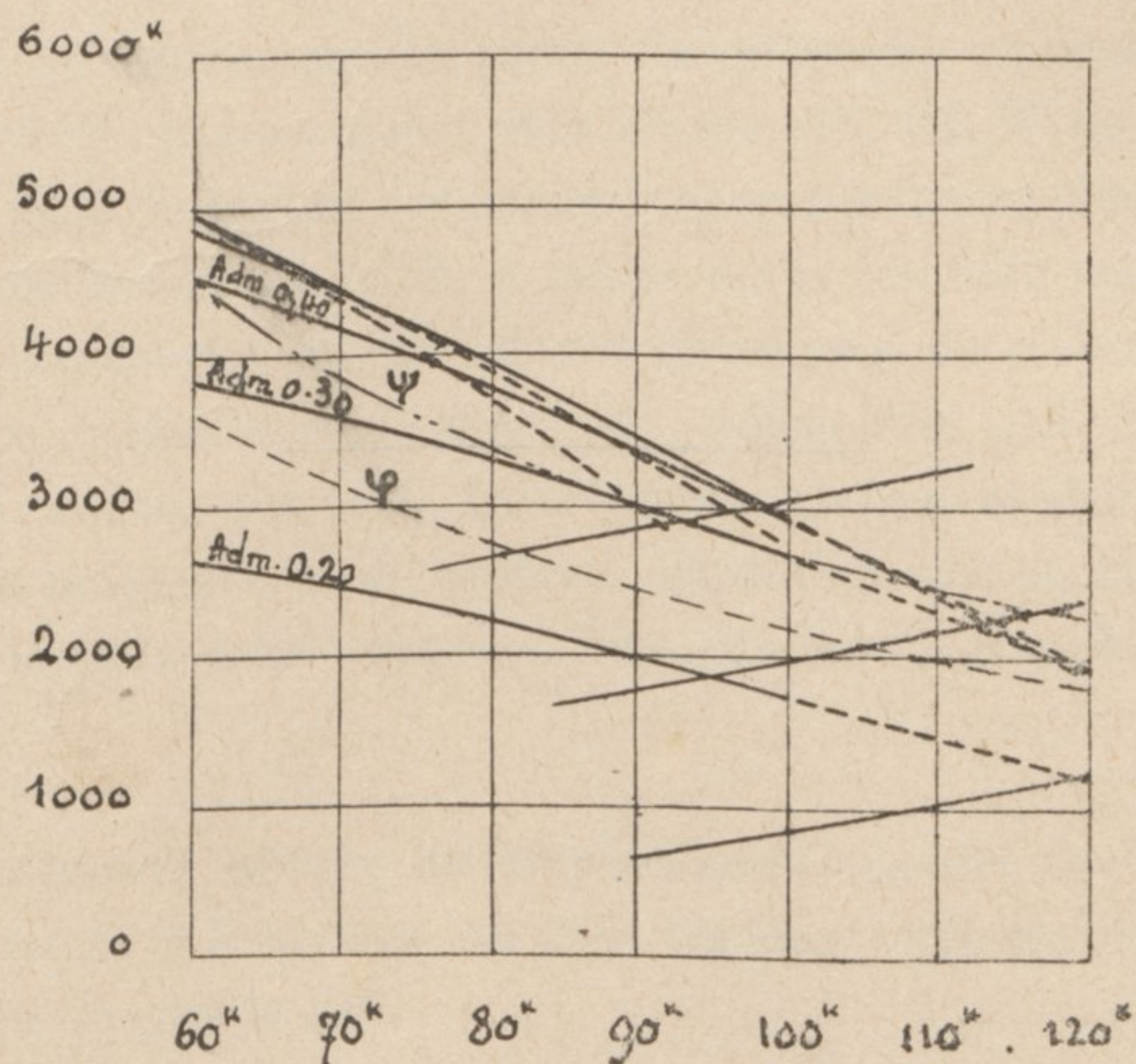
Dans un premier parcours d'essai, aller et retour, aux trains 41 et 40, il a été perdu, par suite d'un peu d'hésitation dans les démarrages, 3 minutes à l'aller, 1 minute 1/2 au retour. Les trains suivants ont été faits exactement à l'heure.

D'une manière générale, la vitesse soutenue dans les parties de lignes en palier a été de 102 à 105 kil. Sur les rampes de 5^m/m, qui se rencontrent après le démarrage à Bordeaux (sens impair) et à Dax (sens pair), on a constaté une vitesse progressivement croissante jusqu'à 88 kil. Sur les pentes de 5^m/m, l'allure atteignait rapidement 120 kil., avec une tendance marquée à l'accélération.

Dans quelques essais partiels, on s'est proposé d'atteindre, soit en palier, soit en rampe, le maximum réalisable en interrompant momentanément l'alimentation. On a obtenu 112 kil. en palier, 95 kil. en rampe de 5^m/m.

Ces résultats s'accordent très exactement, ainsi qu'il est facile de le reconnaître, avec ceux que fournit le diagramme des efforts réalisables (Diagr. p. 301, partiellement reproduit ci-après), dans l'hypothèse d'un train pesant brut 220^r.

Machine N° 2751
Train de 220^r. (Poids total)
(Sud express)



(1) On doit noter, d'autre part, que le tender à bogies présente, à cause du moindre diamètre des roues, un surcroît de résistance au roulement.

Dans tout le cours des essais, et à l'exception des démarrages, l'admission de vapeur aux cylindres a été maintenue entre 25 % — régime normal pour la marche en palier — et 32 % à la montée des rampes de 5 m/m. Il n'a donc jamais été fait usage du maximum d'effort réalisable : c'est toujours par la *production de la chaudière* (courbe φ) que les *valeurs* de l'effort, et par suite *de la vitesse se sont trouvées limitées*.

Consommation d'eau et de combustible. — Les consommations d'eau et de combustible ont été relevées avec grand soin par la Compagnie du Midi. Il a été trouvé comme dépense kilométrique moyenne :

Eau (Service du frein, des injecteurs et de l'arrosage compris)	68 litres, 9
Combustible (Allumage et stationnements compris)	9 kg, 47.

Si l'on défalque pour l'eau la dépense de la pompe et la perte des injecteurs, évaluées ensemble à 3 %, et pour le combustible, l'allumage évalué à 10 % (soit 200 kg. par allumage), il reste pour la dépense kilométrique de traction :

Eau	67 litres, 0
Charbon	8 kg, 58

Le calcul du travail de traction, effectué suivant la méthode indiquée page 21, donne, par kilomètre, 7,8 chevaux-heures.

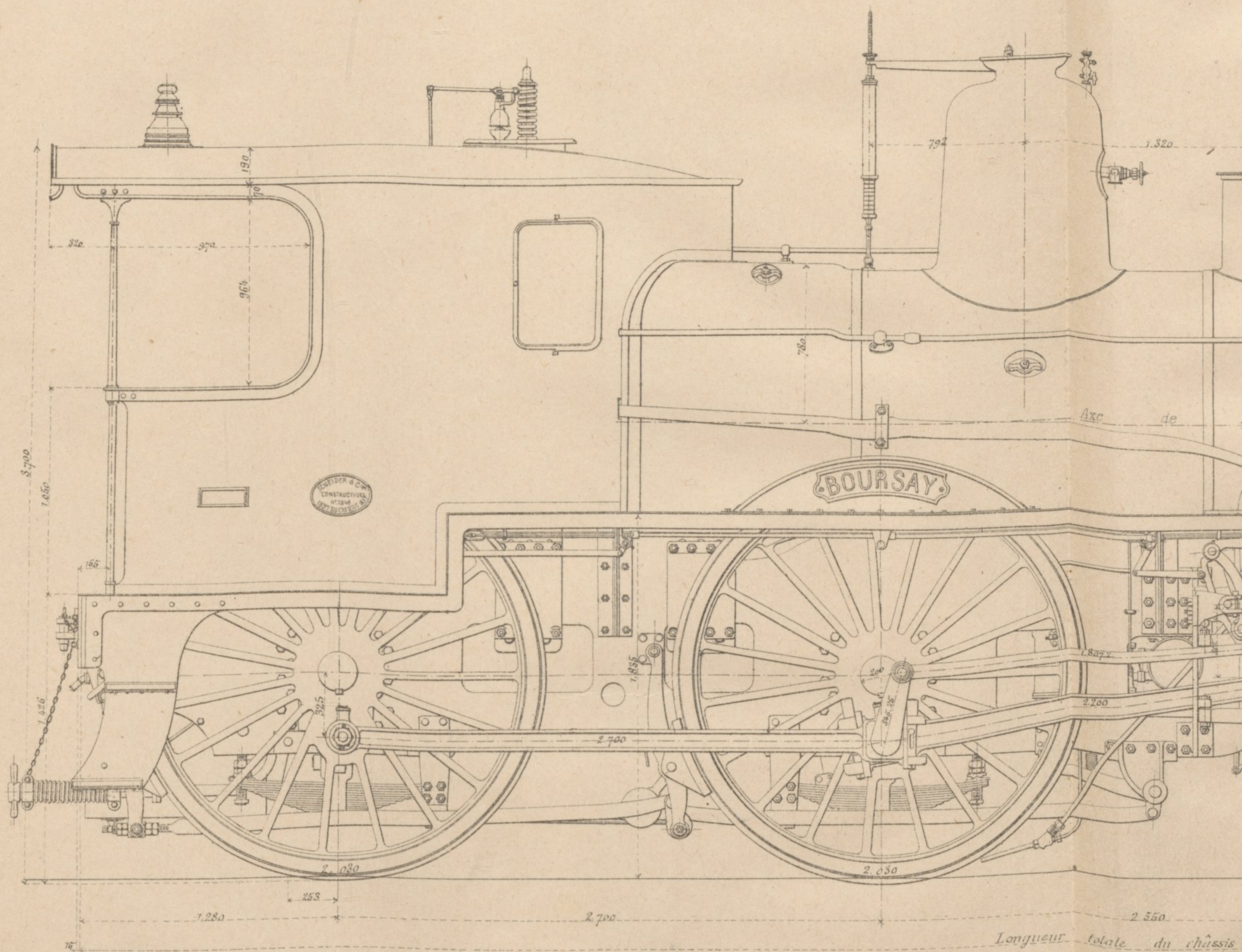
La dépense d'eau ressort à $\frac{6,7}{7,8}$, soit 8^l,58 par cheval et par heure.

La dépense de charbon est de $\frac{8,58}{7,8} = 1^{\text{kg.}}$, 10 par cheval-heure effectif.

Ces résultats confirment, en les accentuant, les observations déjà faites sur l'excellence du rendement économique des machines de ce type, fonctionnant à une allure rapide.

(Fin.)

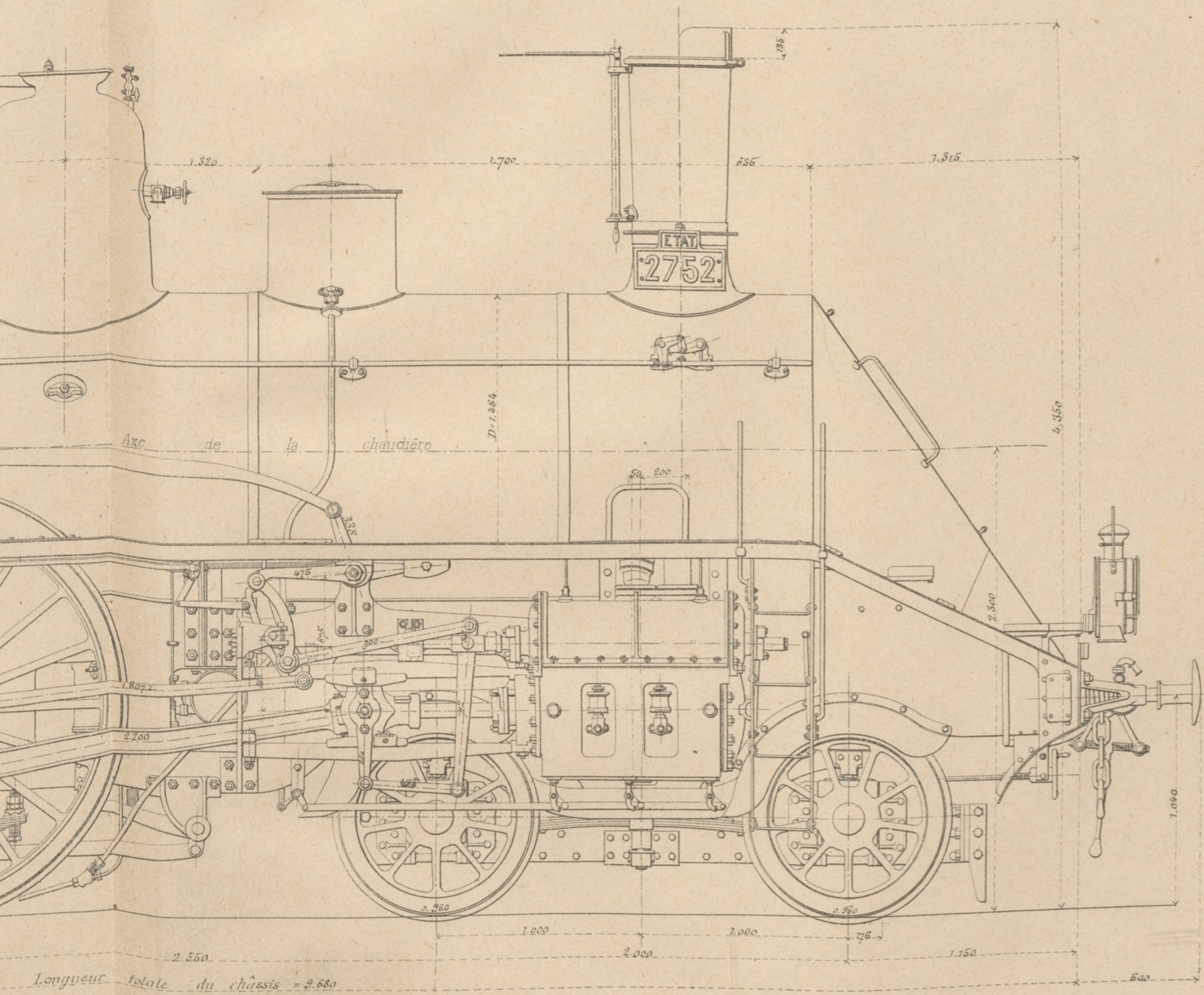
Elevation
Echelle 1/30



Légende

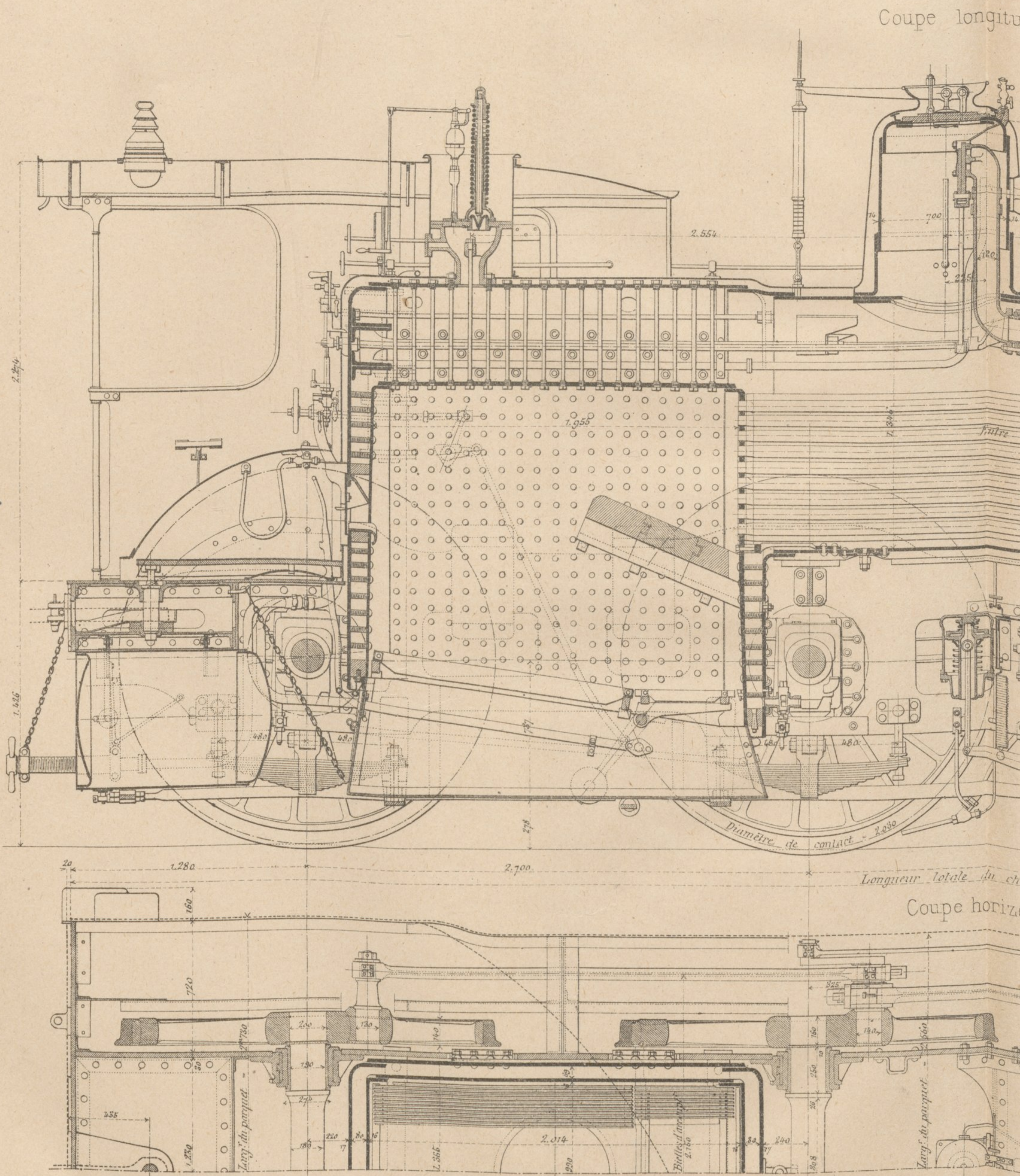
Poids de la machine à vide	46.200 ^k	Timbre de la chaudière	14 ^k	Surface de chauffe t
Eau dans la chaudière et combustible	4.500 ^k	Nombre de tubes (système Serve)	111	Surface de la grille
Poids de la machine en service	50.700 ^k	Longueur des tubes	3 ^m 582	Longueur totale de
Charge sur les roues couplées	29.800 ^k	Diamètre intérieur des tubes	0 ^m 060	Largeur totale de la
Charge sur les roues porteuses	20.900 ^k	Surface de chauffe des tubes	147 ^m 2	Diamètre des cylind
Diamètre moyen de la chaudière	1 ^m 363	Surface de chauffe du foyer	11 ^m 2 10	

Élévation
Echelle 1/30

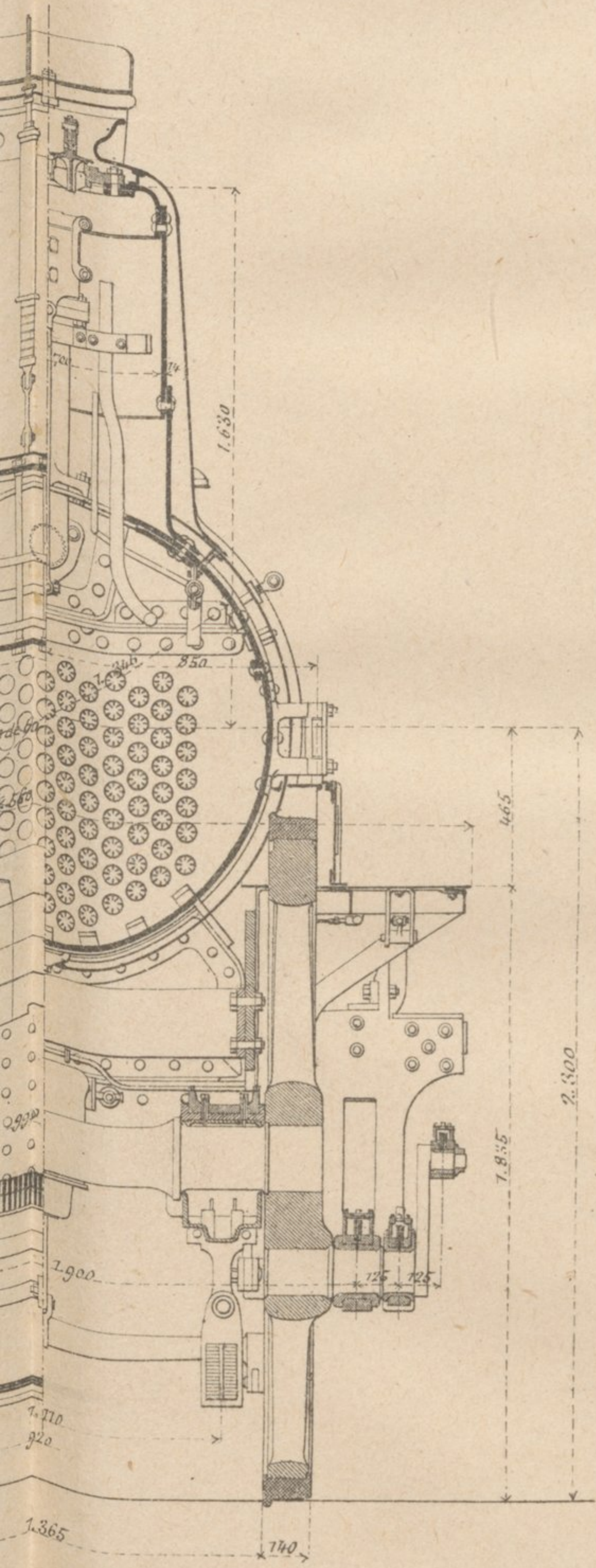


Légende

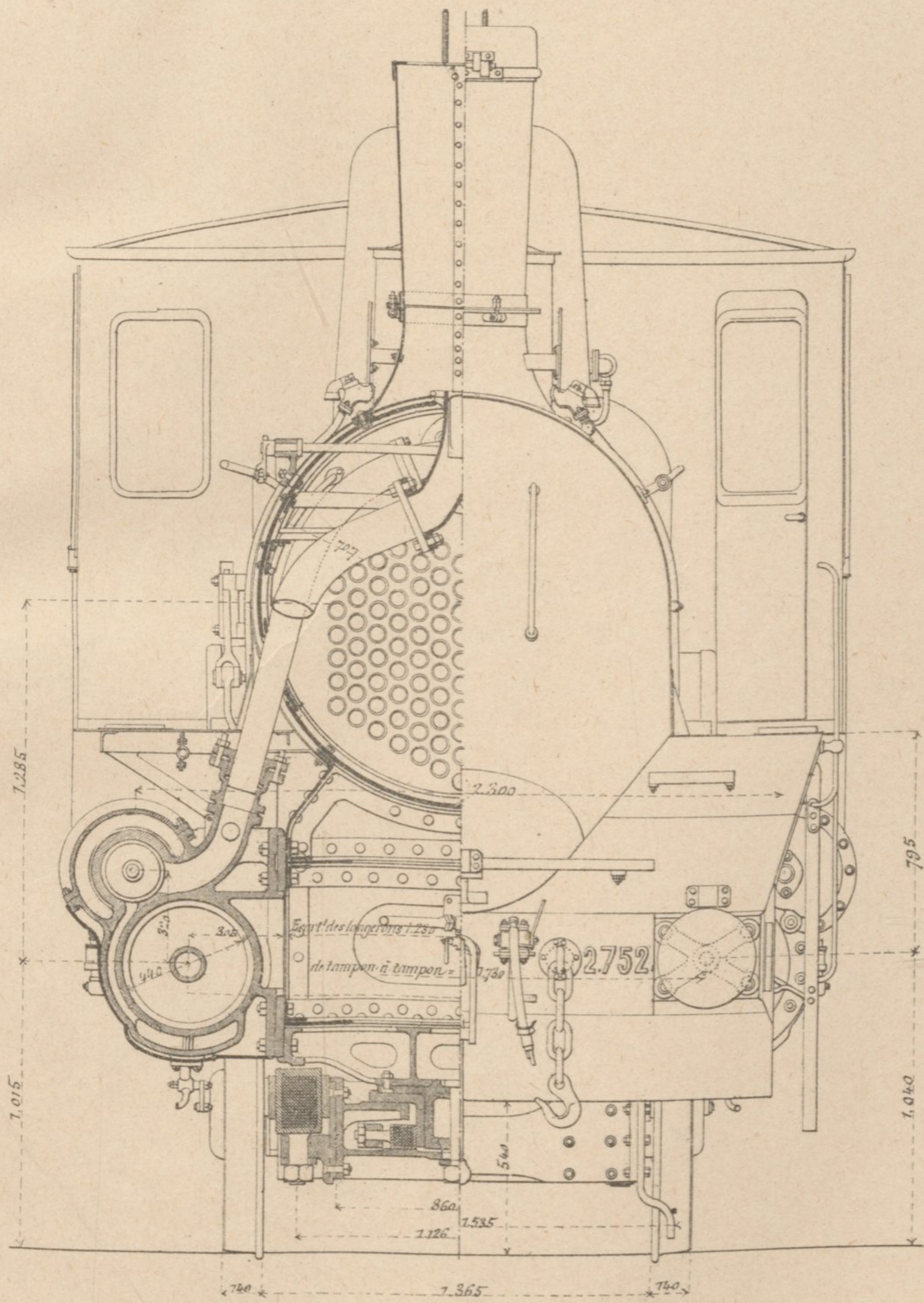
14 ^k	Surface de chauffe totale	158 ^{m²} 10	Courses des pistons	0 ^m 650
111	Surface de la grille	2 ^{m²} 01	Diamètre des roues couplées	2 ^m 030
3 ^m 582	Longueur totale de la machine	10 ^m 295	Diamètre des roues porteuses	0 ^m 960
0 ^m 060	Largeur totale de la machine	3 ^m 020	Ecartement des essieux extrêmes	7 ^m 250
147 ^{m²}	Diamètre des cylindres	0 ^m 440	Empatement	7 ^m 679
11 ^{m²} 10				



Demi-coupe
par l'essieu moteur



Demi-coupe
par la boîte à fumée



Demi-vue d'avant

chelle 1/30

Fig.1. Coupe longitudinale du cylindre suivant Xyy'Z

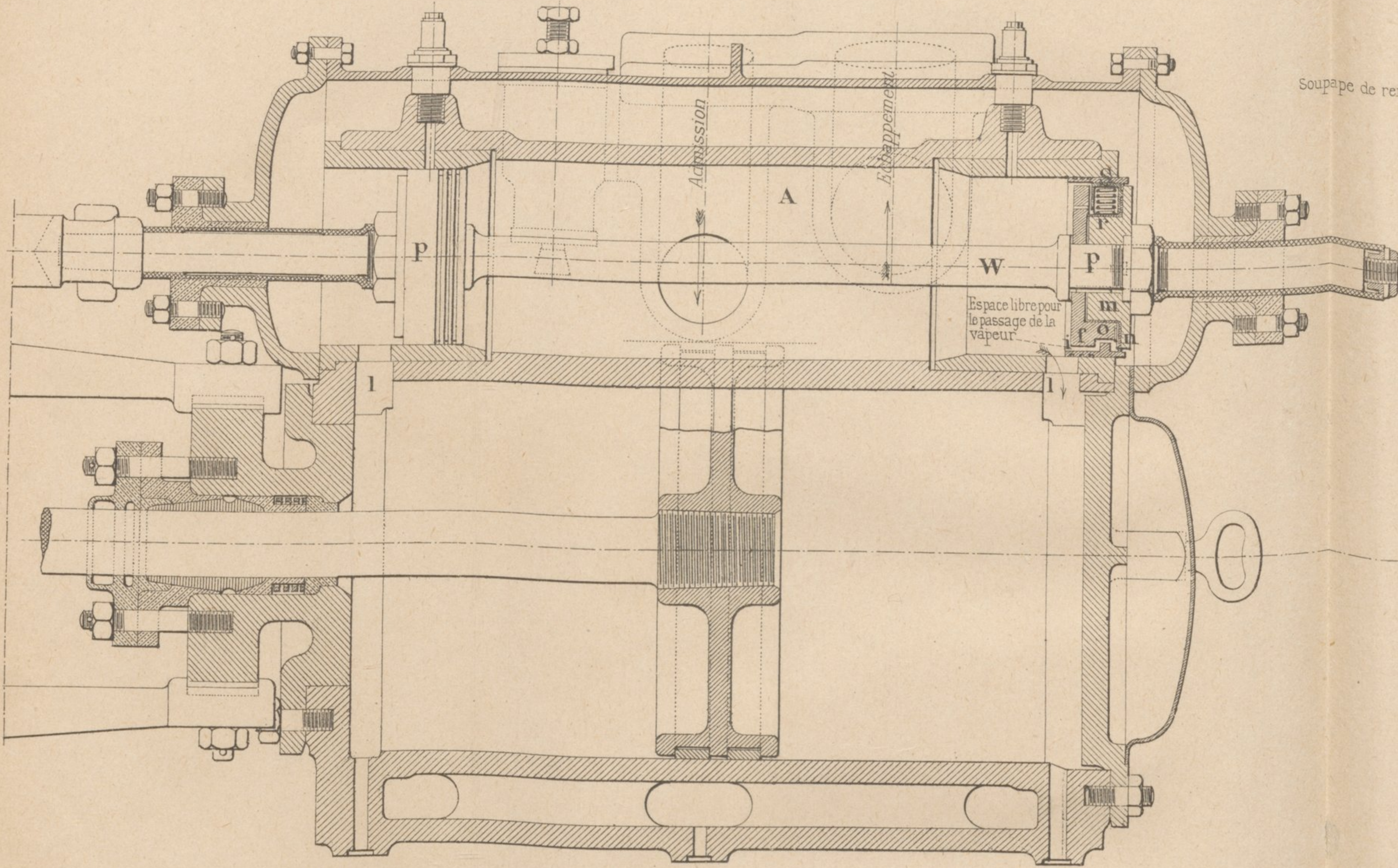


Fig.3.

Fig.4.

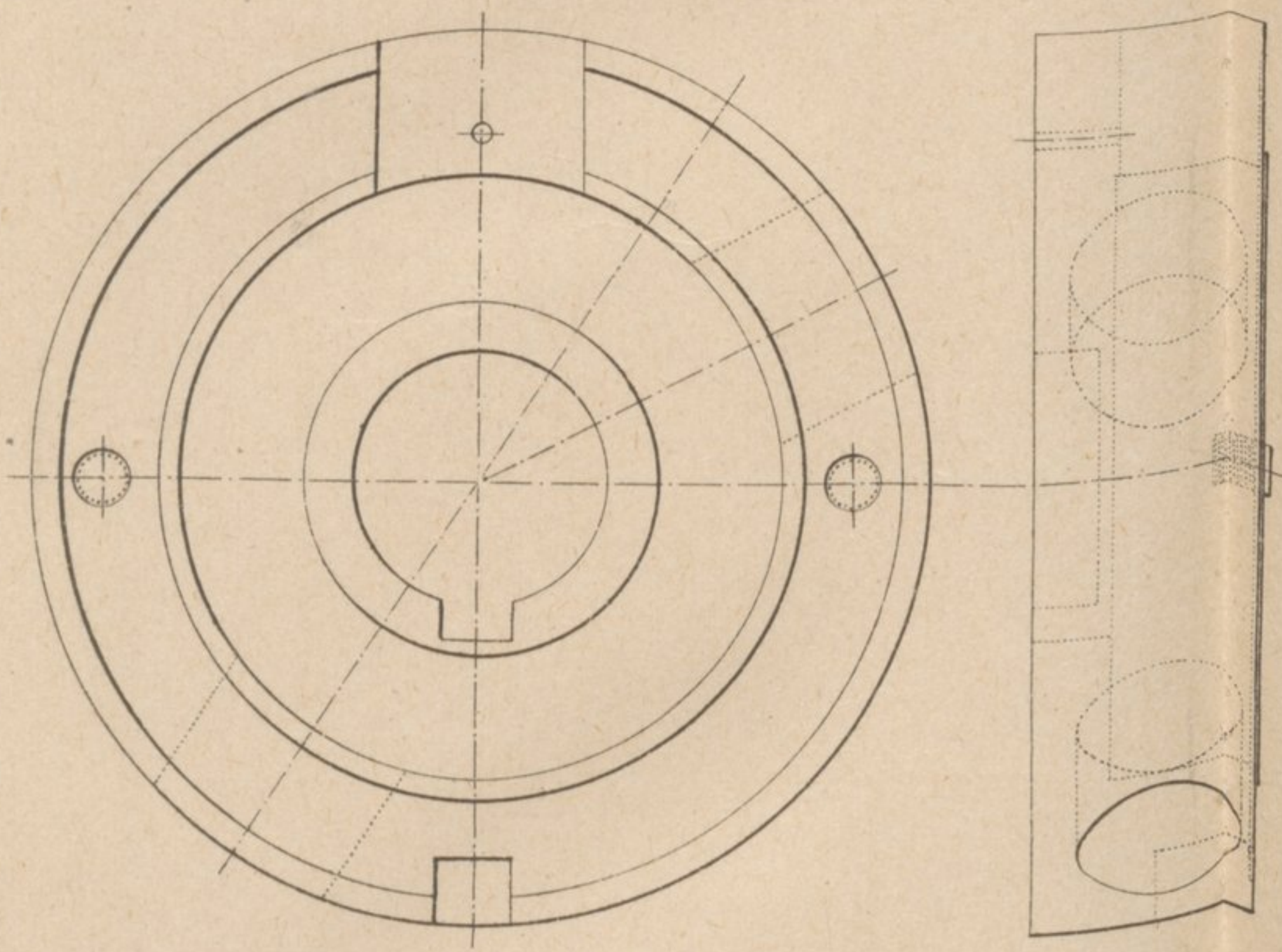
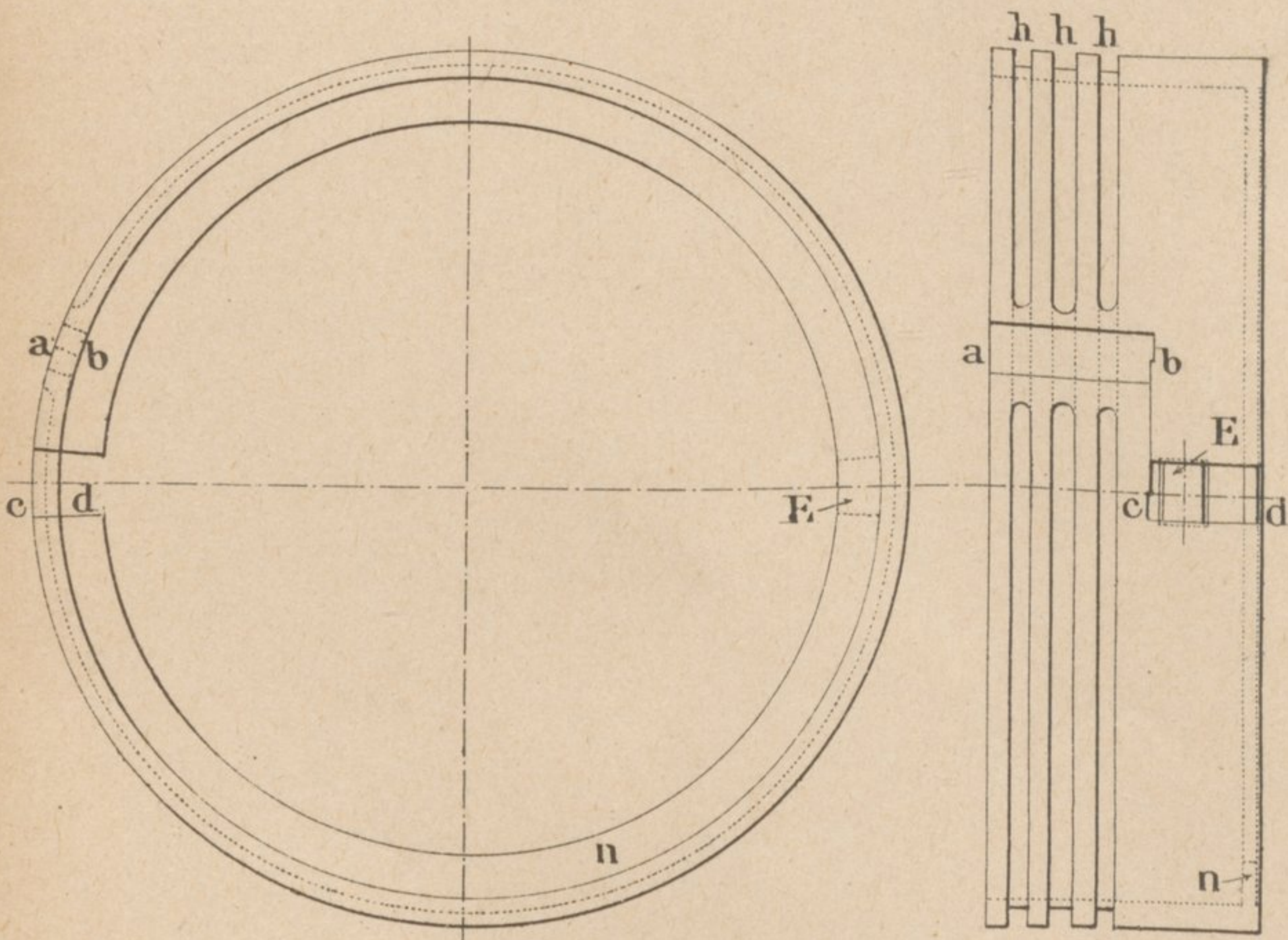
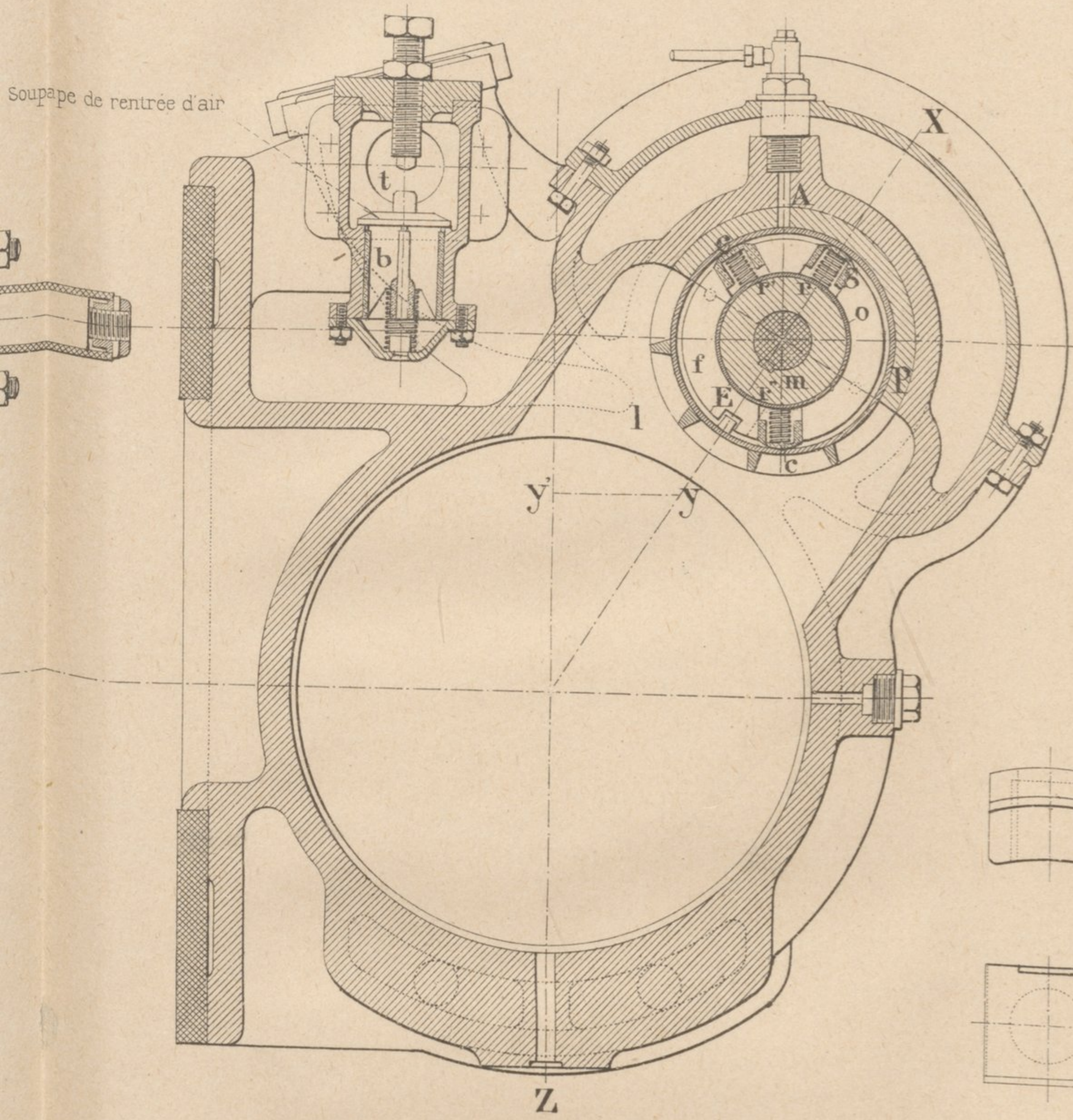


Fig. 2. Coupe transversale du cylindre passant par l'un des pistons et par la lumière I



Légende

A	Cylindre distributeur	Fig. 1 et 2
l, l	Lumières	Fig. 1, et 2
P, P	Pistons munis de segments	Fig. 1, et 2
S	Couvre-joint	Fig. 1, 2 et 7
c, c	Chapeaux	Fig. 2, et 8
r, r, r'	Ressorts	Fig. 1, 2 et 9
m	Souche mâle	Fig. 1, 2 et 6
f	Souche femelle	Fig. 1, 2 et 4
o	Couronne élastique	Fig. 1 et 5

Le ressort r appuie un couvre-joint S sur la coupure du segment. Les ressorts r, r', r' maintiennent le segment parfaitement centré sans donner à ce segment une bande appréciable

Fig. 7.

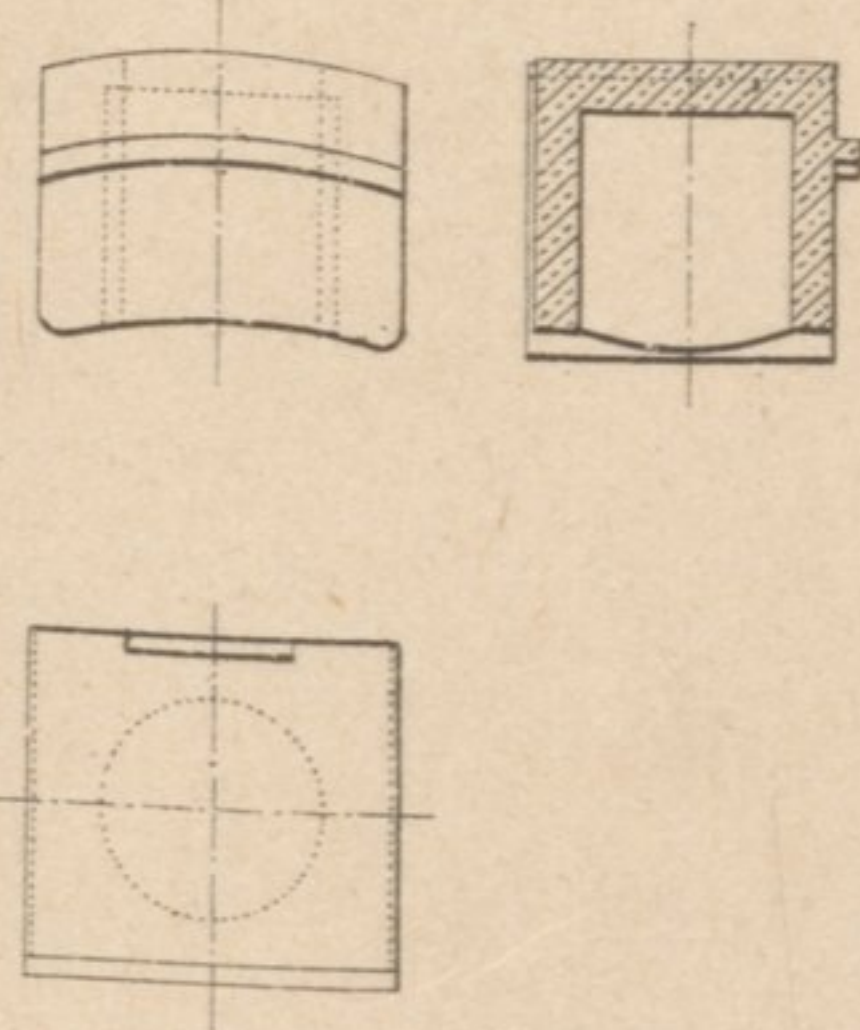


Fig. 8.

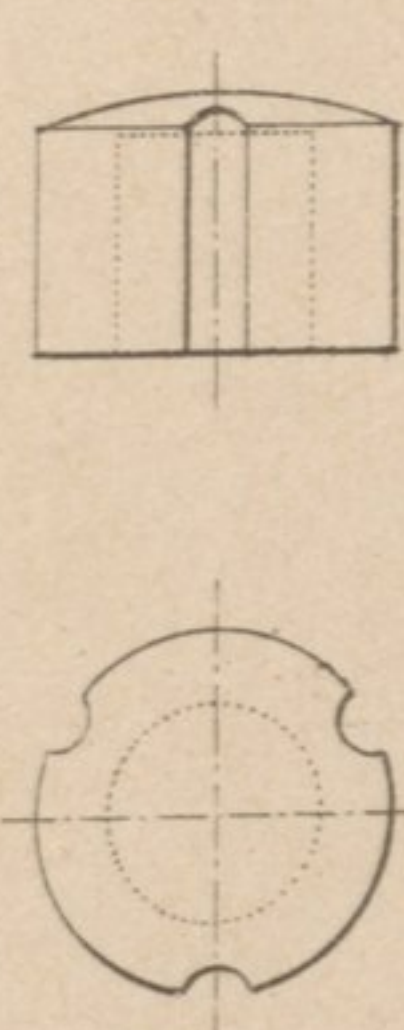


Fig. 9.



Fig. 5

Couronne élastique introduite entre les souches

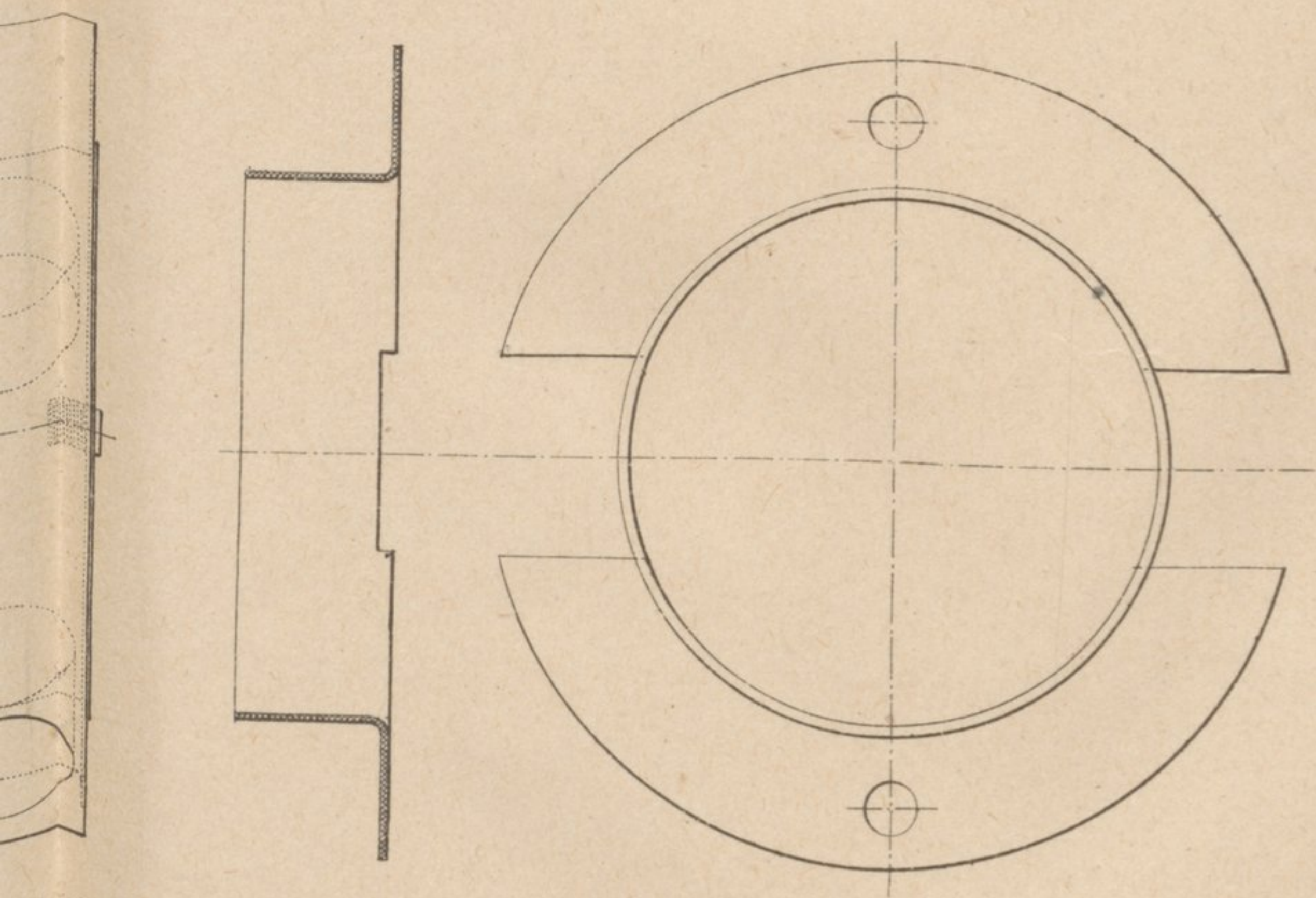
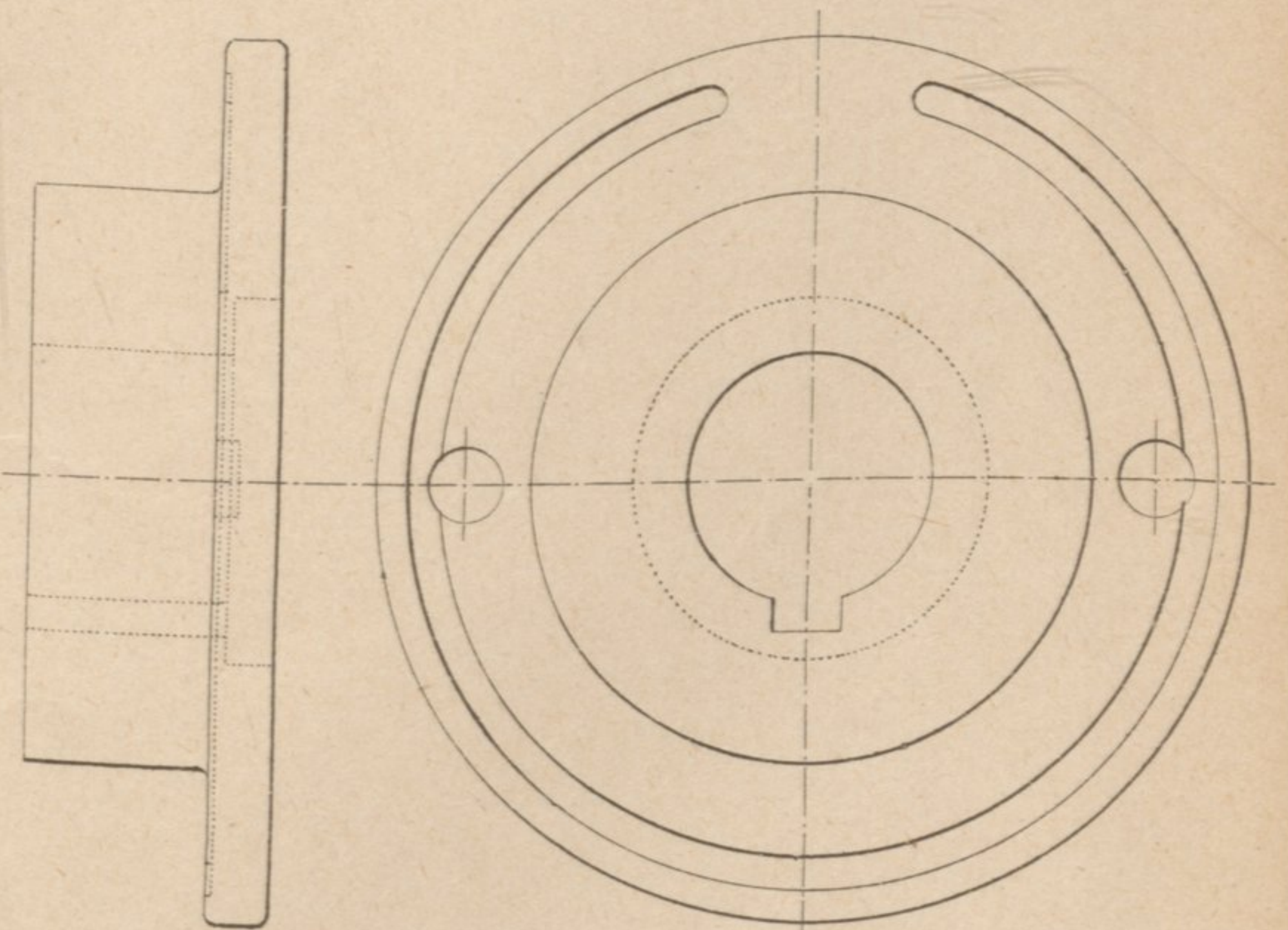
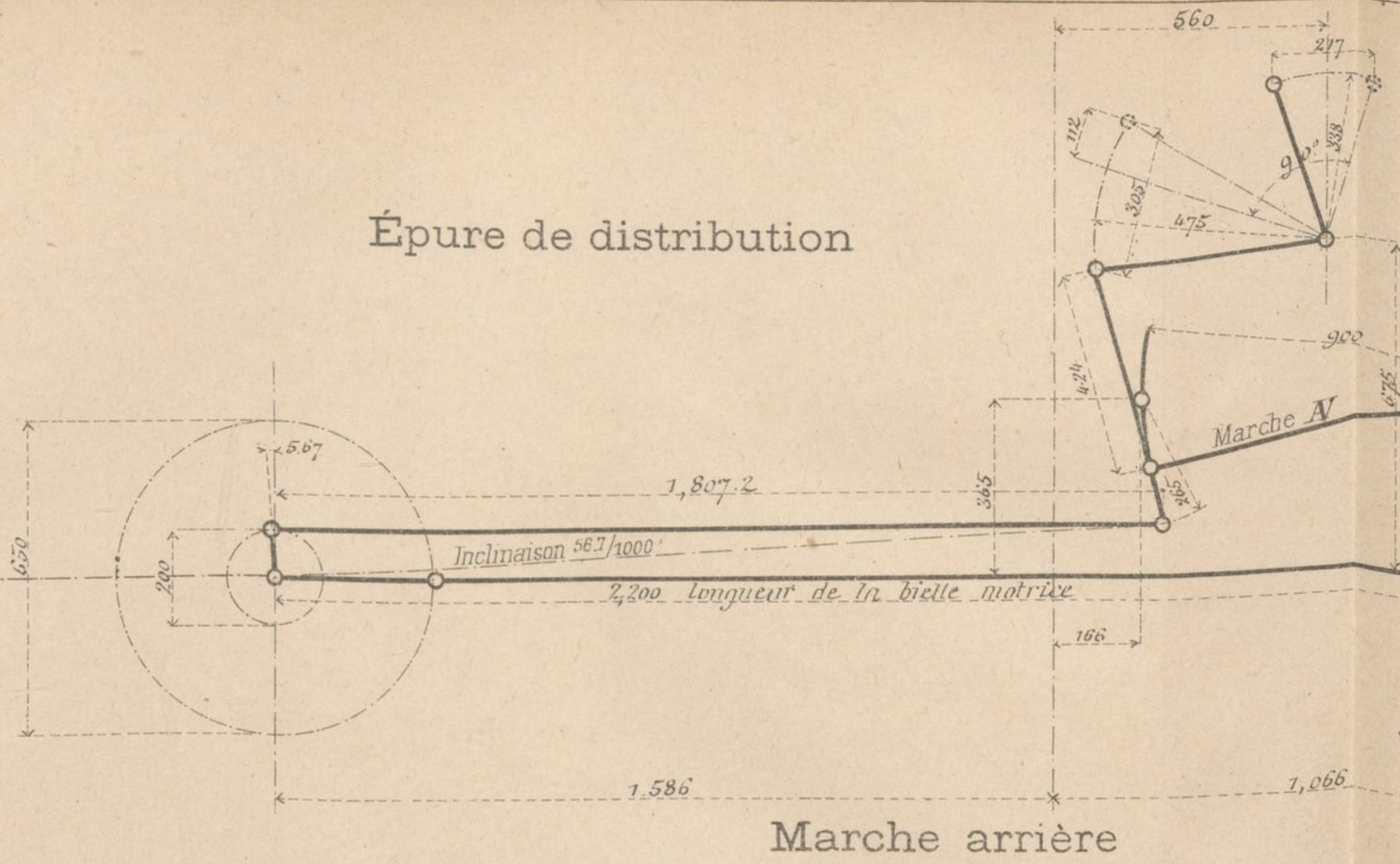


Fig. 6.

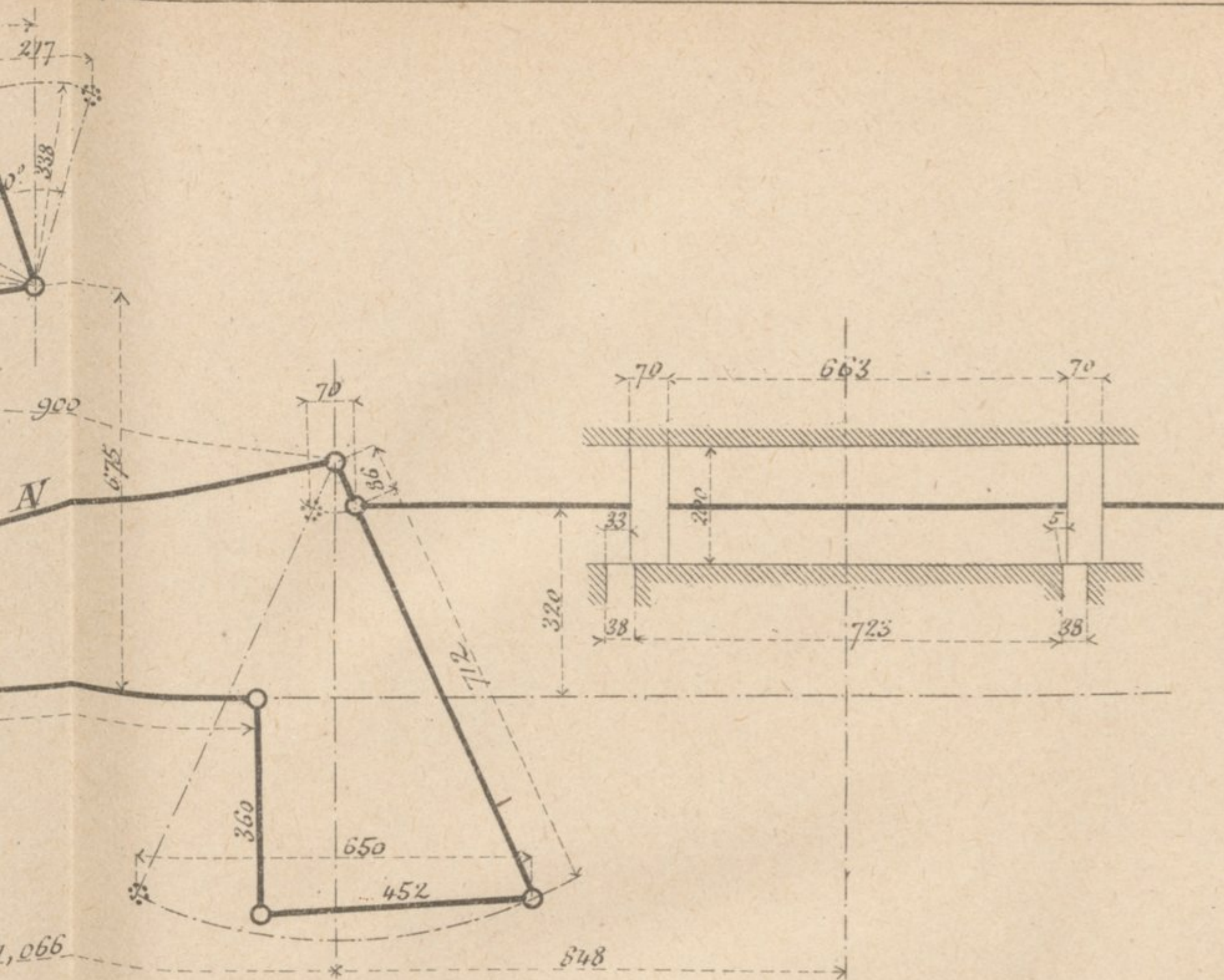


- Course du piston _____ 650^m/_m
- Longueur de la bielle motrice _____ 2^m.200
- Largeur des orifices d'introduction _____ 38^m/_m
- _____ d' _____ d'échappement _____ 38^m/_m
- Longueur développée des orifices _____ 258^m/_m
- Distance extrême des orifices _____ 799^m/_m
- Espace utilisable _____ 8^l.400

Épure de distribution



Désignation	Divisions de															
	Fond		7		6		5		4		3		2		1	
	avant	arrière	avant	arrière	avant	arrière	avant	arrière	avant	arrière	avant	arrière	avant	arrière	avant	arrière
Avance linéaire	admission		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	émission		33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Ouverture maxima des lumières exprimée en ^m / _m	29,5	32	26,8	29,5	19	21	14,4	15,5	11	11,5	8,5	8,8	6,5	6,3		
Moyenne	30,75		28,15		20		14,95		11,25		8,65		6,4			
Chemin parcouru par le piston avant l'admission exprimé en ¹ / ₁₀₀ de la course																
Moyenne																
Chemin parcouru par le piston pendant l'admission exprimé en ¹ / ₁₀₀ de la course	74,6	72	72,1	69,7	62,2	60,3	51,8	51	40,8	41,9	30,5	31,6	21,2	22,1		
Moyenne	73,3		70,9		61,25		51,4		41,35		31,05		21,65			
Chemin parcouru par le piston pendant la détente exprimé en ¹ / ₁₀₀ de la course	18	19,2	19,7	20,3	26,3	26,4	33,7	32	40,3	37,1	46	42,7	48,6	46,7		
Moyenne	18,6		20		26,35		32,85		38,7		44,35		47,65			
Chemin restant à parcourir par le piston lorsque l'échappement commence, exprimé en ¹ / ₁₀₀ de la course	7,4	8,8	8,2	10	11,5	13,3	14,5	17	18,9	21	23,5	25,7	30,2	31,2		
Moyenne	8,1		9,1		12,4		15,75		19,95		24,6		30,7			
Chemin parcouru par le piston lorsque l'échappement cesse, exprimé en ¹ / ₁₀₀ de la course	89,1	90,9	88	90	83,7	86	79,3	81,8	75	77,3	69,4	71,3	63,3	64,5		
Moyenne	90		89		84,85		80,55		76,15		70,35		63,9			
Chemin parcouru par le piston pendant la compression exprimé en ¹ / ₁₀₀ de la course	10,7	8,9	11,7	9,7	15,8	13,6	20	17,5	24	21,7	29,1	27,2	34,4	32,2		
Moyenne	9,8		10,7		14,7		18,75		22,85		28,15		33,8			
Chemin parcouru par le piston pendant le refoulement exprimé en ¹ / ₁₀₀ de la course	0,2	0,2	0,3	0,3	0,5	0,4	0,7	0,7	1	1	1,5	1,5	2,3	2,3		
Moyenne	0,02		0,3		0,45		0,7		1		1,5		2,3			
Course du tiroir exprimée en millimètres	121,5		116,3		100		89,9		82,5		77,3		72,8			
Chemin total parcouru par le coulisseau dans la coulisse par tour de manivelle exprimé en millimètres	12,5		11		8		6		4		2 ³ / ₄		1 ¹ / ₂			



- Courbe des excentriques _____ 200^m/_m
- Angle d'avance sinus _____ 5,67
- Courbe maximum des tiroirs _____ 129,2
- Recouvrement à l'échappement _____ 2^m/_m
- _____ 3° _____ à l'admission _____ 30^m/_m

Marche avant

de la Règle.

1		PM		1		2		3		4		5		6		7		Fond	
Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston		Côté du piston	
avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.	avanti.	arriere.
	5	5		5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	33	33		33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
	5	5		6,9	6,6	9	9	11,5	12,2	15,3	17	20,5	22,2	29	31,5	33,2	36		
				6,75		9		11,85		16,15		21,35		30,25		34,6			
8,8		8,1		22,5	22,7	30	31,5	40,2	41,5	51,2	50,8	61,5	59,5	72,5	69,5	76	70,7		
	8,45			21,6		30,75		40,85		51		60,5		71		73,35			
45,6		45,5		48,5	45,3	45	42,5	40,2	36,6	33,8	32	26,1	27	19,5	21	17,2	20,8		
	45,55			46,9		43,75		38,4		32,9		26,55		20,25		19			
45,6		46,4		31	32	25	26	19,6	21,9	15	17,2	12,4	13,5	8	9,5	6,8	8,5		
	46			31,5		25,5		20,75		16,1		12,95		8,75		7,65			
52,4		52,8		61,3	63,4	68,9	70,2	74,4	76,2	79	81,4	83,5	86	89,2	90	89,5	91,6		
	52,60			62,35		69,55		75,3		80,2		84,75		89,6		90,55			
40,4		39,7		36,1	34	29,4	28,3	24,4	22,8	20,4	18	16,1	13,5	10,5	9,7	10,3	8,2		
	40,05			35,05		28,85		23,6		19,2		14,8		10,1		9,25			
7,2		7,5		2,6	2,6	1,7	1,5	1,2	1	0,6	0,6	0,4	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2		
	7,35			2,6		1,6		1,1		0,6		0,45		0,3		0,2			
	70			73,5		78		83,7		92,3		102,7		120,5		129,2			
	0			3		5		7 ³ / ₄		9,5		11		12,5		13,5			